# L’Étude pan-canadienne

Sur les impacts et l’adaptation à la variabiité et auchangement climatique

## QUESTIONS SECTORIELLES

Rédacteurs : Grace Koshida, Wendy Avis

Environnement Canada

Canada

Ce rapport est une partie composante de l'Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques. En plus de quelques documents sommaires, la première phase de l'Étude pan-canadienne a produit six tomes régionaux, un tome comprenant douze rapports nationaux au sujet des secteurs social et économique, et un tome comprenant huit textes concernant les questions intersectorielles. Ce rapport est l'Étude pan-canadienne – Tome VII: Questions sectorielles.

This is a component report of the Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation. In addition to a number of summary documents, the first phase of the Canada Country Study produced six regional volumes, one volume comprising twelve national sectoral reports, and one volume comprising eight cross-cutting issues papers. This is The Canada Country Study – Volume VII : National Sectoral Volume.

Pour de plus amples renseignements concernant l'Étude pan-canadienne (ÉPC), contactez le Groupe de recherche en adaptation environnementale à Toronto au (416) 739-4436 (téléphone), (416) 739-4297 (télécopieur) ou indra.fungfook@ec.gc.ca (courriel).

URL : http://www.ec.gc.ca/climate/ccs

For further information on the Canada Country Study (CCS), please contact the Environmental Adaptation Research Group in Toronto, Ontario at 416-739-4436 (telephone), 416-739-4297 (fax), or indra.fungfook@ec.gc.ca (e-mail).

URL : http://www.ec.gc.ca/climate/ccs

**REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier tous les auteurs du volume l'Étude pan-canadienne sur les questions intersectorielles ainsi que tous ceux et celles qui ont contribué aux chapitres ou qui ont fourni des commentaires éditoriaux. Nous tenons à souligner particulièrement la contribution spéciale des membres du Groupe de recherche en adaptation environnementale. Les rédacteurs, Grace Koshida et Wendy Avis, méritent des remerciements très spéciaux pour leur professionnalisme, leur travail ardu, leur détermination et l'édition avisée de ce document. Il nous faut aussi souligner les conseils et l'appui fournis par Barrie Maxwell et Roger Street.

L'équipe de traduction de Marie-France Guéraud, Travaux publics et Services gouvernementaux à Montréal, Gilles Tardif d'ENVIROEDIT pour la révision du texte français ainsi que le personnel de l'imprimerie des presses de l'Université de Toronto méritent aussi nos remerciements.

Octobre 1998

*Ce rapport a été publié par le Groupe de recherche en adaptation environnementale d'Environnement Canada.*

## TABLE DES MATIÈRES

Remerciements ..... ii
Liste des tableaux ..... v
Liste des figures ..... ix
Liste des annexes ..... x
Message de la ministre ..... xi
Résumé ..... xii

1 Changement et variabilité climatiques : Impacts sur l'eau au Canada ..... 1
*par* : *Nancy Hofmann, Linda Mortsch, Simon Donner, Kirsty Duncan, Reid Kreutzwiser, Suren Kulshreshtha, Andrew Piggott, Shirley Schellenberg Bill Schertzerand et Michel Slivitzky*

2 Impacts du changement et de la variabilité climatiques sur les écosystèmes non aménagés, la biodiversité et les espèces sauvages ..... 129
*par : John C. Anderson, Ian Craine, Antony W. Diamond et Roger Hansell*

3 Les milieux humides du Canada et le changement climatique ..... 203
*par : Thomas A. Clair, Barry G. Warner, Richard Robarts, Henry Murkin John Lilley, Linda Mortsch et Clayton Rubec*

4 Répercussions du changement climatique mondial sur l'agriculture canadienne : Revue et évaluation de la recherche entre 1984 et 1997 - Tome 1 : Synthèse et évaluation des travaux nécessaires ..... 237
*par : M. Brklacich, C. Bryant, B. Veenhof et A. Beauchesne*

5 Étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques - Secteur des pêches ..... 277
*par : Brian Shuter, Charles K. Minns et Henry A. Regier*

6 Impacts du changement climatique sur les forêts canadiennes ..... 345
*par : Rick Saporta, Jay R. Malcolm et David L. Martell*

7 Étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques - Secteur de l'énergie ..... 417
*par : Gilles Mercier*

8 Étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques - Secteur des transport ..... 441
*par : Jean Andrey et Adam Snow*

9 Étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques - Secteur du milieu bâti ..... 487
*par : W. Alan Dalgliesh*

10 Étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques - Secteur des assurances..... 525
*par : Mark W. Baker*

11 Étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques - Secteur de la santé..... 545
*par : Kirsty Duncan, Tee Guidotti, Weiping Cheng, Komali Naidoo, Ginger Gibson, Laurence Kalkstein, Scott Sheridan, David Waltner-Toews, Shauna MacEachern et John Last*

12 Impacts du changement climatique sur le tourisme et les loisirs..... 645
*par : Geoffrey Wall*

## LISTE DES TABLEAUX


1.1 Records de précipitations au Canada ..... 14
1.2 Épisodes de sécheresse au Canada ..... 15
1.3 Tendances en matière de précipitations au Canada ..... 16
1.4 Changements dans les températures et précipitations (annuelles) pour différentes régions du Canada, en fonction des scénarios MCG $2xCO_2$ ..... 20
1.5 Comparaison des scénarios de précipitations MCG pour le bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent ($2xCO_2$ / $1xCO_2$) ..... 21
1.6 Changements dans les précipitations mensuelles pour différents scénarios MCG pour le bassin de la rivière Grand (%) ..... 21
1.7 Grandes inondations survenues au Canada ..... 26
1.8 Études canadiennes d'impact du climat sur l'hydrologie - Revue des scénarios, méthodes et impacts ..... 30
1.9 Débit du Saint-Laurent à la hauteur de Montréal - Conditions historiques et associées à un scénario $2xCO_2$ (débits mensuels en $m^3/s$) ..... 35
1.10 Impacts hydrologiques de différents scénarios de changement climatique sur la rivière Moisie ..... 37
1.11 Impacts des divers scénarios MCG sur les Grands Lacs ..... 40
1.12 Résumé des impacts hydrologiques à partir d'études canadiennes réalisées pour différents scénarios de changement climatique ..... 58
1.13 Superficie cultivée et irrigation au Canada, par province ..... 62
1.14 Liens entre les pêches en Colombie-Britannique et les changements climatiques locaux (stades du cycle biologique touchés par le climat) ..... 65
1.15 Impacts sur les pêches dans les Grands Lacs ..... 67
1.16 Résumé des impacts sur la navigation au Canada ..... 74
1.17 Résumé des lacunes/limites de la recherche ..... 82
1.18 Coûts estimés de l'adaptation des ressources en eau au climat actuel au Canada et tendances liées au changement climatique ..... 84
1.19 Prix moyens de l'eau dans différents pays, 1986 ..... 97
1.20 Évaluation des options en matière d'adaptation ..... 102
3.1 Répartition des milieux humides et des tourbières par province et territoire au Canada ..... 211
3.2 Fonctions et valeurs des milieux humides ..... 213
3.3 Projections des modèles avec un accroissement des températures et des précipitations ..... 218
4.1 Résumé de la revue de la littérature ..... 248
4.2 Impacts prévus de divers scénarios de changement climatique sur certaines propriétés agroclimatiques ..... 250
4.3 Impacts prévus du changement climatique mondial sur les cultures céréalières ..... 254
4.4 Impacts prévus du changement climatique mondial sur la culture des graines oléagineuses, du fourrage et de la pomme de terre ..... 256
4.5 Impacts prévus du changement climatique mondial sur l'appropriation des terres à l'agriculture et sur le potentiel productif ..... 259
4.6 Impacts prévus du changement climatique mondial sur l'économie agricole ..... 261
4.7 Adaptation de l'agriculture canadienne au changement climatique mondial ..... 263

5.1 Répercussions probables sur les pêches des changements dans l'écologie des poissons dus au climat ..... 284
5.2 Aperçu des pêches commerciales canadiennes - statistiques sur les captures et la valeur au débarquement pour 1990 et 1994 ..... 289
5.3 Statistiques de production pour l'industrie canadienne de l'aquaculture en 1994 ..... 291
5.4 Profil de la pêche récréative au Canada par résidents et non-résidents pour 1990 ..... 291
5.5 Pêches de subsistance et autochtones au Canada : estimations du nombre de pêcheurs et de la récolte annuelle pour chaque pêche ..... 292
5.6 Répercussions potentielles du changement climatique sur la productivité des écosystèmes dans les eaux côtières estuariennes et marines ..... 299
5.7 Effets potentiels d'un climat plus chaud et plus sec sur la productivité volumique annuelle moyenne des écosystèmes lacustres du centre du Canada ..... 302
5.8 Résumé des études qui démontrent soit un lien entre les mesures de la production d'une population et l'habitat thermiquement convenable ou qui utilisent ce genre de lien pour prévoir les effets du changement climatique ..... 306
5.9 Utilisation des habitats durant le cycle vital de salmonidés communs du Pacifique ..... 307
5.10 Résumé des changements des limites zoogéographiques observées/prévues/possibles des espèces de poissons ..... 310
5.11 Interactions potentielles entre les stress existants sur les écosystèmes et les éléments attendus du changement climatique ..... 314
5.12 Exemples des répercussions biologiques du changement climatique par région ..... 318
5.13 Exemples des impacts du changement climatique sur les pêches par région ..... 319
5.14 Classification des options d'adaptation pour les pêches canadiennes ..... 320
7.1 Réserves de pétrole brut ..... 421
7.2 Demande d'énergie primaire par région (en petajoules) ..... 424
7.3 Estimations des impacts du changement climatique sur la demande d'énergie ..... 431
8.1 Ressources consacrées au transport ..... 445
8.2 Emplois dans le secteur du transport ..... 445
8.3 Produit intérieur brut ..... 446
8.4 Réseau routier, 1975 ..... 447
8.5 Réseau routier, 1995 ..... 447
8.6 Débit routier, 1990 ..... 447
8.7 Réseau routier, 1995, par province/territoire et par compétence ..... 447
8.8 Données sur les véhicules automobiles ..... 448
8.9 Revenus de l'exploitation des autobus, y compris les subventions (milliards de dollars) ..... 449
8.10 Statistiques sur les autobus et le transport des voyageurs ..... 449
8.11 Parcs de véhicules de transport urbain ..... 449
8.12 Revenus d'exploitation des grandes entreprises de camionnage pour compte d'autrui ..... 450
8.13 Parc de camionnage pour compte d'autrui, 1994 ..... 450
8.14 Revenus des entreprises de camionnage pour compte d'autrui (revenus d'un million ou plus), par région, 1995 ..... 450
8.15 Statistiques pour les grandes entreprises de camionnage de marchandises, pour compte d'autrui ..... 450
8.16 Aéronefs, 1993 ..... 451

8.17 Revenus des sociétés aériennes ..... 451
8.18 Statistiques sur le transport aérien des voyageurs ..... 452
8.19 Statistiques sur le transport aérien des marchandises ..... 452
8.20 Voies principales (km) ..... 453
8.21 Matériel ferroviaire ..... 453
8.22 Revenus d'exploitation des chemins de fer ..... 453
8.23 Statistiques sur le transport ferroviaire des marchandises ..... 453
8.24 Statistiques sur le transport ferroviaire des voyageurs ..... 453
8.25 Revenus du transport maritime ..... 454
8.26 Nombre de tonnes de marchandises transportées par bateau ..... 454
8.27 Transport total de marchandises, par région ..... 455
8.28 Transport maritime - Trois principaux produits, par région (1994) ..... 456
8.29 Statistiques sur le transport maritime de voyageurs ..... 456
8.30 Pipelines, 1993 ..... 456
8.31 Vulnérabilités des activités de transport liées aux conditions météorologiques ..... 458
8.32 Sommaire du rapport du groupe IBI ..... 460
8.33 Saison des routes de glace pour la traversée du Mackenzie à Norman Wells ..... 463
8.34 Accidents de transport, moyennes de 10 ans ..... 466
8.35 Nombre de collisions routières, 1995, par condition météorologique ..... 467
8.36 Coûts annuels moyens de navigation - Flotte canadienne ..... 470
9.1 Répartition régionale des dépenses d'investissement au Canada, 1993 ..... 492
9.2 Répartition par secteur des dépenses d'investissement au Canada, 1993 ..... 493
10.1 Les dix premiers assureurs ..... 528
10.2 Changement du potentiel destructeur annuel ..... 537
10.3 Dommages totaux prévus ..... 537
11.1 Nombre de jours par année durant lesquels les concentrations d'ozone ont dépassé la concentration maximale de $82X10^{-9}$ durant une heure, donnée comme objectif de qualité de l'air ..... 563
11.2 Nombre de décès dus à la chaleur ou au froid signalés au Canada entre 1965 et 1992 ..... 568
11.3 Variables météorologiques prises en compte dans l'étude de la mortalité ..... 570
11.4 Scénarios de changement climatique utilisés dans le cadre de l'étude ..... 571
11.5 Analyse de régression pour les jours durant lesquels la température a dépassé le seuil thermique à Montréal ..... 573
11.6 Analyse de régression pour les jours durant lesquels la température a dépassé le seuil thermique à Toronto ..... 574
11.7 Caractéristiques des masses d'air dangereuses : Montréal, Ottawa et Toronto ..... 574
11.8 Taux de mortalité estimés dus à la chaleur au cours des étés 1958-1988, à Montréal et à Toronto (approche des seuils thermiques) ..... 576
11.9 Taux de mortalité estimés dus à la chaleur au cours des étés 1958-1988, à Montréal, Toronto et Ottawa (approche synoptique fondée sur la présence de masses d'air dangereuses) ..... 576
11.10 Estimation de la mortalité future imputable aux conditions météorologiques estivales au Canada (approche des seuils thermiques) ..... 577
11.11 Estimation de la mortalité future imputable aux conditions météorologiques estivales au Canada (approche synoptique) ..... 577

11.12 Comparaison entre la situation actuelle et les estimations établies en fonction des scénarios : pourcentage de jours durant lesquels la température dépasse le seuil thermique ou des masses d'air dangereuses sont observées ..... 578
11.13 Taux de mortalité due à certaines causes au Canada et aux États-Unis ..... 579
11.14 Nombre de décès dus à la foudre, aux orages et aux inondations au Canada entre 1965 et 1992 ..... 580

## LISTE DES FIGURES


1.1 Liens entre l'eau et nombre d'autres secteurs et interdépendance entre ces derniers ..... 9
1.2 Deux systèmes liés à l'eau ..... 10
1.3 Cycle hydrologique ..... 11
1.4 Précipitations annuelles totales pour le Canada ..... 13
1.5 Précipitations annuelles, bassin des Grands Lacs (1860-1990) ..... 17
1.6a Manteau nival en fonction des conditions climatiques actuelles dans la portion nord-ouest du bassin hydrographique de la baie de Quinte ..... 18
1.6b Manteau nival en fonction du scénario $2xCO_2$, dans la portion nord-ouest du bassin hydrographique de la baie de Quinte ..... 18
1.7 Ruissellement annuel moyen pour le Canada ..... 25
1.8 Tendances de la crue nivale de la rivière Bow et des températures printanières régionales ..... 28
1.9 Tendances du débit fluvial du Saint-Laurent à la hauteur de Cornwall (1861-1994) et de Ville Lasalle ..... 29
1.10 Ruissellement saisonnier et annuel (moyennes mobiles pour cinq ans) pour la rivière St. Mary's (N.-É.) ..... 29
1.11 Niveaux d'eau trimestriels (SRIGL 1985) au port de Montréal, jetée n°1, au cours des années 30, en fonction du régime actuel de régularisation du lac Ontario (plan 58D), et niveau de référence ..... 35
1.12 Niveaux annuels moyens des Grands Lacs ..... 39
1.13 Résumé des impacts hydrologiques au Canada ..... 57
1.14 Différents niveaux de recherche ..... 86
1.15 Échelle de participation des citoyens d'Arnstein ..... 90
2.1 Principales voies par lesquelles le climat influe sur les populations ..... 165
3.1 Les milieux humides du Canada ..... 208
3.2 Classification des milieux humides au Canada ..... 209
5.1 Proportions relatives des terres et de l'eau au Canada ..... 287
5.2 Pourcentage de la superficie de chaque province couverte par des lacs. Écoulement annuel par province ..... 288
5.3 Importance relative des impacts directs et indirects du changement climatique pour différents écosystèmes aquatiques et différentes régions géographiques du Canada ..... 316
5.4 Effets des échelles géographique et économique sur le gain net (avantages moins coûts) découlant des effets du changement climatique sur la société et sur le rôle que l'adaptation pourrait jouer dans l'atténuation des résultats néfastes ..... 324
7.1 Émissions de GES en 1995, par source ..... 425
8.1 Cadre théorique des impacts du changement climatique sur la navigation commerciale dans les Grands Lacs ..... 469
8.2 Impacts indirects du changement climatique sur le transport ..... 474
10.1 Modèle simple du secteur de l'assurance des biens et des risques divers ..... 528
11.1 Relation entre la température maximale et la mortalité à Montréal ..... 573

## LISTE DES ANNEXES


2A Noms communs et scientifiques de certaines espèces mentionnées dans le texte ..... 202
4A Glossaire ..... 276
6A Noms vernaculaires et scientifiques des espèces citées dans le texte ..... 410
7A Production d'énergie : Impacts et adaptation ..... 437
7B Transport de l'énergie : Impacts et adaptation ..... 438
7C Demande et utilisation d'énergie : Impacts et adaptation ..... 439

# Message de la Ministre de l'Environnement

Le changement climatique est l'un des plus grands défis du Canada en cette fin de millénaire. Si nous saurons le relever avec succès, nous aurons assuré la santé future de notre planète. Sinon, ce sont les générations à venir qui en souffriront.

Nous savons que notre connaissance du changement climatique repose sure une base scientifique solide. Les scientifiques du monde entier s'entendent pour dire que notre climat se réchauffe de plus en plus vite parce que des quantités accrues de gaz à effet de serre sont rejetées dans l'atmosphère.

L'Étude pan-canadienne ajoute à notre connaissance de l'impact que pourrait avoir le changement climatique sur les collectivités de tout le pays. Non seulement elle prévient la population canadienne des scénarios prévus par les scientifiques, mais aussi elle lui propose des manières de s'adapter à l'évolution du climat. L'Étude pan-canadienne nous aide à comprendre comment tirer profit des occasions économiques qui s'offriront et à améliorer notre bien-être social face à ce grand défi. Dans certains cas, les solutions sont déjà trouvées. Dans d'autres, il faudra effectuer de nouvelles études et consultations pour forger les meilleures stratégies. Il reste beaucoup à faire.

Un effort concerté s'impose pour surmonter le problème du changement climatique. Il est impératif que les Canadiens soient bien informés pour se préparer à réagir aux impacts potentiels de la situation. Une fois qu'ils auront bien saisi ses implications, je suis convaincue qu'ils prendront les mesures qui s'imposent pour protéger leur environnement, leur santé et leur économie au profit de leurs enfants et de leurs petits-enfants.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont collaboré à l'Étude pan-canadienne. Grâce à leurs efforts, les Canadiens savent mieux comment contribuer davantage à la poursuite de notre prospérité collective.

Christine S. Stewart

# Résumé

## INTRODUCTION

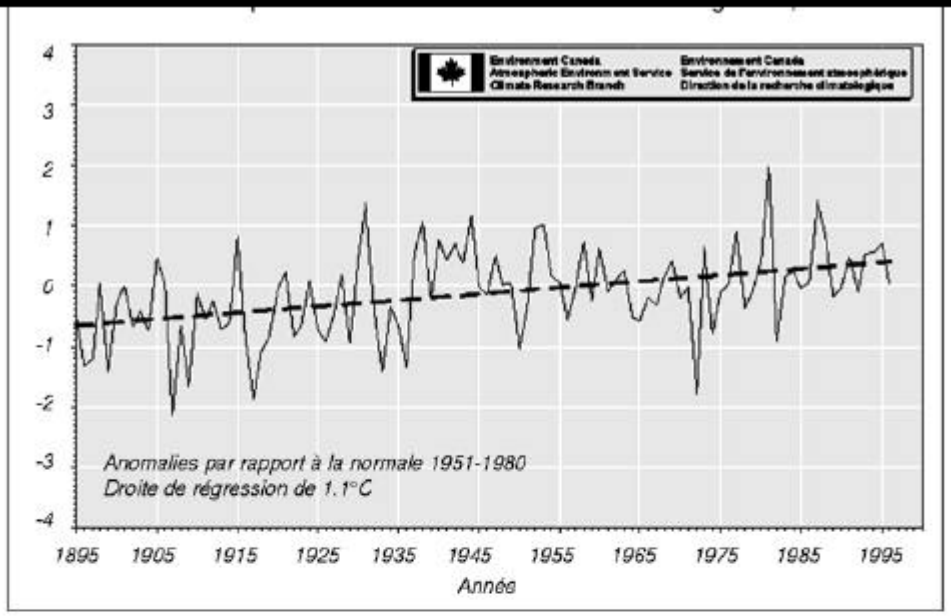
Les résultats techniques et scientifiques de l'étape d'évaluation de l'Étude pan-canadienne (EPC) sont regroupés sous forme de huit volumes, soit six rapports régionaux (Arctique, Atlantique, Ontario, Pacifique et Yukon, Prairies et Québec), un rapport sectoriel national qui contient douze documents, et un rapport sur les questions intersectorielles, qui en comprend huit. Le présent document, Résumé, est le condensé de douze documents relatifs aux questions sectorielles du rapport sectoriel national (agriculture, milieu bâti, énergie, pêches, foresterie, santé humaine, assurances, loisirs et tourisme, transport, écosystèmes non aménagés, ressources en eau et milieux humides.)

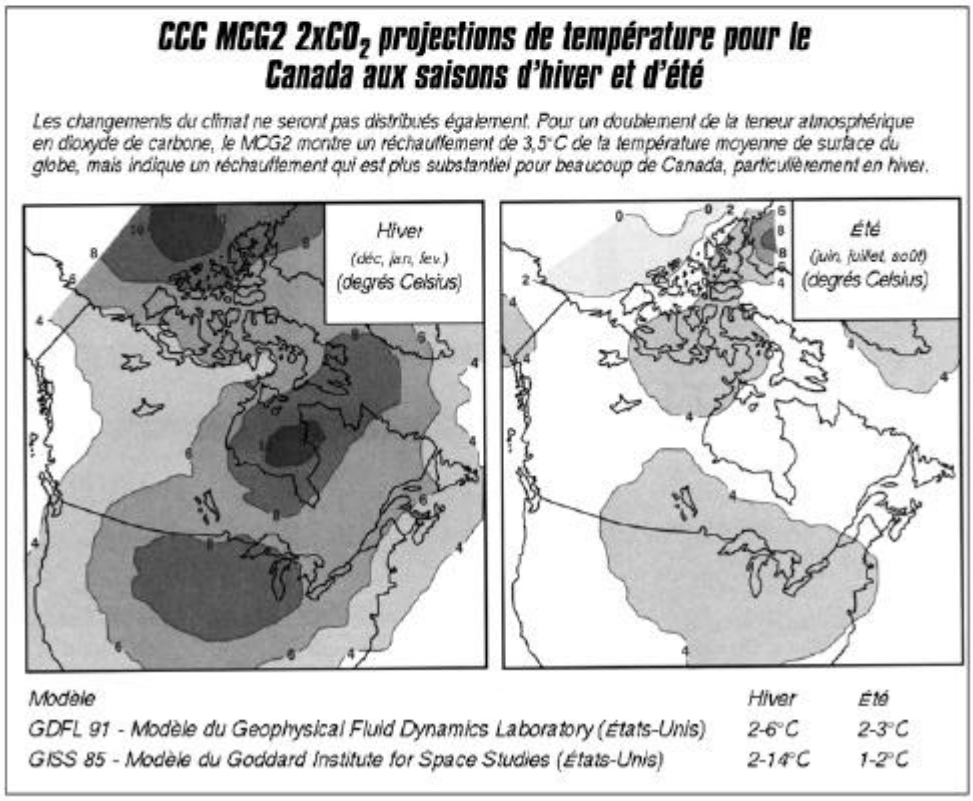
### *Changement climatique*

Selon le Deuxième Rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), les faits observés concordent pour indiquer une influence anthropique perceptible sur le climat à l'échelle planétaire. L'activité humaine entraîne une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et ces variations influeront, à l'échelle régionale et planétaire, sur les paramètres climatiques ou liés au climat tels que la température, les précipitations, l'humidité du sol et le niveau de la mer.

Afin de mieux comprendre les réactions du climat dans le monde, des modèles de circulation générale, ou MCG, qui sont des modèles informatiques perfectionnés, sont utilisés pour simuler les conditions climatiques dans le cas d'un doublement des concentrations de gaz à effet de serre par rapport aux niveaux de l'époque préindustrielle. Comme l'on s'est attaché jusqu'ici à faire une évaluation basée sur la plus récente littérature scientifique et technique, les résultats de l'EPC ne sont pas fondés sur un scénario climatique unique. L'Étude rassemble plutôt l'éventail des scénarios qui ont servi de base aux divers documents et rapports cités dans la littérature scientifique. En général, les principaux scénarios de modèles utilisés provenaient de l'un des cinq MCG, qui ont été conçus au Canada, aux États-Unis ou au Royaume-Uni : CCC92 - modèle de deuxième génération du Centre canadien de modélisation et d'analyse climatiques; GFDL91 - modèle du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (É.-U.); GISS85 - modèle du Goddard Institute for Space Studies (É.-U.); NCAR93 - modèle du National Center for Atmospheric Research (É.-U.) et le UKMO95 - modèle du Service météorologique du Royaume-Uni.

En interprétant ces résultats, le lecteur doit garder à l'esprit que l'on doit accorder plus de confiance aux projections du changement climatique à l'échelle de l'hémisphère ou du continent qu'aux prévisions à l'échelle régionale, entachées d'une plus grande incertitude. Il faut aussi noter que la majorité des changements climatiques, et donc des impacts, présentés devraient se produire au cours du prochain siècle, et que la vitesse moyenne du réchauffement sera probablement supérieure à tout ce qui est survenu depuis 10 000 ans. Qui plus est, comme il est si difficile de prévoir de futurs changements climatiques inattendus, rapides et de grande ampleur (comme ceux du passé), l'on peut s'attendre à des « surprises ».


Environment Canada
Atmospheric Environment Service
Climate Research Branch
Environnement Canada
Service de l'environnement atmosphérique
Direction de la recherche climatologique
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
Anomalies par rapport à la normale 1951-1980
Droite de régression de 1.1°C
1895
1905
1915
1925
1935
1945
1955
1965
1975
1985
1995
Année


CCC MCG2 2xCO2 projections de température pour le Canada aux saisons d'hiver et d'été
Les changements du climat ne seront pas distribués également. Pour un doublement de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone, le MCG2 montre un réchauffement de 3,5°C de la température moyenne de surface du globe, mais indique un réchauffement qui est plus substantiel pour beaucoup de Canada, particulièrement en hiver.
Hiver
(déc, jan, fev.)
(degrés Celsius)
Été
(juin, juillet, août)
(degrés Celsius)
Modèle
Hiver
Été
GDFL 91 - Modèle du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (États-Unis)
2-6°C
2-3°C
GISS 85 - Modèle du Goddard Institute for Space Studies (États-Unis)
2-14°C
1-2°C

## INCIDENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans le présent résumé, les résultats sont répartis selon deux catégories, les impacts du changement climatique et les mesures d'adaptation à ce changement, pour chacun des douze secteurs. Presque tous les secteurs du Canada sont, dans une certaine mesure, vulnérables au changement climatique, et les impacts projetés sont tels que le statu quo n'est pas une option viable. Il peut être possible pour un secteur ou une région donnée de déterminer, en les prenant séparément, les réponses à l'un ou l'autre des impacts repérés. Cependant, comme ces impacts devraient survenir simultanément et en même temps que d'autres changements démographiques, technologiques, économiques, sociaux et environnementaux, il devient beaucoup plus difficile d'évaluer les impacts cumulatifs et de choisir les réponses appropriées. En outre, notre climat étant variable, la population et l'économie canadiennes y réagissent de façon différente dans le temps et dans l'espace. C'est pourquoi tous les impacts devraient présenter des variations régionales significatives qui se répercuteraient sur la nouvelle distribution du bien-être social et le choix des mesures qui s'imposent.

La littérature scientifique sur l'incidence du changement climatique et les mesures d'adaptation au changement montrent de grandes différences dans la quantité de travaux de recherche relatifs à un système naturel ou à un secteur socio-économique donné au Canada. De plus, on s'est relativement peu attaché à examiner en détail les impacts positifs ou les avantages possibles du changement climatique. L'Étude pan-canadienne, qui est basée sur la littérature scientifique et technique actuelle, reflète ces inégalités.

### *Eau*

L'eau joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs de l'économie et de la société : municipalités, industrie, secteur manufacturier, loisirs, navigation et production d'hydroélectricité. En outre, la répartition et l'existence de nos écosystèmes naturels sont essentiellement tributaires de l'eau. Le changement climatique entraînera une intensification du cycle hydrologique mondial, ce qui aura d'importantes répercussions sur les ressources régionales en eau. Des variations relativement faibles des températures et des précipitations, qui ont des effets sur l'évapotranspiration et l'humidité du sol, pourraient sensiblement modifier l'ampleur et la répartition dans le temps du ruissellement et la gravité des inondations et des sécheresses.

**Impacts sur l'hydrologie** : Les impacts hydrologiques généralisés à l'échelle nationale prévus par les scénarios sur le changement climatique comprennent : une augmentation des précipitations annuelles dans la plupart des régions; des épisodes de précipitations locales plus intenses; une augmentation de l'évapotranspiration due à l'élévation de la température de l'air; la modification du ruissellement et du débit des cours d'eau au Canada; une baisse du niveau des lacs; une baisse de niveau des nappes d'eau souterraines; une diminution de l'humidité du sol dans le sud du Canada; une diminution de la saison des glaces et de l'étendue du pergélisol.

**Incidence sur l'utilisation de l'eau** : Les impacts sur l'hydrologie ont également une incidence sur les systèmes naturels et sur l'utilisation que les gens font de l'eau. Dans les régions rurales, les conflits liés à l'utilisation de l'eau pourraient augmenter, la baisse des réserves d'eau sous l'effet

de l'augmentation possible de l'évapotranspiration pourrait empêcher de satisfaire les demandes croissantes en eau d'irrigation. L'abaissement du niveau des lacs et du débit des cours d'eau pourrait réduire les habitats des poissons. L'élévation de la température de l'eau et la réduction des concentrations d'oxygène dissous pourraient nuire à certaines espèces de poissons. L'abaissement du niveau des lacs et des débits nuira à la production d'hydroélectricité, fera augmenter les coûts de l'énergie et aura une incidence sur la capacité de chargement des navires commerciaux. Toutefois, un réchauffement des hivers réduirait la quantité de glace dans les voies navigables, prolongeant ainsi la saison de navigation. La consommation d'eau des villes, notamment pour l'arrosage des pelouses, augmentera probablement en raison de la hausse des températures. Les variations des régimes des précipitations pourraient accroître le potentiel de sites de reproduction des vecteurs de maladies. Les inondations ou les précipitations intenses pourraient causer un débordement des réseaux d'égout pluvial et une contamination de l'eau, comme par des proliférations de *Cryptosporidium*.

***Écosystèmes, biodiversité, espèces sauvages et milieux humides***

Les écosystèmes sont des bassins qui renferment toute la diversité génétique et celle des espèces de la Terre. La présence et les associations des diverses espèces animales et végétales du milieu naturel dépendent, dans une large mesure, du climat. Le changement climatique projeté pourrait donc avoir d'importantes répercussions sur les écosystèmes naturels au Canada. De faibles variations du climat, comme une fluctuation de 1,0 °C à 2,0 °C des températures moyennes annuelles, peuvent sensiblement modifier les caractéristiques et les fonctions des écosystèmes naturels. La composition et la répartition géographique de nombreux écosystèmes subiront des changements à mesure que chaque espèce réagira individuellement au changement climatique. Toutefois, certains écosystèmes pourraient rester instables pendant plusieurs siècles, alors que l'évolution du climat continue d'apporter de nouvelles limites et possibilités.

**Écosystèmes terrestres** : Les espèces végétales et animales, qui sont adaptées au climat actuel, subiraient les effets des variations prévues de la température, de la perte ou de la dégradation de l'habitat et des changements dans l'abondance ou la disponibilité des sources alimentaires, dans le taux de prédation, dans la concurrence et dans la présence de parasites et de maladies. On s'inquiète beaucoup de la survie des espèces terrestres face à un changement climatique dont la vitesse sera supérieure à celle de tous les changements survenus depuis 10 000 ans, et dépassera la capacité des écosystèmes terrestres à s'adapter et à migrer.

Du fait du changement climatique, les limites actuelles des aires de répartition des espèces végétales et animales, des insectes et des microbes du sol se décaleront vers des altitudes ou des latitudes plus élevées et une invasion d'espèces venant du sud est probable. Cela tiendra à la migration prévue des régions écoclimatiques du Canada vers le nord, et à une altération sensible de leur dimension et de leur composition. La superficie de la toundra, par exemple, pourrait diminuer de plus d'un tiers, de sorte que cette région se retrouvera seulement dans les îles au nord du continent et sa végétation variera en fonction de la couverture neigeuse et de l'humidité du sol. Les caribous de Peary et les bœufs musqués de l'Extrême-Arctique pourraient disparaître, tandis que les caribous du continent seraient soumis à d'importants stress.

L'élévation de la température de l'air favorisera la croissance des plantes dans les régions où le climat actuel est un facteur limitant. Les images satellitaires ont montré une augmentation globale de l'activité photosynthétique terrestre au Canada entre 1981 et 1991, dans des régions marginales situées sur une large bande s'étendant du Yukon et de la Colombie-Britannique vers le sud-est jusqu'aux Grands Lacs, puis vers le nord-est jusqu'au Labrador. Un climat plus chaud et plus sec causera également un plus grand nombre de feux de forêt et une plus grande superficie sera détruite par les incendies au Canada, entraînant les conséquences qu'on connaît sur les espèces sauvages et les écosystèmes associés.

**Milieux humides** : Les milieux humides couvrent actuellement 14 % des terres du Canada et sont une ressource importante assurant les habitats des espèces (dont certaines des espèces rares, menacées d'extinction ou en péril du Canada), le stockage du carbone atmosphérique, le cycle des nutriments et des minéraux, l'assainissement de l'eau et la lutte contre les inondations. Par suite du changement climatique, les milieux humides semi-permanents, qui sont actuellement des bassins dominés par l'eau libre, pourraient se couvrir de végétation et voir leur salinité augmenter considérablement.

L'hydrologie joue un rôle déterminant dans l'écologie des milieux humides. Des niveaux d'eau plus bas peuvent y modifier tant la qualité que la quantité des habitats d'oiseaux aquatiques. Une hausse des températures de 3,0 ºC pourrait réduire de 39 % le nombre de bassins humides dans la région de forêts-parcs du Canada, en dépit de précipitations plus fréquentes; l'impact sera moins important dans la prairie. Les milieux humides de la prairie pourraient s'étendre vers le nord, ce qui compenserait certaines des pertes prévues dans d'autres parties de la région. La majeure partie des tourbières au Canada se trouve sur une couche de pergélisol continu à discontinu. Un réchauffement de 2,0 °C ferait remonter vers le nord les limites de cette couche et augmenter la profondeur à laquelle se situe le pergélisol, et la plus grande partie de la zone actuelle de tourbières n'aurait que du pergélisol sous-jacent avec toutes les implications que cela comporte pour leur écologie et leur biogéochimie. La situation pourrait relancer l'accumulation sporadique de tourbe dans les régions subarctiques du Canada. Toutefois, la dégradation des tourbières du sud risquant d'être beaucoup plus rapide que leur déplacement vers le nord, la superficie totale des tourbières diminuera donc probablement au Canada.

**Écosystèmes aquatiques** : Les habitats d'eau douce de certaines espèces aquatiques importantes, comme les salmonidés, pourraient être détruits dans certaines parties du Canada. Les écosystèmes aquatiques de l'intérieur subiront les impacts du changement climatique, comme des variations de la température de l'eau, du niveau et du débit des cours d'eau. De nombreuses espèces vivant dans les lacs et les cours d'eau, s'ils ne sont pas fermés, pourraient remonter vers le nord de 150 km pour chaque degré Celsius d'élévation de la température. La qualité de l'eau sera altérée par la baisse du niveau des lacs et du débit des cours d'eau, la hausse de la température de l'eau et la réduction des quantités d'oxygène dissous, qui réduiraient les habitats des poissons. Certaines espèces d'eaux froides, par exemple, comme l'omble de fontaine, pourraient être remplacées par des espèces d'eaux chaudes près de leur limite sud.

La réduction de l'épaisseur et de l'étendue de la glace et l'élévation du niveau de la mer dues au changement climatique auront divers impacts. Certaines espèces, comme la loutre de mer,

pourraient bénéficier de l'accès à de nouveaux habitats, tandis que d'autres, comme le phoque, pourraient décliner du fait du rétrécissement des étendues de glace de mer qui leur sont nécessaires pour se reproduire et s'alimenter. La situation de l'ours blanc est particulièrement inquiétante, car cette espèce pourrait disparaître si ses sources alimentaires devenaient insuffisantes parce que la saison sans glace serait trop longue dans l'océan Arctique. L'élévation du niveau de la mer menace d'importantes colonies de reproduction d'oiseaux marins, dont le guillemot marmette et le fou de Bassan, à Terre-Neuve.

### *Agriculture*

Au Canada, un aspect important de la relation entre le changement climatique et l'agriculture est la diversité des conditions de production agricole d'une région à l'autre. Un nombre considérable de recherches portent sur les conséquences possibles des scénarios de changement climatique sur les conditions agroclimatiques dans toutes les régions du Canada, à l'exception du sud de la Colombie-Britannique. Ces recherches ont étudié plusieurs scénarios de changement climatique et examiné les impacts des nouveaux climats sur diverses propriétés agroclimatiques qui avaient subi des changements, comme les saisons de croissance, les saisons sans gel et les valeurs saisonnières de la température, des degrés-jours de croissance, des unités thermiques du maïs, et du déficit des précipitations et de l'humidité. Les répercussions sur les régimes de température ont été plus approfondies que dans le cas des régimes hygrométriques.

Tous les scénarios et toutes les études du changement climatique à l'échelle planétaire prévoient un réchauffement du climat dans la majeure partie du Canada. Les impacts du changement climatique sur l'agriculture pourront se mesurer directement par les réactions des récoltes, du bétail, des sols, des mauvaises herbes, des insectes et des maladies. La température et l'humidité du sol sont les deux facteurs climatiques qui subiront sans doute le plus de variations dans de vastes régions agricoles du Canada. Du fait du changement climatique, les saisons sans gel seront sans doute plus longues, ce qui favorisera l'agriculture commerciale. Pour les Prairies, l'Ontario et le Québec, les évaluations prévoient de trois à cinq semaines de plus. Les résultats relatifs aux régimes hygrométriques montrent une variation des précipitations allant de 30 % à la baisse à 80 % à la hausse. Malgré les avantages possibles de saisons sans gel plus longues et plus chaudes et d'une augmentation des précipitations, la plupart des scénarios de changement climatique laissent entrevoir un accroissement substantiel possible de l'évapotranspiration. Cette situation entraînera un déficit hydrique saisonnier plus important dans toutes les régions du Canada, et plus particulièrement en Ontario.

**Capacité de production des terres** : Les impacts sur le potentiel agricole des terres au nord du 60$^{e}$ parallèle sont faibles. Cependant, dans la région de la rivière de la Paix et dans les régions agricoles nordiques de l'Ontario et du Québec, les terres destinées à la production agricole commerciale prendront une certaine expansion. La production maraîchère et la fruiticulture pourraient s'étendre au-delà de leurs actuelles zones du sud du Québec, de l'Ontario et de la Colombie-Britannique.

**Développement des cultures** : Les recherches ont mis en évidence les impacts sur les cultures céréalières, dont le maïs, le blé de printemps et d'hiver, l'avoine et l'orge. Des saisons sans gel

plus chaudes favoriseront la croissance des cultures céréalières, car le raccourcissement de la période s'écoulant entre les semailles et la récolte pourrait atteindre 3 semaines dans la plupart des régions pour les céréales de printemps et les céréales secondaires.

**Rendements** : La majorité des recherches examinées ont été réalisées avant les plus récentes améliorations des cultures et la mise en place de modèles de productivité qui prennent en considération les avantages possibles d'une augmentation des concentrations de $CO_2$ sur le rendement des cultures. Donc, ces études ont probablement surestimé les effets négatifs du changement climatique sur le rendement des cultures. Dans les Prairies, les récoltes de céréales de printemps devraient diminuer de 35 % dans l'ouest et augmenter jusqu'à 66 % dans l'est. On prévoit des résultats semblables en Ontario et au Québec, à l'exception des régions nordiques où la production de céréales sera plus forte, celle du maïs en particulier. Dans le Canada atlantique et en Colombie-Britannique, il pourrait y avoir une hausse du rendement des céréales, mais la réalisation de ce potentiel exige un accroissement de l'irrigation et l'existence de terres adéquates. Le Canada pourrait connaître une baisse générale de la production d'oléagineux en raison du stress dû à l'humidité, qui pourrait cependant être compensée par l'expansion vers le nord des terres se prêtant à ce genre de cultures.

**Commerce agricole** : Au niveau mondial, le Canada est un important producteur de produits agricoles. Les changements qui se produisent à l'étranger pourraient donc avoir une aussi grande incidence sur le secteur agricole canadien que les variations des perspectives de production nationales. D'importants changements, qu'ils soient positifs ou négatifs, dans la production agricole canadienne auront nécessairement des répercussions au pays et au-delà de ses frontières.

### *Pêches*

Au Canada, le secteur des pêches représente une importante source alimentaire, une activité sportive et une source d'emplois. En 1994, le total des prises commerciales au pays était de 1 070 kilotonnes, provenant surtout des océans, d'une valeur au débarquement de 1,78 milliard de dollars. L'aquaculture, qui est un secteur en pleine croissance, fait concurrence à la pêche commerciale. En 1994, la production a atteint 54 kilotonnes de poisson, surtout du saumon, d'une valeur estimée à 300 millions de dollars. Pour les poissons, les plages thermiques de survie, de croissance et de reproduction sont des caractéristiques particulières à l'espèce. Ces températures se situent de 10 °C à plus de 25 °C. Vu l'importance de la température dans les activités vitales du poisson, la réponse des populations d'eau de mer et d'eau douce aux variations de la température de l'eau imputables au changement climatique est de deux ordres : modification de la production piscicole en un endroit donné et modification de la répartition géographique des poissons. Si, au Canada, le climat devient plus chaud et plus sec, nos ressources halieutiques subiront les impacts suivants :

**Dans le Pacifique** : On prévoit une exploitation durable plus basse et plus variable des populations de saumon du sud et une réduction de l'abondance de la morue du Pacifique. Par ailleurs, on prévoit une exploitation durable plus élevée et plus régulière des populations de saumon du nord, le saumon rouge étant le plus touché.

**Dans l'Atlantique** : L'exploitation globale durable dans les eaux côtières et estuariennes pourrait baisser en raison des diminutions de l'apport d'eau douce et du déclin subséquent de la productivité des écosystèmes. Il pourrait se produire des changements généralisés dans l'exploitation durable, dans l'emplacement des secteurs de pêche et dans l'efficacité des engins de pêche pour de nombreuses espèces, du fait des modifications complexes et largement imprévisibles subies par les courants océaniques qui régissent l'habitat et la migration des espèces marines.

**Dans l'Arctique** : On prévoit une hausse de l'exploitation durable de la plupart des populations de poissons, puisque le rétrécissement de la couverture de glace permettra une remise en circulation des éléments nutritifs, donc une augmentation de la productivité des écosystèmes.

**Dans les eaux douces du sud** : L'exploitation durable de nombreuses espèces pourrait régresser en raison de la baisse du niveau des lacs et du débit des cours d'eau et de la réduction de la charge et de la remise en circulation des éléments nutritifs dans nombre de lacs et cours d'eau du Bouclier canadien. On pourrait voir une réduction du pourcentage des prises durables totales des espèces d'eaux froides, dont la truite, le brochet, le corégone et l'omble.

**Dans les eaux douces du nord** : Il y aura une augmentation de l'exploitation durable de la plupart des espèces en raison des saisons de croissance plus longues et plus chaudes et des variations assez faibles des niveaux d'eau. Il pourrait également y avoir une augmentation de la diversité des espèces commerciales liée à celle des habitats thermiques convenant à de nouvelles espèces du sud dont les territoires s'étendent vers le nord.

***Forêts***

Les forêts jouent, depuis longtemps, un rôle important au sein de l'économie canadienne et elles contribuent à définir notre identité culturelle et sociale. Au Canada, sur les 417,6 millions d'hectares de forêt (soit 42 % de la superficie totale des terres), 119 millions d'hectares sont gérés en vue de l'exploitation et 50 millions sont protégés par législation contre toute exploitation. L'écosystème de nos forêts génère 1 emploi sur 15 et abrite environ 200 000 espèces sauvages. La réaction des forêts au changement climatique se traduit à la fois par des changements directs résultant de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre et par des changements indirects, comme les variations de température et de précipitations.

**Impact sur les forêts** : Les forêts du Canada retiennent des quantités importantes de carbone en raison de la lente décomposition de la masse organique du sol. La hausse des températures accélérerait la décomposition, le taux de croissance des végétaux ou productivité primaire nette. Comme la vitesse du changement climatique devrait dépasser celle à laquelle les forêts peuvent s'adapter ou migrer, nos écosystèmes forestiers seront probablement dans des états transitoires en réaction à ce changement, avec des impacts surtout négatifs. De plus, les forêts canadiennes pourraient subir des dommages dus aux tempêtes et au vent plus fréquents et plus graves dans les régions côtières, des sécheresses dues au stress causé par le nouveau régime de précipitations ainsi que des incendies de forêt plus fréquents et plus dévastateurs.

Les essences individuelles des forêts actuelles devraient migrer vers le nord (ou vers de plus hautes altitudes) et les associations d'espèces devraient être modifiées. L'étendue de la forêt boréale diminuera considérablement, car la prairie et les espèces à feuilles caduques devraient envahir ce territoire par le sud. De plus, son expansion vers le nord est limitée par la pauvreté des sols et l'insuffisance de l'ensoleillement. La composition des forêts dans le nord-ouest du Pacifique demeurera sensiblement la même, sa riche diversité d'espèces compensant la migration des espèces individuelles. Les habitats et les réserves naturelles des espèces pourraient être menacés par la parcellisation et la perturbation de l'équilibre entre l'habitat et le climat causées par le changement climatique.

**Industrie forestière** : Des forêts mal adaptées au changement climatique projeté laissent entrevoir le déclin de grandes superficies forestières. La coupe de récupération de ces zones pourrait accroître le potentiel de récolte pendant un certain temps; cependant, à terme, il pourrait y avoir une pénurie de bois, parce que les nouvelles zones boisées du nord n'arriveront pas à maturité assez vite pour compenser les pertes encourues dans le sud. Les pertes dues au déclin des forêts, les nouveaux régimes de perturbation par les incendies et les insectes, ainsi que par la sécheresse à certains endroits, pourraient donc mettre à l'épreuve la capacité d'adaptation de l'industrie, surtout dans une optique de rendement durable à long terme. L'incidence globale sur les forêts canadiennes variera donc selon les régions. Dans la région du Mackenzie, par exemple, on prévoit que la production du bois d'œuvre commercial, tant de feuillus que de résineux, diminuera de 50 %, du fait du changement climatique.

### *Énergie*

En général, les secteurs de l'énergie et du transport sont relativement peu sensibles au changement climatique si on les compare au secteur de l'agriculture et aux écosystèmes naturels. Leur capacité d'adaptation devrait être élevée si on effectue une gestion adéquate et un remplacement normal des immobilisations. Toutefois, les activités de ces secteurs demeurent vulnérables à la fréquence et à l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes.

**Demande d'énergie** : La demande en énergie pour le chauffage ou la climatisation de l'espace ambiant pourrait varier, y compris une réduction des besoins de chauffage en hiver et un accroissement des besoins de climatisation en été. On s'attend à une baisse globale d'énergie dans tout le pays, sauf au Québec où l'on prévoit une augmentation générale de la demande. En Ontario, il pourrait y avoir une diminution de la demande en énergie pour le chauffage ou la climatisation, mais la demande de pointe pourrait augmenter. On s'attend également à des variations de la demande d'énergie pour d'autres besoins. Dans les Prairies, par exemple, l'utilisation de l'énergie pour le transport diminuera, mais elle augmentera pour l'irrigation, le séchage du grain et la récolte.

**Approvisionnement - hydroélectricité** : Le potentiel de production d'hydroélectricité est sensible aux changements de la disponibilité de l'eau et des régimes des débits. On prévoit donc des changements, différents selon les régions, de ce potentiel, qui refléteront les fluctuations projetées de la disponibilité de l'eau et des débits, par exemple à la hausse au Labrador et dans le nord du Québec et à la baisse en Ontario, dans les Prairies et dans le sud-est de la Colombie-

Britannique. Si les phénomènes météorologiques extrêmes changent tel que prévu, il y aura davantage de pannes d'électricité causées par les orages. Les industries consommatrices d'électricité (comme les alumineries) pourraient être particulièrement touchées.

**Approvisionnement - combustibles fossiles** : Les exploitations pétrolières et gazières en mer pourraient bénéficier de la diminution des risques naturels, comme la glace, voire les icebergs, mais être exposées à de violentes tempêtes qui seront plus intenses et plus fréquentes. Les économies qui pourraient être réalisées seraient en partie annulées par les coûts plus élevés des installations sur les côtes, exposées à une plus forte activité des vagues. Les coûts des pipelines dans l'Arctique pourraient être plus élevés en raison des problèmes causés par l'instabilité accrue du pergélisol. On prévoit une réduction des coûts des opérations des navires-citernes brise-glace. Il subsiste, néanmoins, trop d'incertitudes pour que l'on puisse intégrer les impacts positifs aux calculs actuels alors que les impacts négatifs doivent être inclus en raison de l'approche prudente adoptée par l'industrie pour ses opérations en régions éloignées. Par conséquent, il pourrait y avoir à court terme une hausse des coûts du pétrole et du gaz en provenance de ces régions. Pour ce qui est de l'exploitation du charbon, l'augmentation de l'érosion des côtes et des glissements de terrain pourrait constituer un problème dans certaines régions, comme la Colombie-Britannique.

***Transport***

**Par voie terrestre** : On prévoit que les coûts généraux des transports par voie terrestre seront réduits, puisque les hivers seront plus courts et/ou moins rigoureux (fonctionnement plus efficace des moteurs, temps de réchauffage plus court, saison de déneigement moins longue, mais des quantités de neige plus élevées dans certaines régions du pays). Ces projections valent surtout pour le sud du Canada. Dans le nord, cependant, comme dans le bassin du Mackenzie, le coût du transport en hiver pourrait être plus élevé à cause du raccourcissement de la saison d'utilisation des routes de glace. L'accroissement de l'instabilité du pergélisol entraînera probablement une augmentation des coûts d'entretien des routes praticables en tous temps et des plates-formes des voies ferrées.

**Par voie maritime** : La saison de navigation pourrait s'allonger dans les endroits actuellement recouverts de glace de mer une partie ou tout au long de l'année, comme dans la baie d'Hudson et dans l'ouest et le centre de l'Arctique. Les normes de conception navale liées à la glace de mer pourraient également être modifiées. De façon générale, l'élévation du niveau de la mer augmentera les profondeurs d'eau dans les ports et dans les chenaux, mais toute l'infrastructure des zones côtières en subira de sérieux dommages dans l'Atlantique et dans l'Arctique. L'intensification possible des tempêtes a soulevé de nombreuses inquiétudes, car elle pourrait entraîner un recours accru aux services d'aide à la navigation.

**En eaux douces** : Malgré l'allongement de la saison de navigation en eau libre, la baisse prévue des niveaux d'eau aura généralement beaucoup d'effets négatifs pour la navigation commerciale sur les principaux lacs et cours d'eau, comme dans le système des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Sur le Mackenzie, la saison de navigation des barges pourrait s'allonger (jusqu'à 40% de plus), mais il sera plus difficile d'y naviguer en raison de la baisse des niveaux d'eau.

**Par voir aérienne** : Les impacts sur le secteur de l'aviation n'ont pas encore été analysés de façon rigoureuse. Toutefois, il est à prévoir que l'efficacité des moteurs sera réduite. Pour les petits aéronefs, cela se traduira par un allongement de la saison d'exploitation des hydravions et un raccourcissement de la saison d'utilisation des pistes de neige et de glace.

***Milieu bâti***

Le milieu bâti inclut les demeures, les immeubles, les routes, les voies ferrées et des ouvrages tels que les digues et les pipelines. Les impacts du changement climatique sur le milieu bâti pourraient entraîner des modifications des normes de construction, de la stabilité du sol (p. ex., glissements de terrain et fonte du pergélisol) et de la fréquence et de la gravité des inondations et autres phénomènes extrêmes.

**Saison de construction** : La saison estivale de construction devrait s'allonger et la saison hivernale pourrait raccourcir. Alors que c'est un avantage dans le sud du Canada, ce raccourcissement de la saison hivernale de construction dans le Nord pourrait rendre difficiles l'accès (routes d'hiver) et la réalisation de grands travaux (pour ne pas perturber les zones de toundra sensibles par le passage d'équipements lourds).

**Pergélisol** : L'augmentation du soulèvement par le gel, du tassement dû au dégel et de l'instabilité des pentes affectera l'intégrité structurelle et la conception des structures nordiques, comme les pipelines. Pour les fondations, les conditions seront différentes dans le Nord lorsque le pergélisol dégèlera, le tassement différentiel pouvant affecter l'intégrité des structures, voire entraîner leur effondrement. Les lignes de transmission et les pipelines peuvent se rompre. Les opérations minières pourraient se trouver facilitées, mais les terrils, les digues à stériles et les chenaux de dérivation de l'eau exigeraient une maintenance accrue et coûteuse.

**Neige** : Les économies réalisées grâce à la diminution de la charge de neige sur les immeubles et les ouvrages pourraient être réduites par l'accroissement des charges dues au vent et à la pluie, des cycles de gel/dégel et de la sécheresse des étés.

**Inondations et autres phénomènes extrêmes** : Bien que les projections des changements dans les inondations et autres phénomènes extrêmes restent entachées de beaucoup d'incertitude, leurs conséquences pour les immeubles et les constructions méritent que l'on s'y arrête. On craint particulièrement l'inondation des quais, installations portuaires et maisons situées dans les terres basses et la surcharge des réseaux d'adduction d'eau et d'égout, situations liées à l'élévation prévue du niveau marin, aux chutes extrêmes de pluie ou de neige et aux embâcles printanières. Les lignes de transport d'électricité et autres (en raison des charges dues au vent et à la glace), les piles de ponts, les barrages (en raison des niveaux des inondations et des embâcles) sont particulièrement vulnérables aux changements dans les phénomènes extrêmes. Avec l'augmentation de la densité de population et des biens, les phénomènes extrêmes pourraient faire plus de dommages, et les pertes seraient plus élevées, même sans changement climatique. Les défaillances structurales dues à la détérioration au fil des mois et des années pourraient survenir

plus rapidement dans les régions où l'on prévoit qu'il y aura davantage d'extrêmes de températures et d'épisodes de pluie et de vent combinés.

***Assurances***

Tout changement dans la fréquence ou l'intensité de ces phénomènes extrêmes modifiera le nombre de réclamations. Il s'ensuivra un changement de la couverture et des primes en vertu de l'approche actuarielle classique de l'industrie qui veut que « le passé est le garant de l'avenir ». On s'inquiète sérieusement de ce qu'un changement climatique brutal, entraînant des désastres, et donc des réclamations, plus fréquents, obligerait à verser des montants plus élevés et plus nombreux, avant que les réserves adéquates n'aient pu être constituées. L'approche traditionnelle de l'industrie n'aurait donc pas le temps de prendre ces changements en compte.

**Assurance des biens** : Les assurances des biens seront sans doute directement touchées (soit par des restrictions de la couverture, soit par une augmentation sensible des primes), et on encourage l'adoption de codes du bâtiment plus stricts de façon à réduire les sensibilités. De plus, il faudra assumer une plus grande responsabilité publique ou personnelle face aux catastrophes naturelles, comme les inondations, les sécheresses et les tempêtes de vent. Le coût des assurances ainsi que leur disponibilité auront également des répercussions sur la viabilité des entreprises existantes et futures.

**Assurance-récolte** : Tout changement soudain dans la fréquence ou dans l'intensité des phénomènes extrêmes risque de produire des épisodes plus fréquents de grêle, de sécheresse, de gel et d'humidité excessive qui affecteront l'industrie. Dans les Prairies, on s'attend à ce que les primes soient plus élevées dans le secteur agricole, des changements à la disponibilité et à l'admissibilité étant possibles. Cette restructuration pourrait mettre à l'épreuve la viabilité financière de l'agriculture et d'autres secteurs.

**Assurance maritime** : Le changement climatique et ses effets possibles sur les côtes, les banquises, les quantités de glace et le moment où elles se brisent, ainsi que divers autres impacts océaniques auront une incidence sur la marine marchande et sur les compagnies d'assurances qui en assurent la protection.

***Santé humaine***

L'évolution du climat aura des impacts généralisés et généralement néfastes pour la santé humaine. Certains facteurs climatiques risquent d'avoir un effet direct sur la biologie humaine, dont :

**Stress dû à la chaleur** : Des vagues de chaleur plus intenses et plus fréquentes entraîneraient une augmentation des maladies et des décès, notamment chez les jeunes enfants, les personnes âgées, les malades ou les gens fragiles, plus particulièrement dans les grands centres urbains. Selon une étude exhaustive et empirique sur le lien entre le changement climatique et le nombre de décès causés par la chaleur, qui a été réalisée dans dix villes au Canada, si les températures se comportent comme prévu avec un doublement des concentrations de $CO_2$, les régions urbaines du

sud-est de l'Ontario et du sud du Québec seront affectées. Un été « moyen » en l'an 2050 pourrait provoquer de 240 à 1 140 nouveaux décès liés à la chaleur par année à Montréal, de 230 à 1 220 à Toronto et de 80 à 500 à Ottawa, si aucune mesure d'acclimatation à la hausse des températures n'était mise en place.

Dans les impacts indirects du changement climatique sur la santé humaine, on inclut l'augmentation de certains polluants atmosphériques, du pollen et des spores de moisissure, la malnutrition, l'augmentation de maladies transmises par des vecteurs ou par l'eau et les impacts sur le système de soins de santé publique.

**Pollution de l'air** : Les troubles respiratoires et les problèmes d'allergie seront exacerbés par des chaleurs extrêmes et un taux d'humidité élevé. Toutefois, les épisodes de smog seront moins fréquents dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec et dans la vallée du Fraser, par exemple, en raison des concentrations moins élevées de matières particulaires en suspension.

**Phénomènes météorologiques extrêmes** : On s'inquiète des hausses prévues de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, bien qu'elles demeurent incertaines, car elles pourraient avoir une incidence sur les décès, les blessures, les maladies contagieuses (par ex., les eaux de ruissellement contaminées pourraient altérer la qualité de l'approvisionnement en eau) et les troubles liés au stress, et avoir d'autres effets néfastes sur la santé du fait des perturbations sociales et des migrations pour motifs environnementaux.

**Vecteurs de maladie** : On croit que les cas d'encéphalite équine de l'Ouest, d'encéphalite équine de l'Est, d'encéphalite de Saint-Louis et le virus du lièvre d'Amérique (SSH) se multiplieraient au Canada en raison du changement climatique. De plus, la malaria pourrait s'étendre vers le nord jusqu'au Canada. Toutefois, une étude a suggéré que, dans les climats tempérés, des mesures rigoureuses de contrôle, comme le suivi des maladies et un traitement immédiat des cas, seraient probablement suffisantes pour enrayer toute augmentation de la capacité des vecteurs. D'autres maladies transmises par les moustiques qui pourraient, avec l'évolution du climat, se propager vers le nord jusqu'au Canada sont la dengue et la fièvre jaune. Les maladies transmises par les tiques, comme la maladie de Lyme et la fièvre pourprée des montagnes Rocheuses, pourraient également se propager sur un plus grand territoire sous l'effet du changement climatique.

**Contamination de l'environnement** : Le changement climatique entraînera également un plus grand nombre de troubles de la santé liés à la contamination de l'environnement et de l'eau par des bactéries (par ex., *Bacillus anthracis),* des virus et des protozoaires (comme *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium* et *Leptospira*) et des parasites. Le régime alimentaire des Canadiens risque aussi d'être modifié par l'apport de nourriture provenant d'autres pays. Les importations de nourriture pourraient entraîner une augmentation des maladies virales, parasitaires et bactériennes, comme l'hépatite A.

**Système de soins de santé publique** : Le changement climatique fera probablement un plus grand nombre de réfugiés environnementaux. Ces réfugiés pourraient introduire au pays des maladies qui n'y sont pas endémiques. Le système de soins de santé actuel du Canada n'est pas

prêt à faire face aux changements que subiront les politiques liées à la fiscalité, à l'agriculture, au transport et à l'énergie et à leurs répercussions sur la santé humaine.

***Loisirs et tourisme***

**Tourisme** : Les destinations touristiques qui attirent leur clientèle grâce surtout à leurs ressources naturelles, comme les montagnes et les plages, risquent plus de souffrir du changement climatique que les destinations qui dépendent de leurs attraits historiques et culturels.

**Activités aquatiques** : L'eau joue un rôle primordial dans les activités de plaisance; toute variation qualitative ou quantitative de l'eau provoquée par le changement climatique les menacerait donc directement. En outre, l'élévation du niveau de la mer affectera les communautés côtières qui tirent leurs revenus des activités de loisir. Les plages, les milieux humides marins, le milieu bâti et l'approvisionnement en eau potable en subiraient également les répercussions. Les variations du niveau d'eau dans les Grands Lacs auraient une incidence sur les marinas et les activités de plaisance.

**Zones naturelles** : Le changement climatique pourrait altérer les écosystèmes prisés par les amateurs de plein air. Les répercussions se situeront dans la quantité de terrains consacrée aux parcs, sur la taille de ceux-ci, le choix et la désignation des parcs et la délimitation des zones. Le changement climatique aura également une incidence sur les méthodes de gestion, comme la teneur des programmes d'interprétation, la protection des espèces en péril et la définition des activités récréatives appropriées.

**Hiver** : Les régions où l'on pratique le ski alpin auront à s'adapter à des quantités de neige réduites et moins certaines, et au raccourcissement que cela pourrait imposer à la saison de ski dans de nombreuses régions. Certaines devront recourir davantage à la neige artificielle pour que la saison soit d'une durée raisonnable. D'autres activités hivernales qui dépendent de la couverture de neige ou de glace pourraient en subir les contrecoups, comme le ski de randonnée, la motoneige, la pêche sur glace, etc.

**Été** : Le réchauffement projeté pourrait entraîner un allongement de la saison de sports d'été dans tout le Canada (p. ex., au Québec, la saison de golf pourrait durer jusqu'à 3 ou 4 semaines de plus). Selon plusieurs scénarios de changement climatique, la période propice au camping en Ontario bénéficierait parfois de 40 jours de plus. Les activités de chasse et d'ornithologie seront également affectées par le déplacement d'espèces sauvages causé par la perte de leur habitat ou par l'augmentation du nombre d'espèces concurrentes.

## ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Plusieurs éléments doivent être gardés à l'esprit quand on examine jusqu'à quel point l'on peut se fier aux mesures d'adaptation. D'abord, l'adaptation s'accompagne toujours de coûts et sa mise en œuvre va donc mobiliser des ressources naturelles et financières déjà rares, et qui auraient pu être consacrées à d'autres activités productives. Les Canadiens dépensent des milliards de dollars par année pour s'adapter au climat actuel et à sa variabilité. De plus, notre climat engendre une

multitude de perturbations sociales et environnementales auxquelles nous devons également nous adapter et dont les « coûts » ne sont pas entièrement définis. S'adapter à un climat en évolution entraînera aussi des « coûts » pour les Canadiens, mais déterminer ces coûts demeure une tâche exceptionnellement difficile. On pense, toutefois, que l'augmentation de ces coûts éventuels pourrait être réduite si davantage de renseignements sur les changements, sur leurs impacts et sur les mesures d'adaptation viables étaient disponibles à temps (occasions proactives) et s'il existait des mécanismes financiers et institutionnels de soutien et d'information.

Deuxièmement, plus le changement climatique sera rapide, plus les coûts économiques et sociaux de l'adaptation devraient augmenter. Troisièmement, bien qu'il y ait de nombreuses possibilités d'adaptation technologique et comportementale, il demeure des incertitudes quant aux éventuels obstacles et limites à leur mise en application. Quatrièmement, il pèse aussi des incertitudes sur l'efficacité et les effets secondaires possibles de certaines stratégies d'adaptation. Cinquièmement, au cours du prochain siècle, outre le changement climatique, les Canadiens devront faire face à de grands changements touchant la technologie, l'économie, les marchés, les produits et la démographie. Nos réponses d'adaptation devraient être adoptées dans une optique d'intégration et, au lieu de viser un seul changement, prendre en compte la totalité des changements possibles.

Enfin, il existe peu d'information sur les différentes mesures d'adaptation et, lorsqu'elle est disponible, elle est peu fiable. Si l'on veut évaluer la capacité d'adaptation d'une région ou d'un secteur donné, il est essentiel d'effectuer des recherches rigoureuses sur le niveau d'acceptabilité sociale et culturelle et sur les mécanismes financiers et institutionnels nécessaires pour faire face au changement climatique.

***Eau***

Les Canadiens dépensent près de un milliard de dollars par an pour adapter le secteur des ressources en eau aux conditions climatiques actuelles. Ces mesures d'adaptation comprennent la construction de barrages, de réseaux d'égout, de fossés de drainage, d'ouvrages de protection contre les crues, etc. On prévoit que les coûts liés aux mesures d'adaptation augmenteront considérablement.

En plus d'augmenter la capacité de l'infrastructure actuelle, on peut mettre en place d'autres méthodes, notamment avoir recours aux polices d'assurances, à l'aide gouvernementale et à l'aide aux sinistrés pour la compensation des dommages; demander aux individus d'assumer leurs propres pertes financières; mieux informer la population sur les impacts du changement climatique et sur les mesures d'adaptation; mieux connaître les liens qui existent entre l'eau et le climat à l'aide de travaux ultérieurs de recherche dans certains secteurs, comme l'évapotranspiration, le pergélisol, les eaux souterraines, les régions et les petits lacs nordiques; définir des approches non structurales afin de réduire les impacts, par exemple, en pratiquant une gestion intégrée des ressources hydriques, en favorisant la planification des sous-bassins versants; en maintenant et en améliorant les programmes de conservation de l'eau (p. ex., changement de comportement); en améliorant les processus de zonage et d'émission de permis de construction; en mettant en place des mesures de gestion de la demande en eau (p. ex., fixer le coût d'utilisation de l'eau) et en utilisant des méthodes structurelles, comme la lutte contre la pollution; l'amélioration des réseaux

municipaux d'approvisionnement en eau; la modification mineure de la construction des infrastructures (p. ex., en y intégrant les scénarios de changement climatique); la mise en place d'un plus grand nombre de mesures préventives en cas d'inondations; la construction de nouveaux barrages, digues et réservoirs; le maintien et l'amélioration des programmes de conservation de l'eau (p. ex., réducteur de volume d'eau dans les toilettes et modification des codes du bâtiment) et le choix de tracés de chenaux naturels.

***Écosystèmes, biodiversité, espèces sauvages et milieux humides***

Il existe de nombreuses incertitudes quant à la façon dont les écosystèmes non aménagés donnés réagiront au changement climatique, surtout si son ampleur se situe dans le haut des plages prévues par les modèles actuels. On ne peut cependant affirmer avec certitude si la structure et la fonction des futures communautés écologiques au Canada seront les mêmes sous le climat projeté. La population pourrait tenter de minimiser les effets négatifs du changement climatique sur les écosystèmes, et ceux d'autres stress liés à l'activité humaine, comme l'acidification et le transport à grande distance des substances toxiques.

Il sera nécessaire d'exercer une gestion plus rigoureuse si les populations d'espèces sauvages diminuent abruptement et deviennent ainsi menacées d'extinction. Parmi les mesures d'adaptation à considérer figurent la désignation d'un plus grand nombre de zones protégées couvrant davantage de territoire et reliées par des corridors; la mise en œuvre de programmes de transplantation; la reproduction sélective des éléments des populations qui sont le mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques et le stockage hors place du matériel génétique, ce qui accentuerait les activités d'« écologie de sauvetage ». Les autres mesures d'adaptation pourraient comprendre : la protection des futures zones importantes, comme les régions plus susceptibles d'être inondées, et la gestion à l'échelle du paysage, de sorte que les activités humaines comme la foresterie et l'agriculture seraient intégrées aux considérations générales liées à l'habitat.

***Agriculture***

L'évaluation des stratégies d'adaptation a été surtout ciblée sur les Prairies ou sur les limites actuelles imposées par le climat à l'agriculture (sols non appropriés à certaines cultures). Les mesures d'adaptation préconisées au niveau local ou des fermes sont : opter pour des cultivars différents ou introduire des cultures spécialisées de plus grande valeur, améliorer l'utilisation de l'irrigation et diversifier les activités agricoles afin d'y inclure l'élevage du bétail. À l'échelle régionale ou nationale, on pourrait envisager de modifier le système d'aide gouvernementale afin de mieux refléter les risques liés au climat actuel, de lier les programmes d'assistance-récolte à la conservation des sols et d'améliorer les programmes d'éducation dans les milieux ruraux afin de promouvoir des pratiques agricoles favorisant l'utilisation durable des sols.

***Foresterie***

L'adaptabilité du secteur forestier dépend de la capacité et de la volonté de l'industrie de s'adapter aux essences qui deviendront prédominantes sous le nouveau climat, de récupérer les peuplements mourants, de reboiser avec des essences mieux adaptées aux nouvelles conditions

climatiques et de déplacer ses activités vers des régions où les ressources sont plus abondantes. La confiance en la capacité d'adaptation de l'industrie tient, en partie, au fait que les impacts futurs ne seront qu'un prolongement des conditions auxquelles nous faisons face actuellement, donc les mêmes problèmes, seuls le lieu et la portée seront différents. De plus, outre les coûts sociaux et environnementaux, l'adaptation devra prendre en compte de grandes questions comme : augmenter les paysages forestiers afin d'en réduire la parcellisation, gérer les peuplements et les paysages pour diminuer les feux de cimes et de grandes superficies, et trouver des façons de maintenir les corridors migratoires.

***Pêches***

Les options d'adaptation du secteur des pêches qui répondraient au changement climatique ont pour la plupart déjà été utilisées face à d'autres changements du milieu ou de l'utilisation; chacune a ses limites, en particulier le fait que l'on suppose que le changement climatique se fera de manière régulière. Les facteurs à prendre en compte dans l'élaboration de ces options sont donc les suivants : reconnaissance de la possibilité d'une accélération du changement et du potentiel de surprises; nécessité de liens étroits avec les objectifs d'utilisation durable des écosystèmes; nécessité d'adopter des stratégies au niveau local pour minimiser les impacts négatifs et maximiser les gains en vue d'un gain net global; élaboration de régimes de gestion robustes qui établissent un équilibre entre le court et le long terme; stratégie de type « sans regrets » basée sur les écosystèmes dans laquelle tous les stress sont réduits.

***Énergie***

L'industrie de l'énergie s'est toujours assez bien adaptée aux variations de l'offre et de la demande et elle a su s'attaquer à de nouveaux défis, comme la recherche de pétrole et de gaz sous des eaux recouvertes de glace, grâce à des technologies innovatrices. On considère donc que le secteur de l'énergie a une forte capacité d'adaptation et qu'il saura faire face au changement climatique, surtout si celui-ci se produit lentement et que l'industrie n'est pas confrontée à des surprises. Parmi les mesures d'adaptation envisagées figurent la modification des critères de conception, l'économie d'énergie et le recours à d'autres sources d'énergie (solaire et éolienne).

***Milieu bâti***

Dans de nombreux cas existants, la marge actuelle de sécurité intégrée dans le Code national du bâtiment du Canada sera suffisante pour maintenir des structures sécuritaires et économiques, sous réserve de la qualité de l'exécution et des matériaux. Des mesures visant à améliorer et/ou à déplacer des installations et des ouvrages (comme les systèmes de régulation des crues des cours d'eau), bien que coûteuses, pourraient être nécessaires. Afin d'éviter de nouveaux développements dans les régions susceptibles de subir des dommages, un renforcement des règlements d'urbanisme sur l'utilisation des terres devrait être considéré. Pour toute nouvelle construction, les critères de conception et le choix du site devraient tenir compte des conditions climatiques. On devrait, en particulier, mettre l'accent sur la sécurité des structures soumises à des phénomènes extrêmes, sur l'économie d'énergie et sur la réduction des coûts des immeubles et des ouvrages sur leur durée de vie. Pour faire face à l'érosion des côtes qu'entraîne l'élévation du

niveau de la mer, on devrait, dans l'élaboration de la stratégie d'adaptation, intégrer une gestion des zones côtières qui allie ingénierie et solutions naturelles.

***Assurances***

Des activités de modification du temps, comme l'ensemencement des nuages dans les Prairies, ont été financées par l'industrie pour réduire les dommages causés par la grêle et le paiement de réclamations par les compagnies d'assurances. Des fonds ont été alloués à des travaux de recherche sur l'amélioration des matériaux et techniques de construction et à des activités de lobbying visant la modification du Code national du bâtiment pour réduire les risques. De leur côté, les compagnies d'assurances pourraient changer les clauses et les conditions des couvertures d'assurances, limiter, par exemple, le nombre de polices et la protection assurable en dollars dans une région géographique donnée, réduire les limites des polices d'assurances, augmenter les franchises, modifier les modalités de règlement, les risques couverts, se retirer complètement de ce segment du marché ou faire assurer les risques par la réassurance.

***Santé humaine***

L'acclimatation physiologique progressive des populations, l'utilisation de la climatisation et la mise en place d'un système adéquat d'avertissement de vague de chaleur pourraient, dans l'avenir, réduire la morbidité et la mortalité dues à la chaleur. Bien que le changement climatique puisse entraîner la migration vers le nord de divers vecteurs, comme ceux de la malaria, le système des soins de santé canadien pourrait être en mesure de faire face à une augmentation importante des cas de maladies.

***Loisirs et tourisme***

Les adeptes d'activités de sports et de loisirs savent s'adapter au changement climatique, puisqu'ils s'adonnent à leurs activités par choix; même si ce choix n'est pas sans contraintes, ils savent faire preuve de souplesse. Leurs activités de loisirs et les lieux où ils les pratiquent pourraient être changés ou déplacés sans pour autant que la qualité en soit altérée.

L'industrie pourrait s'adapter en diversifiant ses activités de façon à ce que les sommes investies dans l'achat de propriétés ou les infrastructures génèrent des profits tout au long de l'année. Par exemple, en construisant des glissades d'eau, on pourrait utiliser les télésièges en été; on pourrait ouvrir des terrains de golf, des sentiers pédestres et des piscines, construire des habitations en copropriété et ajouter des installations multifonctionnelles (combinant des centres de conférence et des activités de loisirs) pour attirer la clientèle toute l'année. Ces mesures élimineraient l'aspect saisonnier des entreprises de loisirs et créeraient des emplois plus stables, entraînant ainsi un renforcement des communautés environnantes, et tireraient profit d'un éventuel allongement de la saison estivale.

***Transports***

Le climat est un facteur important dans le secteur des transports. L'industrie du transport, les organismes gouvernementaux et le public en général consacrent énormément d'efforts et d'argent

(des centaines de millions de dollars chaque année) pour réduire le risque de retards ou d'accidents lié au mauvais temps. Il n'existe cependant pas d'inventaire exhaustif de ces diverses mesures d'adaptation, et l'efficacité de nombre d'elles est en grande partie inconnue.

## LACUNES DES RECHERCHES ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

**Aspect géographique** : Effectuer des études sur les régions pour lesquelles on manque le plus de renseignements comme l'est de l'Arctique, l'intérieur de la Colombie-Britannique, le centre des Prairies, le nord de l'Ontario et le Labrador, ainsi que sur les régions urbaines et leurs infrastructures.

**Eau** : Générer des scénarios plus plausibles sur les phénomènes extrêmes pour analyser la sensibilité de l'hydrologie et des bassins fluviaux; améliorer l'évaluation du taux d'évapotranspiration en fonction des changements imposés aux végétaux par l'évolution du climat; procéder à des analyses empiriques des processus climatologiques et écologiques en haute montagne pour améliorer notre connaissance des impacts du changement climatique sur les processus d'accumulation de neige; évaluer les impacts d'El Niño et de La Niña sur le ruissellement et les débits des cours d'eau au Canada; évaluer les conséquences du changement climatique sur la qualité de l'eau, les petits lacs, la glace de lac et les eaux souterraines au Canada; intensifier la recherche sur l'utilisation des ressources en eau et sur les mesures d'adaptation dans les secteurs de l'agriculture, des pêches, des loisirs et du tourisme, de l'hydroélectricité, de la navigation commerciale, de l'approvisionnement des municipalités en eau et de la santé humaine; trouver des façons d'inclure l'information sur le changement climatique dans la planification et la gestion à long terme des ressources hydriques.

**Écosystèmes, biodiversité et espèces sauvages** : Poursuivre et prolonger les programmes pluridisciplinaires à long terme de surveillance et de recherche sur les tendances et conditions fondamentales de l'écologie au Canada; améliorer notre compréhension des changements de paramètres physiques de base, comme la température de l'eau, sa salinité et les courants marins; augmenter notre connaissance des cycles biologiques des poissons et d'autres organismes marins afin de comprendre les impacts du changement et de la variabilité climatiques; mener des expériences à long terme sur les effets d'un accroissement des concentrations de $CO_2$ sur des écosystèmes comme la prairie, la toundra et les forêts; poursuivre les études sur les relations végétaux-herbivores et autres interactions trophiques dans des conditions de $CO_2$ accru; améliorer notre compréhension des mécanismes régissant les cycles biogéochimiques et la productivité biologique; déterminer les effets des rétroactions des sols et des interactions biologiques entre les différents organismes sur les effets écophysiologiques directs des changements des variables climatiques.; améliorer notre connaissance des conditions naturelles de la diversité génétique au Canada; déterminer la diversité des microbes du sol et des plantes non vasculaires et leur sensibilité au changement climatique; mener des études d'intégration sur les comportements au niveau des écosystèmes et améliorer notre compréhension des effets globaux du climat sur la dynamique des populations d'espèces sauvages.

**Milieux humides** : Il demeure d'importantes lacunes dans notre compréhension des milieux humides et de leur réaction probable au changement climatique. Les milieux humides n'ont pas encore été aussi bien modélisés que les autres écosystèmes et sont souvent exclus des modèles globaux de l'effet du changement climatique. Il faudra donc effectuer des recherches sur les processus hydrogéochimiques en jeu dans les milieux humides et sur les interrelations entre les niveaux d'eau et les réponses de ces milieux en fonction de la superficie et de la végétation. On aura besoin de simulations des modifications des habitats liées au changement climatique pour comprendre les changements potentiels dans le nombre et la qualité des milieux humides, et leurs répercussions sur la biodiversité et la production d'oiseaux aquatiques. Il faudra entreprendre des travaux pour déterminer la superficie, la profondeur et le type des tourbières, ainsi que leur capacité de stockage du carbone et leurs réponses au changement climatique, surtout en ce qui concerne le méthane et le dioxyde de carbone. L'utilisation des modèles du climat en conjonction avec d'autres modèles, comme ceux des précipitations, du ruissellement et des eaux souterraines, aiderait à estimer les conséquences du changement climatique pour les milieux humides du Canada, ainsi que leurs fonctions et les valeurs qu'ils fournissent.

**Agriculture** : Uniformiser la recherche en utilisant un ensemble commun de modèles climatiques et de productivité des récoltes pour toutes les régions du Canada afin de produire des résultats plus faciles à comparer quant aux impacts du changement climatique sur les rendements des cultures; procéder à d'autres études sur les impacts du changement climatique à divers niveaux du secteur agricole (p. ex., ferme, région, nation) et pour différentes activités liées aux variétés et au bétail; mieux comprendre l'adaptation des fermes et des pratiques agricoles en intégrant aux scénarios de changement climatique les indicateurs agroclimatiques que les exploitants agricoles jugent importants dans la prise de décisions et déterminer les répercussions du changement climatique sur le secteur agricole canadien dans le contexte de l'évolution des marchés mondiaux des produits agricoles.

**Pêches** : Mener des études comparatives sur les écosystèmes aquatiques et les populations de poissons à diverses latitudes et altitudes; améliorer notre compréhension des facteurs qui déterminent la distribution des poissons; accroître nos connaissances des cycles biologiques des salmonidés qui sont particulièrement vulnérables au changement climatique; surveiller les réponses biologiques et les indicateurs écologiques du climat dans des écosystèmes aquatiques où se pratique une pêche importante; améliorer notre compréhension des liens entre le climat et les variations de la productivité marine; améliorer notre compréhension du rôle des éléments nutritifs, de la lumière, de la température et du mélange dans les écosystèmes d'eaux douces sur la productivité du poisson; améliorer nos connaissances de base sur l'évolution biologique et les niveaux de productivité du biote des milieux marins et d'eau douce de l'Arctique; évaluer les impacts sur les estuaires de l'élévation du niveau de la mer et de la diminution de l'apport des cours d'eau; améliorer les évaluations des capacités des écosystèmes et des ressources halieutiques; améliorer les mesures et l'évaluation des pêches autochtones et de subsistance.

**Foresterie** : Améliorer nos connaissances sur les liens entre le climat et la croissance des arbres afin de mieux prévoir les seuils climatiques physiologiques pour les arbres matures; accroître nos connaissances sur les cycles du carbone, du méthane et de l'azote et sur les interactions entre les processus physiques (albédo de la surface, profil des températures, etc.) et biologiques (cycle des

éléments nutritifs, décomposition, etc.) des écosystèmes des sols afin d'améliorer les modèles biologiques actuels; uniformiser et améliorer les activités de surveillance pour y inclure des données sur la composition en espèces, la vitesse et les sites de la déforestation, améliorer les mesures des interactions hydrologiques; la croissance, la mortalité et les perturbations de la biomasse des forêts amélioreront les modèles de la végétation et de la fixation du carbone; améliorer l'interaction entre les modèles climatiques et biologiques en établissant des liens à l'aide de processus biochimiques pour mieux simuler les cycles du carbone et de l'azote; créer des modèles qui incluraient des facteurs non climatiques pour déterminer le rôle que jouera le changement climatique dans les futures pratiques de gestion des forêts et mettre au point des modèles des écotones et de leurs réponses au changement climatique afin de définir la phase de transition du changement climatique et les changements continus et composés des conditions atmosphériques et de leur relation dynamique avec les processus écologiques.

**Énergie** : Améliorer notre connaissance de la distribution régionale et de l'intensité des changements climatiques, car la diversité du climat canadien a des impacts directs sur la façon dont l'énergie est produite, transportée et utilisée; évaluer la sensibilité de l'offre et de la demande d'énergie au changement climatique; cibler les recherches davantage sur les mesures d'adaptation que sur les mesures d'atténuation dans le secteur de l'énergie; améliorer les estimations des coûts des impacts et des mesures d'adaptation; adopter une démarche plus intégrée dans les travaux de recherche pour aborder les questions technologiques, sociales et économiques entre les secteurs.

**Transports** : Mener des études d'impact plus détaillées sur les répercussions du changement climatique pour les principaux modes de transport au Canada (automobile, camion, train, avion, bateau); approfondir la question des phénomènes extrêmes et de leurs impacts sur la sécurité du transport; déterminer les conséquences des changements causés par le climat dans les économies régionales et les établissements sur la demande de transport; et inventorier/évaluer les diverses mesures d'adaptation applicables dans le secteur des transports.

**Milieu bâti** : Améliorer la collecte et l'analyse des données climatiques pertinentes à l'industrie de la construction, notamment la pluie poussée par les vents, le rayonnement solaire, les charges de neige et les phénomènes météorologiques extrêmes; évaluer les impacts du changement climatique sur l'efficacité énergétique (isolation) et l'utilisation de l'énergie (air climatisé, chauffage) dans les immeubles; améliorer notre compréhension des impacts du changement climatique sur le pergélisol et sur les fondations des édifices, les infrastructures et sur les constructions actuelles et futures; améliorer nos connaissances des phénomènes météorologiques extrêmes afin de réduire les dommages en concevant des constructions plus résistantes et en évitant les régions à risque élevé.

**Assurances** : Améliorer notre connaissance des effets possibles du changement climatique sur l'industrie de l'assurance des biens et de l'assurance contre les accidents au Canada; améliorer les prévisions quant aux effets du changement climatique sur le nombre de désastres météorologiques, dont les glissements de terrain et les avalanches qui les accompagnent; améliorer les modèles afin de déterminer les impacts du changement climatique (température plus élevée et temps violent) sur le taux de mortalité au Canada.

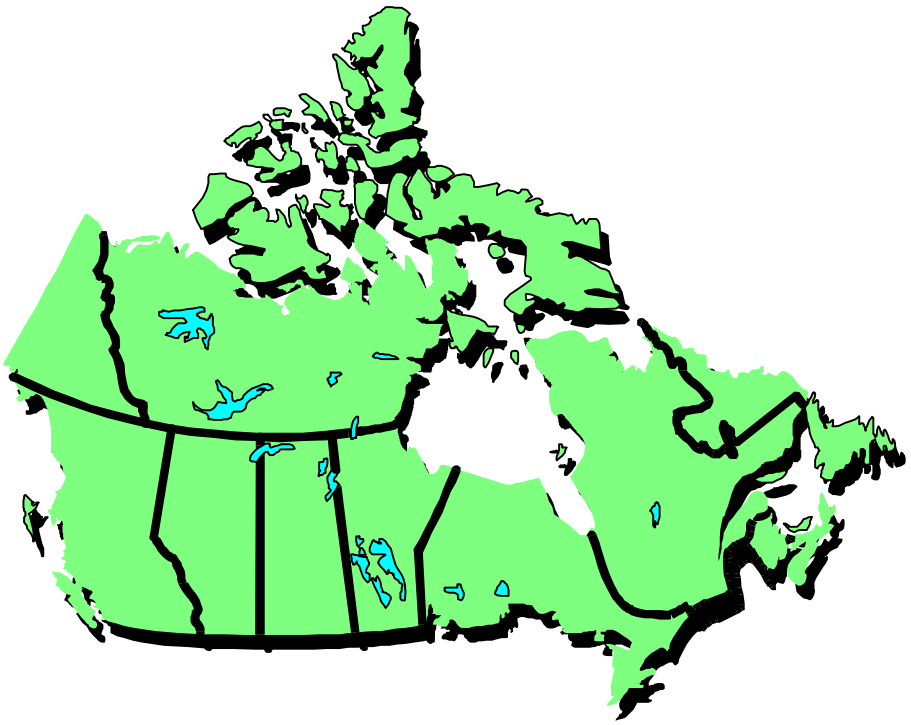
**Santé humaine** : Améliorer la collecte de données sur les tendances géographiques de la distribution et de l'abondance des insectes vecteurs de maladie au Canada; améliorer la surveillance des populations d'anophèles, vecteurs de la malaria, et la migration de la souris sylvestre, vecteur de l'hantavirus; déterminer les impacts du changement climatique sur le comportement humain, comme l'utilisation de l'air climatisé et l'augmentation des actes d'agression.

**Loisirs et tourisme** : Mesurer les répercussions du changement climatique sur le choix et la gestion des zones naturelles; évaluer les façons de diversifier les installations de loisirs afin de réduire la vulnérabilité de l'industrie; évaluer la perception des amateurs de loisirs potentiels face aux nouvelles activités proposées; évaluer l'effet des phénomènes météorologiques extrêmes sur les nouvelles activités proposées; évaluer l'importance relative des variables climatiques et non climatiques sur le lieu et le type des activités de loisirs; évaluer la durée actuelle des saisons d'exploitation, leur variabilité temporelle et spatiale et la viabilité économique des activités de loisirs qui en découle.

# CHAPITRE UN

# CHANGEMENT ET VARIABILITÉ CLIMATIQUES : IMPACTS SUR L'EAU AU CANADA

*Nancy Hofmann, Linda Mortsch[1], Simon Donner, Kirsty Duncan, Reid Kreutzwiser,Suren Kulshreshtha, Andrew Piggott, Shirley Schellenberg, Bill Schertzer et Michel Slivitzky*



1. Groupe de recherche en adaptation environnementale, Environnement Canada, Faculté des études environnementales, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.) N2L 3G1, téléphone : (519) 888-4567 poste 5495, télécopieur : (519) 746-2031, courriel : Linda.Mortsch@ec.gc.ca

## RÉSUMÉ

L'eau est essentielle à tous les êtres vivants. Dans le cas des humains, elle joue également un rôle central dans de nombreuses fonctions économiques et sociétales dont les services municipaux, les activités commerciales et récréatives, la navigation, la production d'hydroélectricité et l'agriculture. Dans nombre de régions du Canada, l'utilisation de cette ressource crée des conflits (qui seront exacerbés par le changement climatique). Des recommandations ont été faites par des chercheurs pour amener les gouvernements à améliorer la gestion actuelle de l'eau. Les impacts du changement climatique, tant positifs que négatifs, sur les ressources en eau au Canada sont extrêmement importants.

Le présent résumé traite des points suivants : 1) impacts hydrologiques, 2) impacts sur l'utilisation de l'eau, 3) réactions d'adaptation possibles et 4) points sur lesquels des travaux additionnels de recherche sont requis.

***Impacts hydrologiques***

Précipitations
- augmentation des précipitations annuelles dans la plupart des régions
- modification de la forme des précipitations saisonnières (p. ex., moins de neige et plus de pluie en hiver)
- précipitations locales plus intenses

Évaporation/Évapotranspiration
- augmentation de l'évaporation/évapotranspiration par suite de l'élévation de la température de l'air

Ruissellement/Écoulement fluvial
- augmentations et diminutions du ruissellement/écoulement fluvial au Canada selon la région et le scénario de changement climatique considérés
- ruissellement nival plus hâtif et ruissellement maximal plus faible

Niveau d'eau des lacs
- niveau d'eau plus bas dans les Grands Lacs
- niveaux saisonniers maximaux plus hâtifs et moins importants

Structure thermique des lacs
- des températures plus élevées de l'eau des lacs pourraient perturber les régimes de stratification thermique et nuire au renouvellement de l'eau

Nappes souterraines
- l'alimentation et le niveau des nappes souterraines baisseront vraisemblablement
- le débit de base des rivières pourrait diminuer, ce qui occasionnerait des impacts négatifs sur la qualité des eaux de surface

Humidité du sol
- diminution de l'humidité du sol dans le sud du Canada; déficits hydriques au cours de l'été dans le sud de l'Ontario et en Saskatchewan

Couverture glacielle
- on prévoit que la couverture glacielle diminuera ou disparaîtra sur les Grands Lacs et sur les lacs plus petits
- durée moindre de la couverture glacielle

Pergélisol
- déplacement vers le nord et réduction de la superficie du pergélisol

Variabilité hydrologique
- la variabilité hydrologique pourrait augmenter et entraîner un nombre accru d'événements extrêmes, comme des inondations majeures, des sécheresses estivales plus longues

Qualité de l'eau
- des températures de l'eau plus élevées et un ruissellement moins important pourraient conduire à une réduction de la qualité de l'eau dans les lacs et les rivières

Milieux humides
- les niveaux d'eau plus bas pourraient mener à une réduction de la superficie des milieux humides et à leur perturbation
- qualité de l'eau réduite

***Impacts sur l'utilisation de l'eau***

Ces impacts hydrologiques ont des répercussions importantes sur le milieu naturel et les différents usages de l'eau par les humains.

Agriculture

Les impacts du changement climatique sur l'agriculture seront tant positifs que négatifs. Certaines régions du pays bénéficieront d'une saison de croissance plus longue en raison de températures plus élevées, mais l'évapotranspiration accrue et l'humidité du sol moindre pourraient réduire les rendements dans de nombreuses régions. Le recours à l'irrigation, en particulier dans les Prairies, augmentera vraisemblablement, de même que les conflits de priorité entourant l'usage de l'eau dans les communautés rurales.

Pêches

Le changement climatique influera tant sur la quantité que la qualité de l'eau, et aura des répercussions importantes sur l'habitat du poisson. Du point de vue de la quantité d'eau, une baisse du niveau des lacs et des débits pourrait en effet réduire l'habitat disponible pour le poisson. Les changements de débit des cours d'eau pourraient nuire à la fraye. Du point de vue de la qualité de l'eau, la température plus élevée de l'eau et une réduction de l'oxygène dissous pourraient perturber l'habitat de nombreuses espèces. Par exemple, les espèces qui vivent en eaux froides pourraient être remplacées par des espèces d'eaux chaudes.

Loisirs et tourisme
Des niveaux d'eau plus bas pourraient assécher les marinas, exposer les plages et réduire l'utilisation récréative des plans d'eau (p. ex., canotage). Les loisirs d'hiver comme le ski, la pêche sur la glace et la motoneige pourraient être perturbés par des chutes de neige et une couverture glacielle moins importantes.

Énergie hydroélectrique
La baisse du niveau des Grands Lacs entraînera une réduction des capacités de production d'énergie hydroélectrique et une augmentation des coûts.

Santé
Les événements hydrologiques extrêmes présentent des dangers pour la santé humaine. Des inondations ou des pluies intenses peuvent faire déborder les égouts combinés d'eau de pluie et d'eaux usées, et, ainsi, contaminer l'eau (p. ex., on a relevé des cas de *cryptosporidiose* causés par de l'eau potable contaminée). De la même manière, des quantités excessives de précipitations créent des aires de reproduction pour les insectes et les rongeurs porteurs de maladies.

Navigation
Le changement climatique pourrait causer une diminution du niveau d'eau des Grands Lacs, de sorte que les navires devront transporter des cargaisons moins importantes et faire un plus grand nombre de voyages pour déplacer la même quantité de fret. La viabilité de certains ports pourrait également être remise en question. Le changement climatique pourrait toutefois être bénéfique pour la navigation en allongeant la saison de navigation. Des températures hivernales plus élevées limiteront l'importance de la couverture glacielle dans les voies de navigation.

Approvisionnement et consommation en eau des villes
Des températures de l'air plus élevées mèneront à une augmentation de la consommation en eau des villes. Les activités d'arrosage des pelouses, en particulier, augmenteront. Dans l'éventualité d'un changement climatique, la consommation en eau augmentera vraisemblablement tandis que l'écoulement fluvial diminuera; l'approvisionnement en eau risque de ce fait de ne pas être suffisant pour répondre à la demande.

***Adaptation***

Les Canadiens ont dépensé près de un milliard de dollars dans le secteur des ressources en eau pour s'adapter aux conditions et à la variation climatiques existantes. Cette adaptation inclut la construction de barrages, d'égouts, de fossés de drainage et autres ouvrages similaires. L'adaptation au changement climatique augmentera vraisemblablement ces dépenses. Les méthodes d'adaptation incluent notamment les suivantes :

Répartition des pertes
- assurance
- subventions gouvernementales et aide aux sinistrés

Absorption des pertes
- « chacun est laissé à lui-même »

Recherche

- meilleure connaissance des liens entre le climat et l'eau, p. ex., l'évapotranspiration, le pergélisol, les eaux souterraines, les régions nordiques et les lacs de faible étendue

Éducation

- quant aux impacts : sensibilisation et participation du public
- quant aux modalités d'adaptation : conservation de l'eau

Modification des événements, prévention des effets, évitement des impacts

*Approches non structurelles* : Celles-ci incluent : gestion intégrée des ressources en eau; aménagement des sous-bassins; programmes de conservation de l'eau (p. ex., changement de comportement); zonage et permis de construction; et gestion de la demande ou tarification de l'eau.

*Approches structurelles* : Celles-ci incluent : réduction de la pollution; augmentation de l'infrastructure d'approvisionnement en eau des villes; incorporation des scénarios de changement climatique à la conception des ouvrages de prévention des inondations; nouveaux barrages, digues et réservoirs; amélioration des programmes de conservation de l'eau (p. ex., réducteurs d'eau dans les toilettes, changements aux codes du bâtiment); et aménagement des chenaux.

***Lacunes dans la recherche***

On trouvera ci-dessous certains des points sur lesquels devront porter les travaux de recherche additionnels, en vue d'améliorer la compréhension des impacts du changement climatique sur l'hydrologie, les ressources en eau et l'adaptation.

Hydrologie

- Les modifications du climat qui altèrent la fréquence et l'ampleur des événements extrêmes ont plus d'impacts du point de vue de l'hydrologie, de la gestion des ressources en eau et de l'adaptation que celles des moyennes. À l'heure actuelle, la résolution spatiale des MCG ne permet pas l'élaboration des scénarios de précipitations extrêmes d'une importance critique pour la génération des inondations extrêmes et les impacts connexes. Des scénarios d'événements extrêmes sont nécessaires à l'analyse hydrologique et à l'analyse de sensibilité des bassins fluviaux.
- Il n'existe pas d'études d'impact canadiennes appliquant les MCG les plus récents à l'analyse des effets du refroidissement par les aérosols. Peu d'études sont basées sur l'utilisation des scénarios de MCG aux états transitoires.
- On manque d'études de l'impact des scénarios de changement climatique sur les bassins hydrographiques pour l'est de l'Arctique et les provinces de l'Atlantique.
- Des évaluations plus empiriques des processus climatologiques et écologiques dans les régions montagneuses sont nécessaires, car les modifications possibles de la température de l'air, et les augmentations et (ou) diminutions de l'accumulation de neige dues au changement climatique auront des répercussions importantes pour l'hydrologie et les ressources en eau.

- Nous avons besoin de meilleures méthodes d'estimation de l'évapotranspiration pour répondre aux questions touchant les impacts du changement climatique sur la végétation, la réaction de cette dernière à l'augmentation du $CO_2$ et les incidences sur les ressources en eau. Certains modèles d'évapotranspiration incluent des indices foliaires et des variables de résistance stomatique dont la modification permet de simuler des réactions nouvelles/différentes de la végétation au changement climatique.
- Il n'existe pas d'études canadiennes qui fassent le lien entre la variabilité et les tendances du ruissellement et de l'écoulement fluvial, et les phénomènes de l'oscillation australe El Niño (ou La Niña).
- Les relations empiriques entre la température, les précipitations et le ruissellement, et (ou) le bilan hydrologique ont été les principales méthodes appliquées à l'évaluation des impacts hydrologiques du changement climatique; seulement quelques études ont utilisé des modèles conceptuels ou des modèles liés aux processus. Les impacts sont le plus souvent mentionnés sous la forme de changements annuels et mensuels insuffisamment détaillés pour permettre la gestion et la planification des ressources en eau.
- Peu de recherches ont été effectuées sur les impacts du changement climatique sur les petits lacs.
- On sait mal comment un changement climatique influerait sur la fréquence ou la variabilité des réactions hydrodynamiques des lacs ou comment il agirait sur les composants de l'écosystème.
- Les projections selon lesquelles des climats plus chauds pourraient entraîner une fréquence moindre de renouvellement de la tranche d'eau sont préoccupantes du point de vue de la qualité de l'eau et de l'habitat. Sous les latitudes plus chaudes, les périodes de stratification pourront être accrues. Dans les régions plus froides, la fréquence de renversement des eaux augmentera vraisemblablement. Cette situation pourrait avoir des conséquences environnementales importantes, du fait que les renouvellements qui se produisent au printemps et à l'automne sont importants pour la distribution des substances nutritives et l'oxygénation de l'eau des lacs. Les processus et répercussions doivent être explorés davantage.
- L'impact du changement climatique sur la couverture glacielle des lacs au Canada a fait l'objet de peu de travaux de modélisation. La recherche limitée sur le couvert de glace au Canada est souvent attribuée au manque de données consolidées nationalement. On peut utiliser certains lacs comme indicateurs climatiques régionaux, ou recourir à la télédétection pour repérer le changement climatique à l'échelle nationale ou mondiale.
- Les ressources en eau souterraine au Canada sont mal connues, et les impacts du changement climatique sur la quantité et la qualité des eaux souterraines plus encore. Il faudra effectuer des travaux considérables pour comprendre ces impacts possibles sur les ressources en eau souterraine, comment ils peuvent se traduire en préoccupations sociétales, quelles stratégies d'adaptation peuvent être appliquées en réponse à ces préoccupations et comment elles peuvent être mises en œuvre.
- Les impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau ont été peu étudiés. La recherche a surtout porté sur les effets de la température et de l'oxygène dissous dans les lacs de grande étendue, tandis que d'autres paramètres de la qualité de l'eau, comme les substances nutritives et les substances toxiques, n'ont pas été étudiés. Les impacts sur les cours d'eau et sur les petits lacs intérieurs n'ont pas non plus été évalués. Il faudra pousser la recherche plus avant pour déterminer l'impact des changements dans les précipitations,

l'évapotranspiration et le ruissellement sur la limnologie physique, la chimie de l'eau et la biologie des lacs.

Utilisation des ressources en eau et adaptation

Nombre des résultats indiqués dans les études d'impact sont basés sur le jugement des experts. Si leur jugement joue un rôle important dans la détermination des impacts possibles, il faudra des études additionnelles pour fournir une indication empirique des impacts du changement climatique.

*Agriculture*

- Il faudra plus de recherches sur les méthodes de conservation de l'eau, y compris une utilisation réduite de l'irrigation et l'amélioration des capacités de rétention de l'eau à la ferme.
- Il faudra prendre en considération le changement climatique dans l'élaboration des politiques agricoles et la planification.

*Pêches*

- Les études effectuées ont porté sur les Grands Lacs et la Colombie-Britannique; il en existe peu sur les pêches dans le Nord, les eaux intérieures et les petits lacs.
- Une surveillance accrue des conditions actuelles est requise.

*Loisirs et tourisme*

- Il existe peu d'études spécifiquement liées aux activités récréatives aquatiques et hivernales.
- Les répercussions sur le tourisme n'ont pas été évaluées.

*Énergie hydroélectrique*

- Des études ont seulement été effectuées pour les Grands Lacs et le Québec (aucune étude en Colombie-Britannique).

*Santé*

- Des travaux de recherche limités ont été consacrés à la santé humaine et au changement climatique.
- Aucune recherche n'a été effectuée sur les changements dans la qualité de l'eau et la santé humaine.

*Navigation*

- La recherche limitée dans ce domaine a surtout porté sur les Grands Lacs; certains travaux ont été effectués pour le Nord (Mackenzie) et les Maritimes.

*Approvisionnement en eau des villes*

- Il existe peu d'études sur l'approvisionnement en eau des villes (sauf pour les Prairies) et l'exploitation des réservoirs.
- Il faudra faire des études pour évaluer dans quelle mesure la gestion de la consommation en eau, les instruments économiques et une gestion améliorée de l'infrastructure d'approvisionnement en eau peuvent atténuer les impacts du changement climatique, et examiner les stratégies additionnelles qu'il convient de mettre en œuvre et à quel coût.

- Peu de villes semblent intéressées à planifier en fonction du changement climatique (un seul exemple trouvé).

*Généralités*

- Il faudra définir des méthodes permettant d'intégrer l'information sur le changement climatique à la planification et à la gestion à long terme des ressources en eau.
- Des études de cas doivent être effectuées à partir des analyses en matière d'adaptation.
- Une quantification des coûts de l'adaptation à la variabilité climatique actuelle et au changement climatique est requise.

## INTRODUCTION

### *L'eau comme agent d'unification*

L'eau est essentielle à toutes les formes de vie sur Terre. Notre société et la nature dépendent de l'eau directement et indirectement. L'eau est liée à tous les autres secteurs analysés dans le cadre de l'Étude pan-canadienne, et il existe également des corrélations entre nombre de ces autres secteurs, comme le tourisme et les pêches (Figure 1.1).

### *Systèmes liés à l'eau*

Aux fins de la présente synthèse sur le secteur de l'eau, on distingue deux grands systèmes organisés, en ce qui a trait à l'eau et aux ressources en eau (Figure 1.2). Le premier est le système physique/biologique, qui se compose des sous-systèmes atmosphérique, hydrologique, physiographique, aquatique et terrestre. L'autre est le système humain, qui se compose du sous-système d'utilisation des ressources, ainsi que des sous-systèmes administratif, socio-politique et juridique.

La première partie de la synthèse sur le secteur de l'eau, intitulée *Hydrologie : changement et variabilité climatiques*, est axée sur le sous-système hydrologique (Figure 1.2) et traite en outre de certains aspects du sous-système atmosphérique. Le sous-système aquatique est étudié dans le secteur des pêches, tandis que le sous-système terrestre sera examiné dans le cadre de nombreux secteurs, dont l'agriculture et la foresterie. Le système humain est étudié aux sections du présent chapitre intitulées : *Ressources en eau : changement et variabilité climatiques*, et *Adaptation : changement et variabilité climatiques.*

**Figure 1.1 : Liens entre l'eau et nombre d'autres secteurs et interdépendance entre des derniers**

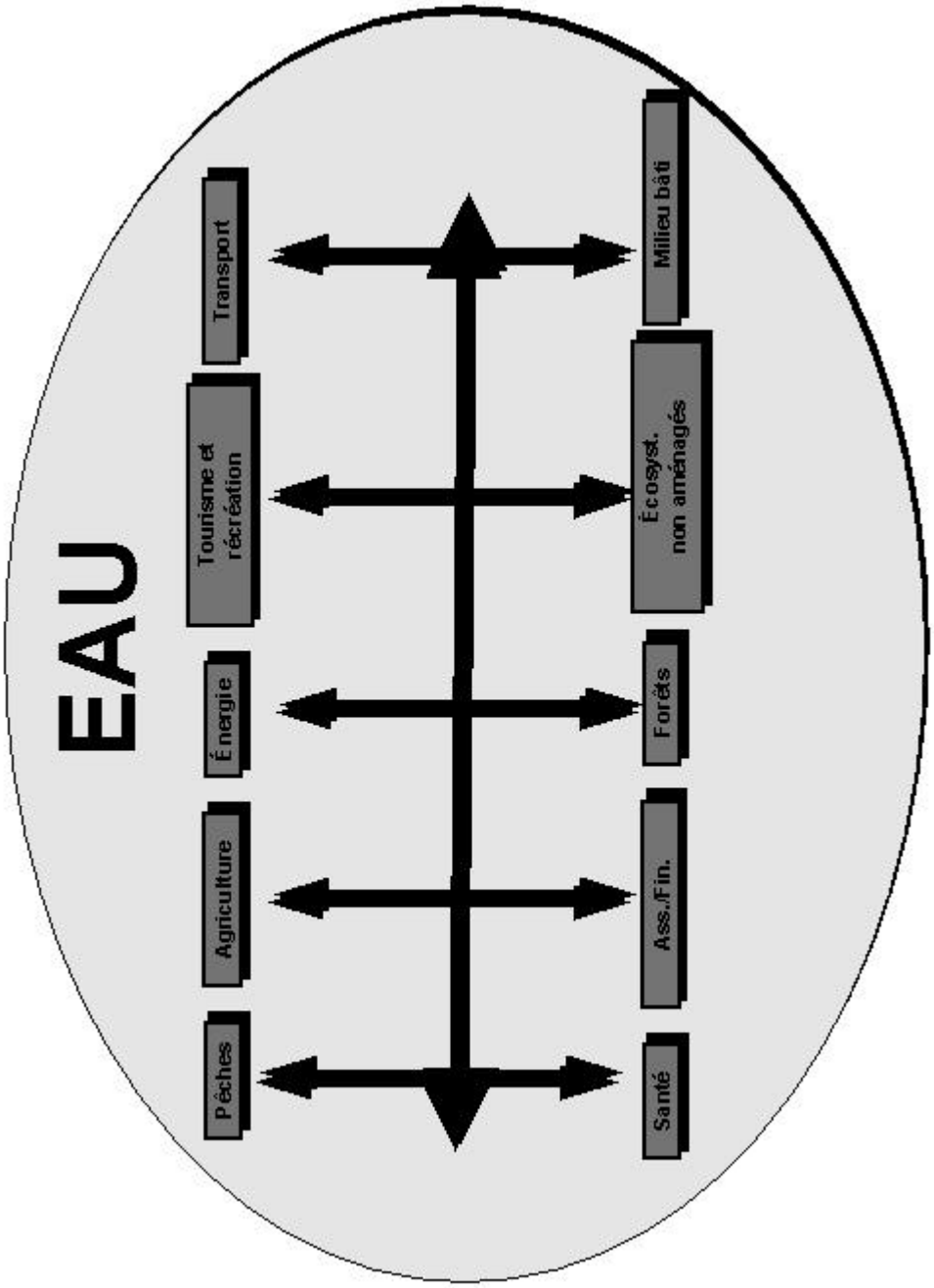
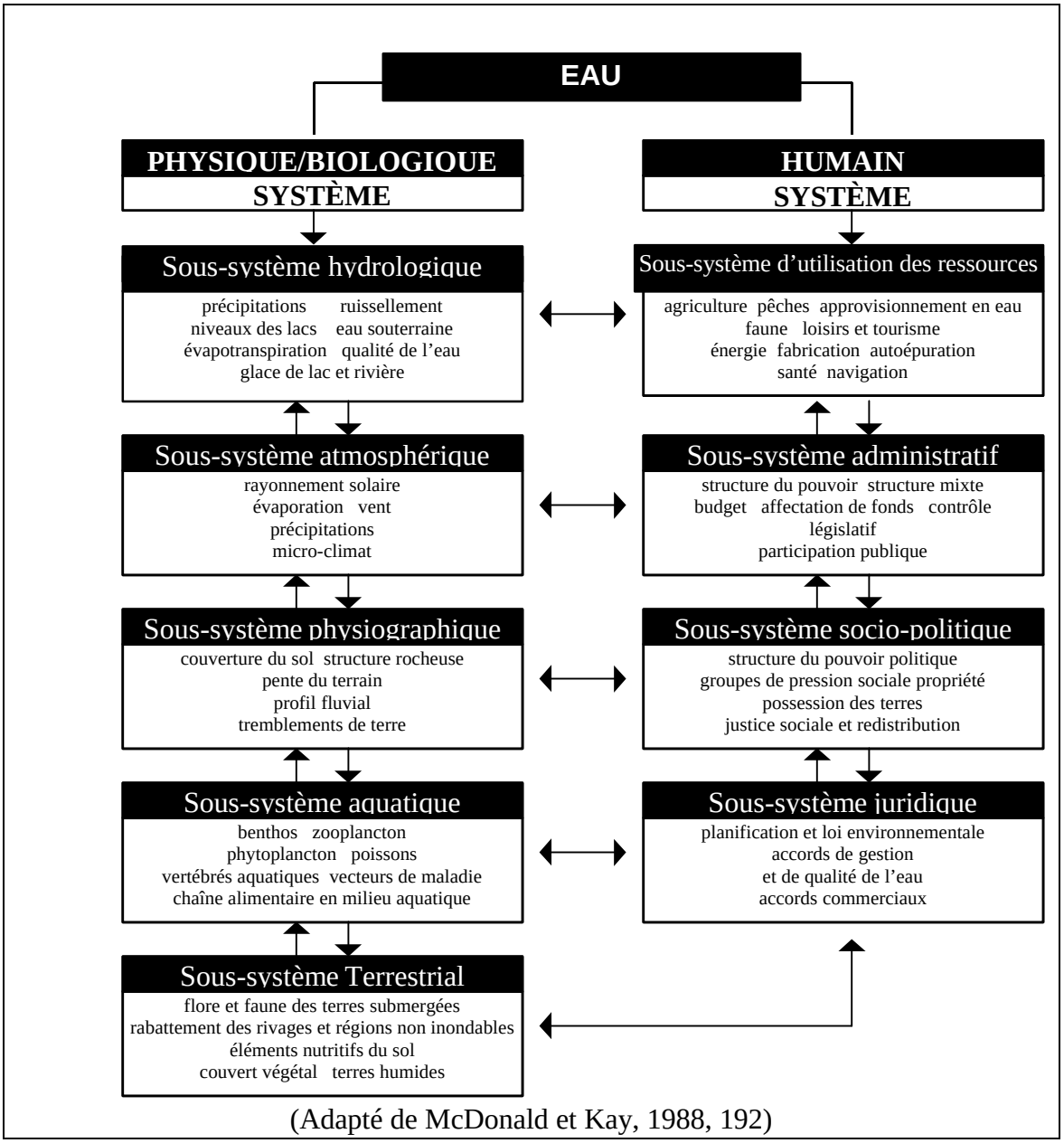


**Figure 1.2 Deux systèmes liés à l'eau**



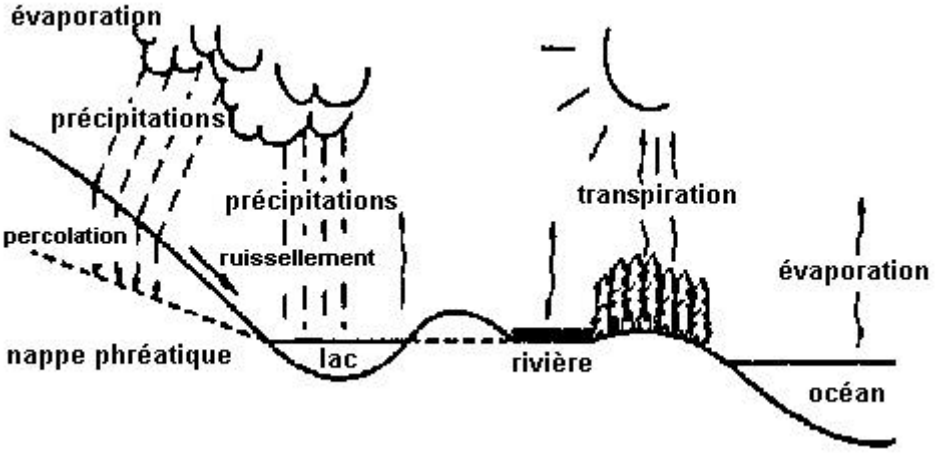

(Adapté de McDonald et Kay, 1988, 192)

## HYDROLOGIE : CHANGEMENT ET VARIABILITÉ CLIMATIQUES

La figure 1.3 montre les composants clés des sous-systèmes hydrologique et atmosphérique décrits à la section précédente. Dans la présente synthèse, nous utiliserons le cycle hydrologique et ses composants pour étudier les impacts (p. ex., de premier ordre) de la variabilité et du changement climatiques. Comme on peut le voir sur le schéma, il existe des corrélations entre les différents éléments du cycle hydrologique. Par exemple, un impact sur les précipitations se répercutera sur les réserves d'eau souterraine et l'écoulement fluvial, tandis que les changements en matière d'évaporation auront un impact sur la teneur en humidité du sol, l'écoulement fluvial et le niveau des lacs. Les simulations effectuées à l'aide de MCG montrent qu'une élévation de

la température stimule le cycle hydrologique; les impacts de ces changements sont analysés dans la présente synthèse (GIEC, 1996, 23).

**Figure 1.3 Cycle hydrologique**




**Petit glossaire d'hydrologie :**

Eau souterraine : Eau de surface qui s'infiltre jusqu'à la nappe phréatique, et finit par se déverser dans les lacs et les rivières. Le niveau de la nappe phréatique est le niveau auquel l'eau s'élève dans un puits ouvert.

Évaporation : À mesure que l'eau est chauffée par le soleil, ses molécules superficielles absorbent suffisamment d'énergie pour rompre la force d'attraction qui les lie les unes aux autres, *s'évaporer* et s'élever dans l'atmosphère sous la forme de vapeur invisible.

Percolation : Eau de surface qui s'infiltre, ou percole, par les fissures, joints et pores présents dans le sol ou le roc jusqu'à la nappe phréatique, où elle devient de l'eau souterraine.

Précipitations : Les précipitations sous la forme de pluie, de neige et de grêle proviennent de nuages formés par la condensation de la vapeur d'eau. Au Canada, les précipitations sont abondantes le long du Pacifique et de l'Atlantique, et faibles dans l'intérieur et l'Arctique.

Ruissellement : Le ruissellement est la partie des précipitations qui ne s'évapore pas et n'est pas éliminée par transpiration, mais s'écoule plutôt à la surface du sol pour se déverser dans les ruisseaux, les rivières, les lacs et, enfin, les océans.

Transpiration : Les plantes émettent également de la vapeur d'eau lors d'un processus appelé transpiration. Chaque jour, une plante active évacue par *transpiration* l'équivalent de cinq à dix fois sa teneur en eau.

(adapté d'Environnement Canada, 1990)

La présente synthèse fait le point sur ce que nous savons actuellement de la variabilité climatique, des événements extrêmes, des tendances en matière de changement climatique et de ses impacts sur:

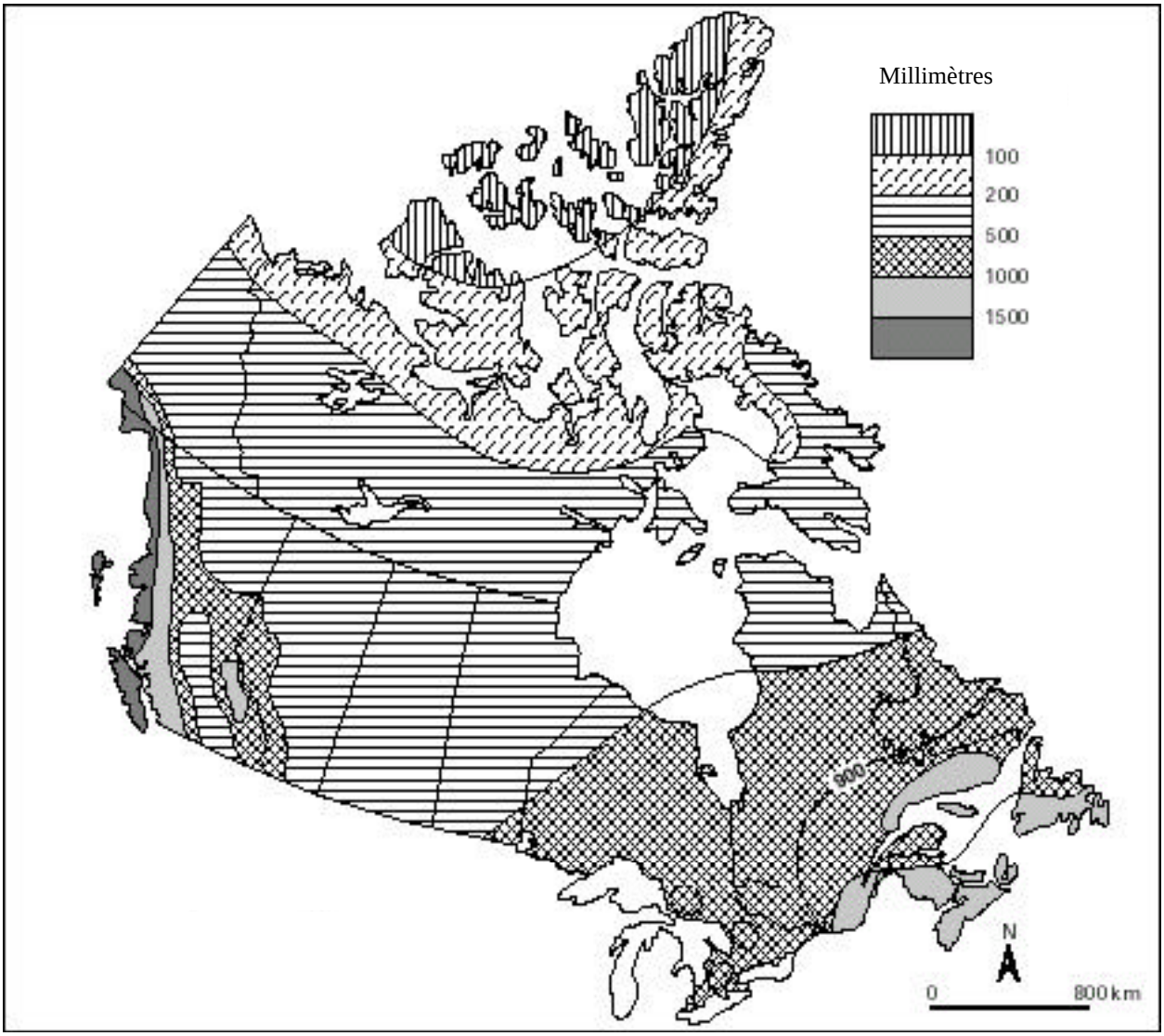
- les précipitations ;
- l'évapotranspiration ;
- l'écoulement de surface (fluvial/ruissellement);
- les lacs;
- l'eau souterraine;
- la qualité de l'eau;
- les terres humides;
- le régime glaciel.

***Précipitations***

La distribution temporelle et spatiale des précipitations constitue un déterminant majeur, du point de vue de l'habitabilité (Rogers, 1994) et du développement de systèmes biophysiques caractéristiques. Au Canada, la distribution des précipitations varie selon les régions (Figure 1.4). Les différences régionales sont dues à la taille et à l'hétérogénéité du paysage canadien, ainsi qu'aux divers systèmes météorologiques qui y exercent une influence. Par exemple, les régions côtières de la Colombie-Britannique sont celles qui reçoivent les plus fortes précipitations, en particulier l'hiver, alors que les Prairies reçoivent moins de précipitations à cause de l'effet d'ombre pluviométrique des Rocheuses. La région arctique reçoit elle aussi peu de précipitations. Dans l'est du Canada, les précipitations sont réparties également entre les saisons. Lorsque l'on va de l'est des Prairies, près de Winnipeg (500 mm), jusqu'à Halifax (1500 mm) en passant par l'Ontario et le Québec, les précipitations augmentent de 40 mm/100 km en direction sud-est. La région de l'Atlantique reçoit ainsi une quantité importante de précipitations (Phillips, 1990).

Le Canada est un pays froid. L'hiver les précipitations tombent sous la forme de neige s'accumulant sur le sol sur une grande superficie du pays. Cette accumulation de neige a des répercussions importantes pour l'hydrologie, la faune, la végétation et l'activité socio-économique.

**Figure 1.4 Précipitations annuelles moyennes pour le Canada**



Variabilité et extrêmes des précipitations

Les précipitations peuvent également varier considérablement d'une saison à une autre, d'une année à une autre et d'une décennie à une autre. On trouvera au tableau 1.1 les valeurs maximales enregistrées pour les événements extrêmes.

**Tableau 1.1 Records de précipitations au Canada**

| Événement | Accumulation et endroit |
|---|---|
| Précip. en 24 h | 489,2 mm, Uclulet Brynnor Mines (C.-B.),1967 |
| Précip. en 1 mois | 2 235,5 mm, Swanson Bay (C.-B.),1917 |
| Précip. en 1 an | 8 122,6 mm, Henderson Lake (C.-B.),1931 |
| Précip. ann. moy. | 6 655 mm, Henderson Lake (C.-B.) |
| Préc. niv. ann. moy. | 1 433 cm, Glacier Mount Fidelity (C.-B.) |
| Préc. niv. en 1 mois | 535,9 cm, Haines Apps, n° 2 (C.-B.),1959 |
| Préc. niv. en 1 jour | 118,1 cm, Lakelse Lake (C.-B.),1974. |

(Phillips, 1990)

Une sécheresse est une période de temps sec plus longue que prévu ou anormale, qui entraîne des pertes mesurables (endommagement des récoltes, pénuries d'eau) (Phillips, 1990). Des sécheresses se sont produites dans toutes les régions du pays, et ont eu des incidences économiques, environnementales et sociales importantes (Tableau 1.2). On prévoit, dans une hypothèse de changement climatique, que les événements extrêmes, sous la forme de pluies plus intenses entrecoupées de périodes de sécheresse plus longues, et les conséquences socio-économiques en découlant, deviendront plus fréquents (GIEC, 1996; Whetton *et al.*, 1993). Des modifications du climat qui altèrent la fréquence et l'ampleur des événements extrêmes ont une plus forte incidence sur l'hydrologie, la gestion des ressources en eau et l'adaptation que les changements des moyennes.

Variabilité : exemple du bassin des Grands Lacs

La figure 1.5 illustre la variabilité des précipitations annuelles dans le bassin des Grands Lacs pour les années 1860 à 1990. Il s'est produit deux épisodes de sécheresse extrême pendant la période considérée, soit au cours des années 30 et des années 60. Dans l'ensemble, la période de 1900 à 1940 a été beaucoup plus sèche que les années 1940 à 1990, mais les précipitations annuelles moyennes ont augmenté d'environ 50 mm au cours de cette dernière période, l'écart type (une mesure de la variabilité) étant passé de 50 à 71 mm.

Tendances passées des précipitations

Après avoir analysé les données sur les précipitations pour les 40 dernières années pour différentes stations au Canada, Gan (1991) en est arrivé à la conclusion qu'il n'existait pas de configuration spatiale apparente pour ce qui est des tendances en matière de précipitations; les résultats sont dispersés. Il a toutefois remarqué qu'un certain nombre de stations (jusqu'à 10 %) indiquaient des précipitations accrues pendant le printemps et l'été, et que jusqu'à 10 % des stations montraient une tendance à la baisse pendant l'hiver.

On trouvera au tableau 1.3 un résumé des tendances annuelles et saisonnières des précipitations pour les différentes régions du Canada (Mekis et Hogg, 1997). On relève une augmentation importante des précipitations annuelles totales dans la plupart des régions; les précipitations nivales montrent également une importante tendance à la hausse. La région des Grands Lacs et celle des basses terres du Saint-Laurent font toutefois exception, avec des baisses significatives

des précipitations nivales annuelles et printanières. Au nord de 55$^{e}$ parallèle, les précipitations nivales de printemps, d'été, d'automne et annuelles ont augmenté.

Impacts du changement climatique sur les précipitations

**Tableau 1.2 Épisodes de sécheresse au Canada**

| Année | Événement |
|---|---|
| 1805 | récolte de pommes de terre perdue dans la région de la rivière Rouge |
| 1816-19 | sécheresse presque continue et hordes de sauterelles dans les Prairies |
| 1846 | récolte perdue dans la région de la rivière Rouge |
| 1862-64 | bas niveaux de la rivière Rouge; les semences doivent être importées des É.-U. |
| 1868 | mauvaise récolte dans les Prairies; invasion de sauterelles |
| 1890 | neuf années de sécheresse forcent à l'abandon de fermes |
| 1933 | une invasion de sauterelles et la sécheresse produisent la plus petite récolte de blé depuis 1920, en Saskatchewan |
| 1936 | une vague de chaleur intense réduit les rendements de 25% en Ontario |
| 1936-38 | la sécheresse récurrente dans les Prairies est déclarée urgence nationale |
| 1961 | la pire année de sécheresse du siècle pour le blé des Prairies |
| 1963 | une grave sécheresse en Ontario réduit de façon dramatique la production de soja et de maïs |
| 1967 | longue période de sécheresse dans la région de la rivière de la Paix, au sud du Manitoba |
| 1973 | un été exceptionnellement chaud et une sécheresse locale compromettent les récoltes de pommes de terre et de pommes en Ontario |
| 1977 | grave sécheresse dans le sud de l'Alberta et l'ouest de la Saskatchewan |
| 1978 | sécheresse étendue dans le centre ontarien |
| 1979-80 | deux mauvaises récoltes de blé et de fourrage dans les Prairies, perte estimée à 2,5 milliards $ pour l'économie du pays |
| 1983 | pire sécheresse du siècle dans le sud de l'Ontario |
| 1984 | la sécheresse dans le sud-ouest de la Nouvelle-Écosse assèche nombre de cours d'eau et de puits |
| 1985 | le sud-est des Prairies reçoit la moitié de la quantité normale de pluie, infestations d'insectes; les feux de forêt en Colombie-Britannique coûtent 300 000 millions $ (lutte contre le feu et bois perdu) |
| 1988 | la sécheresse prolongée dans les Prairies, l'Ontario et le Québec coûte 1,8 milliard $ en dommages; la pire sécheresse en 60 ans, dans la région intérieure de la Colombie-Britannique |
| 1989 | la pire sécheresse en 40 ans, en Nouvelle-Écosse, réduit l'approvisionnement en eau, augmente le nombre de feux de forêt |

(Phillips, 1990; Koshida, 1992)

Le changement climatique causé par un « effet de serre accru » peut modifier la forme, la quantité, le moment, la distribution, l'intensité et la durée des précipitations, ainsi que l'ampleur des événements extrêmes. Les circulations océanique et atmosphérique étant liées aux gradients de température autour du globe, les changements mondiaux de température peuvent modifier la circulation générale. Il pourrait en résulter une modification des principales trajectoires de tempête et des régions qui reçoivent les précipitations (Environnement Canada, 1995).

Au niveau mondial, les scénarios $2xCO_2$ prévoient de manière générale une augmentation des précipitations moyennes, mais les impacts régionaux sont plus incertains parce que la paramétrisation des MCG ne tient pas compte des micro-processus (GIEC, 1990). Selon ces mêmes scénarios, nombre de régions du Canada recevront davantage de précipitations (p. ex., le Nord), tandis que d'autres en recevront moins (p. ex., le Sud). Les changements prévus dans les précipitations annuelles, sur la base des scénarios $2xCO_2$ utilisés dans le cadre de différentes études d'impact sur le climat, sont résumés au tableau 1.4. On constate une augmentation des précipitations dans presque toutes les régions du pays, mais aussi l'existence d'écarts entre les différents modèles pour une même région.

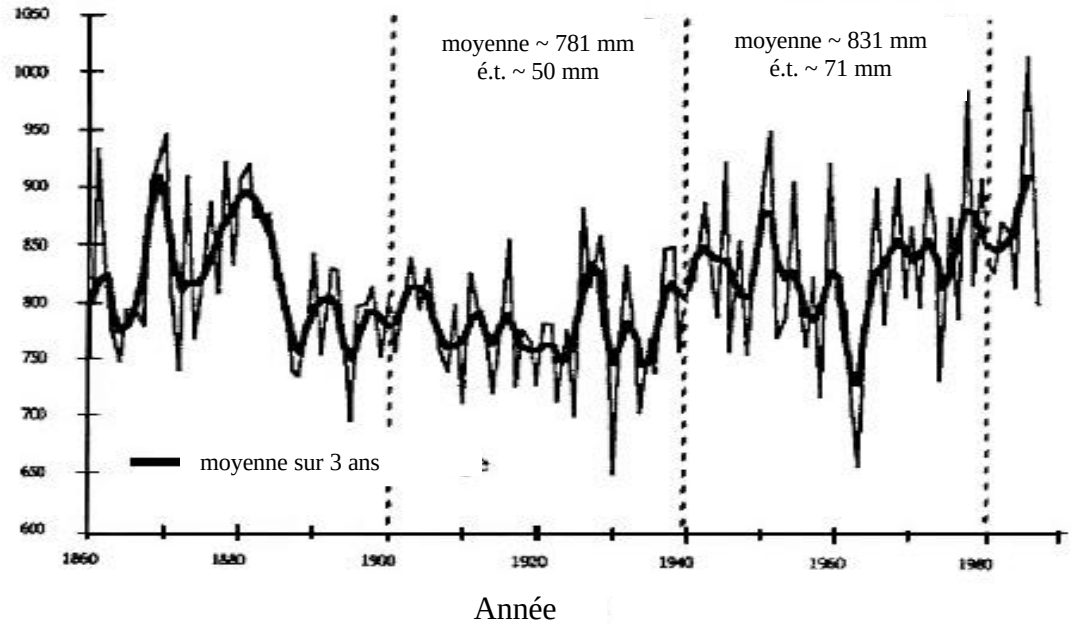
Le réchauffement des régions froides du nord pourrait augmenter les précipitations, en particulier au cours de l'hiver (Rouse *et al.*, 1997). Nombre de scénarios MCG prévoient que la région de l'intérieur, les Prairies, deviendra plus sèche, en particulier pendant l'été et l'hiver. Isaac et Stuart (1992) ont montré l'existence d'un lien étroit entre des précipitations plus élevées que la normale et des températures quotidiennes au-dessus de la moyenne, dans les conditions climatiques actuelles.

**Tableau 1.3 Tendances* en matière de précipitations au Canada** (Mekis et Hogg, 1997)

| RÉGION | | Période | Moyennes annuelles | | | Hiver | | | Printemps | | | Été | | | Automne | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Total | Neige | Pluie | Total | Neige | Pluie | Total | Neige | Pluie | Total | Neige | Pluie | Total | Neige | Pluie |
| I. | Atlantique | 1895-1996 | 0,5 | 2,7 | -0,5 | 0,7 | 2,2 | -1,8 | 0,5 | 3,6 | -1,0 | 0,5 | - | 0,4 | 0,1 | 5,3 | -0,3 |
| II. | Grands Lacs / basses terres du Saint-Laurent | 1895-1995 | 1,1 | -1,8 | 2,2 | -0,3 | -1,5 | 2,6 | 1,0 | -3,8 | 2,6 | 1,1 | - | 1,1 | 2,6 | -0,1 | 2,9 |
| III. | Forêt du Nord-est | 1918-96 | 2,4 | 4,3 | 1,3 | 3,1 | 3,0 | 6,2 | 2,5 | 4,6 | 0,5 | 1,7 | - | 1,6 | 2,6 | 6,2 | 0,9 |
| IV. | Forêt du Nord-ouest | 1938-1996 | 1,9 | 0,8 | 2,4 | -2,7 | -3,1 | - | 0,6 | 1,2 | 0,1 | 3,0 | - | 3,0 | 3,5 | 5,4 | 2,2 |
| V. | Prairies | 1895-1995 | 0,5 | 1,5 | 0,1 | 2,4 | 2,1 | - | 0,9 | 1,2 | 0,8 | -0,4 | - | -0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,8 |
| VI. | Montagnes du sud de la C.-B. | 1895-1995 | 1,4 | 2,0 | 0,9 | 2,4 | 2,7 | 1,4 | 1,6 | 0,8 | 2,5 | 1,0 | - | 1,0 | 0,8 | 2,0 | -0,1 |
| VII. | Côte du Pacifique | 1898-1995 | 0,9 | 1,9 | 0,8 | 0,7 | 2,1 | 0,6 | 0,1 | -4,5 | 0,2 | 1,9 | - | 1,9 | 1,2 | 9,6 | 0,0 |
| VIII. | Yukon / montagnes du nord de la C.-B. | 1939-1995 | 3,0 | 4,8 | 1,6 | 5,8 | 5,6 | - | 4,9 | 2,8 | 7,3 | 0,2 | - | 0,1 | 3,9 | 5,3 | 2,6 |
| IX. | District du Mackenzie | 1927-1996 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | 1,6 | 1,5 | - | 0,2 | 1,0 | -1,3 | 1,0 | - | 1,3 | 1,9 | 2,2 | 1,6 |
| X. | Toundra arctique | 1948-1996 | 5,1 | 9,5 | -1,1 | 5,6 | 5,9 | - | 7,7 | 9,2 | -2,7 | 0,5 | 13,9 | -1,4 | 7,4 | 11,3 | 0,3 |
| XI. | Montagnes et fjords arctiques | 1948-1996 | 2,4 | 3,3 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | - | 6,2 | 6,1 | - | 2,1 | 11,5 | -1,2 | 1,5 | 0,8 | 5,2 |
| >55 °N | | 1948-1995 | 2,3 | 4,7 | -0,3 | 2,3 | 2,2 | - | 3,8 | 3,9 | 3,5 | -0,2 | 13,2 | -1,2 | 4,2 | 6,5 | 0,7 |
| Canada | | 1948-1995 | 1,7 | 2,2 | 1,4 | -0,1 | 0,1 | -0,7 | 2,6 | 1,2 | 4,0 | 0,9 | 12,2 | 0,5 | 3,4 | 5,3 | 2,1 |

*Unité : (mm changement / moyenne) sur 10 ans
La tendance n'a pas été calculée pour les moyennes inférieures à 5 mm
Zones en gras : la tendance est significative
Zones ombrées : il existe une corrélation entre les résidus (échec du test de Durbin-Watson)

**Figure 1.5 Précipitations annuelles, bassin des Grands Lacs (1860-1990)** (Nuttle, 1993b, 5)




Une augmentation des précipitations ne signifie pas nécessairement que les différentes régions du Canada deviendront plus humides. Les pertes par évaporation plus élevées résultant des températures plus chaudes pourraient rendre de nombreuses régions plus sèches, même si les précipitations étaient accrues (Environnement Canada, 1995).

Des études semblent indiquer que les tempêtes de pluie locales et plus intenses augmenteront aux dépens d'une pluviosité plus modérée mais persistante (Mitchell et Ingram, 1990; Noda et Tokioka, 1989). Les résultats expérimentaux recueillis par Danard et Murty (1988) indiquent que, dans les scénarios $2xCO_2$, la quantité de précipitations augmente et le centre des dépressions se creuse. Lambert (1995) en est arrivé à la conclusion, sur la base du scénario MCGII $2xCO_2$ du CCC, que le nombre total de cyclones d'hiver extratropicaux diminuerait, en particulier dans l'hémisphère nord, mais que la fréquence des cyclones intenses irait en augmentant. L'activité barocline réduite pourrait être attribuable au gradient de température nord-sud (méridien) plus faible, tandis que l'intensité accrue des cyclones pourrait être causée par la plus grande humidité de l'atmosphère.

Les températures hivernales plus élevées feront en sorte que plus de précipitations tomberont sous la forme de pluie, au lieu de neige, et que le ruissellement direct immédiat pourrait s'accroître. Également, lorsque la pluie tombe sur de la neige, il se produit une modification du manteau nival, y compris une réduction de ce dernier, et une augmentation de la densité de la glace et des couches de glace. Ces facteurs influeront sur l'intensité, le moment et l'ampleur du ruissellement printanier (Wittrock et Wheaton, 1992).

**Figures 1.6a et 1.6b** **Manteau nival en fonction a) des conditions climatiques actuelles et b) du scénario $2xCO_2$, dans la portion nord-ouest du bassin hydrographique de la baie de Quinte** (Walker, 1996)

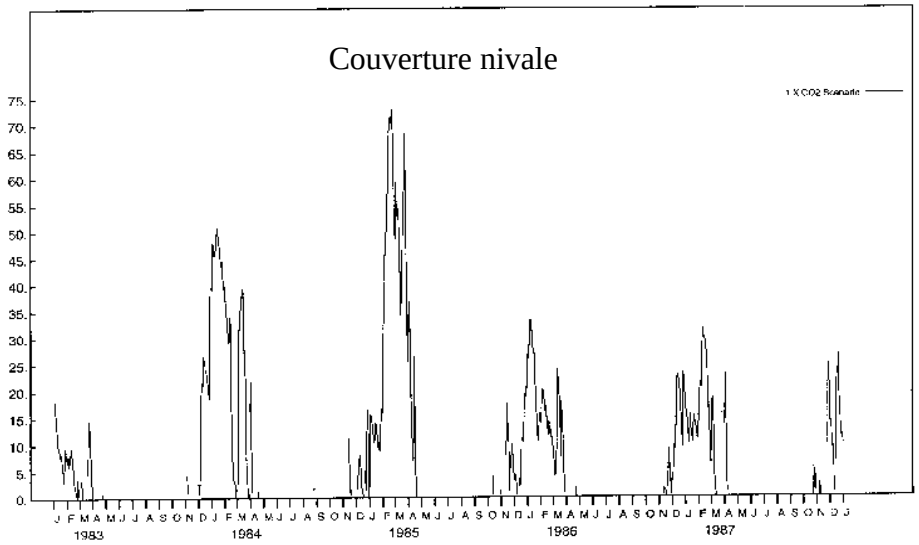



Figure 1.6a

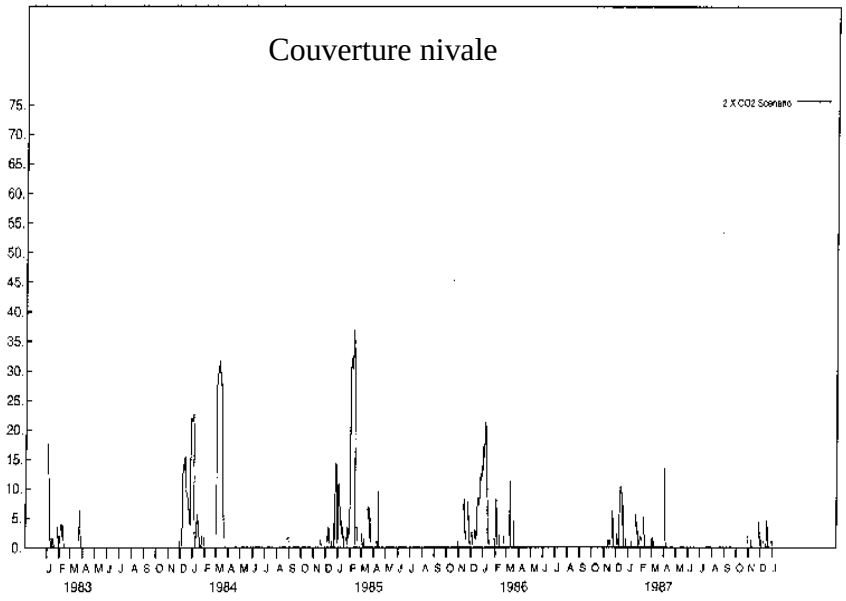



Figure 1.6b

L'accumulation des précipitations hivernales, sous la forme de manteau nival, joue un rôle important dans l'hydrologie de nombreuses régions canadiennes. En particulier, le ruissellement est moindre en hiver parce que les précipitations sont stockées sous forme de neige. La fonte du printemps produit de forts débits de pointe, la crue nivale, qui ont des effets importants sur l'hydrologie, l'écologie et la qualité de l'eau. Des températures hivernales plus élevées n'auront pas seulement une incidence sur la forme des précipitations, mais diminueront l'épaisseur du manteau nival; il en résultera une disparition plus hâtive de ce dernier (Boer *et al.*, 1992, Brown *et al.*, 1994). Une étude d'impact du bassin hydrographique de la baie de Quinte (Ontario) montre la durée et la quantité du manteau nival qui prévaudraient dans le cas d'un scénario $2xCO_2$, par rapport aux conditions actuelles. Le manteau nival a été modélisé pour une période de cinq ans, en fonction tant des conditions climatiques actuelles (1983-1987) que du scénario MCGII $2xCO_2$ du CCC, dans la portion nord-ouest du bassin (Figures 1.6a et 1.6b, respectivement). On constate que le scénario $2xCO_2$ produit un manteau nival beaucoup plus petit et intermittent; il est même presque inexistant certaines années. Actuellement, le manteau nival demeure en place pendant plus de quatre mois.

L'application d'un scénario $2xCO_2$ de modèle pour une zone restreinte au système climatique des Rocheuses américaines a donné comme résultats des précipitations accrues pendant la saison froide et une température annuelle de l'air plus élevée (Giorgi *et al.*, 1994, dans Williams *et al.*, 1997). Des résultats empiriques semblent toutefois indiquer que le réchauffement aux altitudes plus basses pourrait causer l'advection d'une quantité accrue de vapeur d'eau aux altitudes plus élevées et plus de précipitations orographiques sous la forme de neige; il en résulterait une baisse à court terme de la température de l'air aux altitudes plus élevées (Barry, 1990; Williams *et al.*, 1997).

Des études empiriques additionnelles des processus climatologiques et écologiques sont requises dans les régions montagneuses, car la possibilité d'une accumulation accrue de neige y a des répercussions importantes sur l'hydrologie et les ressources en eau.

Dans le sud de l'Ontario, les tempêtes de neige d'effet de lac se forment lorsque l'air froid de l'Arctique balaie la surface relativement chaude des lacs, et se charge d'humidité et de chaleur provenant de ces derniers. Ces tempêtes se produisent plus particulièrement entre novembre et janvier sur les rives est des Grands Lacs, avant qu'une couverture glacielle importante se forme. Les chutes de neige sont hautement localisées sous le vent du lac. Plus la distance parcourue par la masse d'air est considérable, plus l'air se charge d'une quantité importante d'humidité et de chaleur en provenance des lacs. Plus la différence de température entre les lacs et l'air est grande, plus la possibilité d'averses de neige augmente (Wong, 1994). La saison d'eaux libres sur les lacs de grande superficie plus longue prévue par les scénarios $2xCO_2$ prolongera celle des tempêtes d'effet de lac.

Scénarios de précipitations des MCG : influence des échelles temporelle et spatiale

On trouvera au tableau 1.4 un résumé des changements annuels dans les précipitations et les températures générés par les scénarios des MCG utilisés dans le cadre des études d'impact climatique pour diverses régions du Canada. Les précipitations annuelles augmentent dans la plupart des scénarios. Lorsqu'une échelle saisonnière est utilisée, les différences entre les scénarios de précipitations des MCG sont plus apparentes pour le bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent (tableau 1.5). On remarque également des différences plus marquées des précipitations dans différentes portions du bassin (tableau 1.5).

**Tableau 1.4 Changements dans les températures et les précipitations (annuelles) pour différentes régions du Canada, en fonction des scénarios MCG 2x$CO_2$**

| Région | Temp. ($^oC$) | Précip. (%) | MCG | Étude |
|---|---|---|---|---|
| Ouest | +2,5<br>+4,4 | +18<br>+19 | GFDL/80<br>GISS/84 | Haas et Marta (1988); rivière Sask. Sud |
| | +2,8<br>+4,5 | +48<br>+10 | GFDL/80<br>GISS/84 | Zaltsburg (1990), Wilson Creek (Manitoba) |
| | +2,2<br>+4,4<br>+3,0<br>+6,7<br>+4,6 | +18<br>+19<br>+8<br>+7.5<br>+19 | GFDL/80<br>GISS/84<br>OSU/88<br>GFDL/87<br>GISS/87 | Cohen (1991); rivière Sask. |
| | +4,6<br>+6,2<br>+2,8 | +11<br>+2<br>+6 | GISS<br>GFDL<br>OSU | Nkemdirim et Purves (1994); bassin de la Old Man |
| Centre | +4,7<br>+5,3<br>+5,7 | +1,9<br>+0,4<br>-6,3 | GISS<br>GFDL<br>CCC | Sanderson et Smith (1990); riv. Grand |
| | +3,1 à 3,7<br>+4,3 à 4,8 | +0,8<br>+6,5 | GFDL/80<br>GISS/84 | Cohen (1986; 1987b); Grands Lacs |
| | +4,3 à +4,7<br>+5,7 à -+7,2<br>+3,2 à +3,5 | -7 à +18<br>-4 à +7<br>+5 à +8 | GISS<br>GFDL<br>OSU | Croley (1990); Grands Lacs |
| | +3,5<br>+4,7 | +17,5<br>+15 | GFDL/80<br>GISS/84 | Singh (1988); baie James |
| | +4,2 | -7,1 | CCC | Morin et Slivitzky (1992); rivière Moisie |
| Atlantique | +4,0<br>+4,0 à 4,7 | -2 à -3<br>+5,9 à +7,5 | | Saulesleja (1989); Maritimes, T.-N. / Labr. |
| Nord | +2 à 3,5 | +54 | UKMO/83 | Ripley (1987) |

(modifié de Nuttle, 1993a, 8; Nkemdirim et Purves, 1994; Croley, 1990)

**Tableau 1.5 Comparaison des scénarios de précipitations MCG pour le bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent ($2xCO_2$ / $1xCO_2$)**

| MCG | Commentaires gén. | Hiver | Printemps | Été | Automne |
|---|---|---|---|---|---|
| CCC | Plus humide au printemps et en hiver au nord/nord-ouest; plus sec au sud en été et à l'automne | Plus humide dans le nord et le nord-ouest ; plus sec dans le sud-ouest<br>(0,9 à 1,2) | Augment. marquée des précip. vers le nord<br>(0,9 à 1,4) | Généralement plus sec que la normale sauf pour le nord-est<br>(0,8 à 1,1) | Baisse marquée des précip. vers le sud; augmentation dans le nord<br>(0,7 à 1,3) |
| GISS | Le plus humide des MCG; plus humide vers le nord (toutes saisons, surtout l'hiver et l'été). Baisse marquée des précip. en automne | Progressivement plus humide vers le nord<br>(1,0 à 1,2) | Plus humide vers le nord-est<br>(1,0 à 1,) | Augmentation des précipitations vers le nord<br>(1,0 à 1,3) | Baisse marquée des précipitations du nord-ouest vers le sud-est<br>(0,7 à 1,2) |
| GFDL | Très humide l'hiver; plus sec au printemps, en été et à l'automne (surtout dans le nord-ouest) | Augmentation marquée des précip. dans tout le bassin<br>(1,1 à 1,3) | Augmentation des précip. vers le nord-ouest/sud-est<br>(0,95 à 1,2) | Baisse marquée des précip. dans tout le bassin<br>(0,7 à 0,9) | Baisse des précip. au nord-ouest du lac Supérieur; hausse des précip. dans le sud-est<br>(0,8 à 1,1) |
| OSU | Augmentation des précip. vers le sud-est/nord-ouest en hiver et en automne | Augmentation des précip. vers le sud-est/nord-ouest<br>(1,0 à 1,2) | Baisse des précip. vers le nord-est/sud-ouest<br>(0,9 à 1,1) | Baisse dans le nord ; augmentation dans le sud<br>(0,9 à 1,1) | Augmentation marquée du sud-est vers le nord-ouest<br>(1,0 à 1,3) |

(Mortsch et Quinn, 1996, 905)

**Tableau 1.6 Changements dans les précipitations mensuelles pour différents scénarios MCG pour le bassin de la rivière Grand (%)**

| Mois | GISS | GFDL | CCC |
|---|---|---|---|
| J | 10,0 | 15,0 | 2,0 |
| F | 12,0 | 0,0 | 10,0 |
| M | 11,5 | 10,0 | 2,0 |
| A | 11,1 | 10,0 | 7,5 |
| M | 7,1 | 10,0 | 2,5 |
| J | 9,0 | 10,0 | -5,0 |
| J | 8,1 | -20,0 | 19,0 |
| A | -3,1 | -10,0 | -18,0 |
| S | -14,0 | -15,0 | -28,0 |
| O | -9,0 | 0,0 | -23,0 |
| N | 2,0 | -5,0 | -35,0 |
| D | -11,5 | 0,0 | -9,0 |
| Moy. | 1,9 | 0,4 | -6,3 |

(Sanderson et Smith, 1993, 17)

Le tableau 1.6 montre la variabilité et les changements des précipitations mensuelles pour différents scénarios de MCG appliqués au bassin de la rivière Grand, dans le sud de l'Ontario. Il existe peu de consensus quant aux effets des précipitations. Par rapport au scénario $1xCO_2$, les précipitations du $2xCO_2$ augmentent tout au long de l'année sauf en septembre, octobre et décembre dans le cas du scénario GISS, diminuent au cours des mois d'été dans le cas du scénario GFDL, et diminuent en automne et en été dans le cas du scénario CCC.

L'incertitude des scénarios de précipitations (p. ex., distribution temporelle et spatiale de la pluie et de la neige) rend difficile la réalisation d'études d'impact hydrologique fiables en vue de la gestion et de la planification des ressources en eau. Les MCG simulent assez bien les régimes mondiaux de précipitations, mais représentent moins bien les climats régionaux. Ils sont encore plus

médiocres pour les processus à échelle plus réduite comme l'effet des lacs de grande superficie (neige sous le vent des lacs) et les effets topographiques complexes (p. ex., en Colombie-Britannique) importants pour l'hydrologie régionale (McBean *et al.*, 1992).

### *Évaporation / évapotranspiration*

L'évapotranspiration est le processus par lequel l'eau retourne dans l'atmosphère par évaporation du sol et transpiration des plantes. L'évapotranspiration n'est pas un paramètre météorologique mesurable directement; elle est estimée au moyen d'autres paramètres climatologiques courants. De manière générale, elle augmente avec la température, et est tributaire de l'insolation, de l'humidité, de la vitesse du vent, des caractéristiques de la surface, de la teneur en eau du sol et des effets d'advection. Au Canada, une bonne partie des précipitations reçues retournent dans l'atmosphère. En Ontario, c'est près des deux tiers. Phillips (1990) a montré qu'au Canada, c'est dans les Prairies, où le climat est sec, que l'évaporation annuelle moyenne des lacs est la plus élevée (elle y atteint jusqu'à 1 000 mm/an), alors que c'est dans le Grand Nord qu'elle est la plus faible, avec une moyenne de 100 mm/an.

Tendances de l'évaporation

Les données recueillies sur une période de vingt ans (1970 à 1990) pour la région des lacs expérimentaux, dans le nord-ouest de l'Ontario, illustrent le lien entre la température et l'évaporation dans les petits lacs et cours d'eau boréaux. Au cours de cette période, la température de l'air a monté de 1,6 ºC, les précipitations ont diminué et l'évaporation annuelle moyenne a augmenté de près de 50 %. L'évaporation a augmenté en moyenne de 35 mm pour chaque degré Celsius d'élévation de la température annuelle de l'air, ou de 68 mm pour chaque degré Celsius d'élévation de la température estivale de l'air (Schindler *et al.*, 1990; Schindler *et al.*, 1996). Pour l'ensemble de la période, l'évaporation a augmenté en moyenne de 9 mm par année.

Impacts du changement climatique

Comme les scénarios $2xCO_2$ des MCG vont dans le sens de températures de l'air plus élevées pour la majeure partie du Canada, on prévoit également que l'évaporation et l'évapotranspiration augmenteront. Bien que nombre de régions puissent s'attendre à des précipitations accrues, le changement climatique mènera paradoxalement dans la plupart des cas à une réduction de la quantité d'eau disponible (Schindler, 1996). Même si les précipitations demeuraient constantes, la température plus élevée de l'air, la durée accrue de la saison sans glace ni gel, ainsi que de la saison de croissance, mèneraient à une période plus longue d'évaporation et de transpiration. Le rapport évaporation/précipitations augmentera vraisemblablement. À moins que la hausse des températures et des taux d'évapotranspiration s'accompagne d'augmentations importantes des précipitations ou de diminutions importantes de la résistance stomatique des plantes aux concentrations accrues de $CO_2$ atmosphérique, il est raisonnable de s'attendre à une baisse du niveau des lacs, de l'écoulement fluvial, des terres humides, de l'humidité du sol et des eaux souterraines (Schindler, 1997; Marsh et Lesack, 1997; Croley, 1990; Hartmann, 1990b; Poiani *et al.*, 1996; Sanderson et Smith, 1993).

Diverses méthodes permettent d'estimer l'évapotranspiration. Dans la méthode du bilan énergétique et la méthode aérodynamique, par exemple, la simulation des taux d'évaporation requiert l'entrée de nombreuses variables comme l'humidité, le rayonnement et la vitesse du vent (Smith et McBean, 1993). Croley (1990) a utilisé des techniques aérodynamiques globales pour estimer l'évapotranspiration pour le bassin des Grands Lacs, des estimations de MCG combinées (rapports et différences $1xCO_2$ et $2xCO_2$) des changements d'humidité et des coefficients de quantité de mouvement pour les changements de vitesse du vent, et des mesures climatiques actuelles comme variables d'entrée. La validité des estimations des changements de l'évapotranspiration est limitée par la qualité des estimations des MCG; les valeurs des vents, par exemple, sont douteuses. Des techniques empiriques plus simples requièrent généralement une seule variable, habituellement la température, pour l'estimation de l'évapotranspiration.

La technique empirique de Thornthwaite (1948) a été souvent utilisée pour les évaluations de l'impact du climat (Coulson, 1997; Cohen, 1986; Sanderson et Smith, 1993; Cohen *et al.,* 1989; Zaltsberg, 1990). Cette technique est très pratique parce qu'elle ne requiert qu'une variable climatique, la température. Comme cette dernière est la plus exacte des variables simulées par les MCG, la technique de Thornthwaite présente un intérêt particulier pour l'estimation de l'évapotranspiration (Smith et McBean, 1993).

On a utilisé tant des techniques empiriques qu' aérodynamiques pour estimer l'effet des scénarios de changement climatique sur l'évapotranspiration. Pour ce qui est du bassin des Grands Lacs, Cohen (1986), Sanderson (1987) et Croley (1990, 1992) en sont venus à la conclusion que le réchauffement menait à des augmentations importantes de l'évapotranspiration. Une augmentation similaire de l'évaporation a été notée en Colombie-Britannique (Coulson, 1997), dans le bassin du Mackenzie (Soulis *et al.*, 1994), dans les Prairies (Cohen *et al.*, 1989; Byrne *et al.*, 1989; Nkemdirim et Purves, 1994; Zaltsberg, 1990) et dans le bassin de la rivière Grand (Smith et McBean, 1993). Cohen (1987) a déterminé que l'évaporation est également sensible à la vitesse des vents.

Sanderson et Smith (1993) ont appliqué la technique empirique de Thornthwaite, ainsi que trois scénarios de changement climatique, au bassin de la rivière Grand. Les résultats obtenus indiquaient une augmentation de 20% à 30% de l'évapotranspiration, une augmentation de 13 % à 16 % de la transpiration réelle, et une augmentation moyenne de l'évapotranspiration de 16,7 %. Dans les scénarios de changement climatique, l'évapotranspiration accrue fait contrepoids aux précipitations plus abondantes, et ce, pour le bassin des Grands Lacs, le bassin du Mackenzie et d'autres régions (Croley, 1990; Cohen, 1987b; Soulis *et al.*, 1994).

Les évaluations complexes de l'impact du climat sur l'hydrologie des bassins requièrent des méthodes avancées d'estimation de l'évapotranspiration pour être en mesure de répondre aux questions liées aux changements de végétation, à la réaction de la végétation à l'augmentation du $CO_2$ et aux incidences sur les ressources en eau. Certains modèles d'évapotranspiration incluent des indices foliaires et des variables de résistance stomatique, dont la modification permet de simuler des réponses nouvelles et/ou différentes au changement climatique (Smith et McBean, 1993). Les variables utilisées dans les scénarios des MCG limitent toutefois le niveau de complexité des évaluations de l'impact du climat. Nombre des éléments requis sont hautement

incertains, et la disparité d'échelle entre les MCG et les bassins hydrographiques pose un problème.

L'évaporation et l'évapotranspiration jouent un rôle important dans l'hydrologie des bassins, mais sont souvent mal évaluées en raison du manque de données et de la complexité des paramètres. Les changements dans l'évapotranspiration ont des conséquences significatives sur l'hydrologie : teneur en humidité du sol, niveau des lacs, ruissellement, eaux souterraines. Les effets spécifiques du changement climatique sur l'évaporation sont mal connus; quels sont les facteurs limitatifs en cause dans l'évaporation des lacs et l'évaporation du sol? Quel est le rôle de l'humidité du sol ?

***Écoulements de surface***

Aux fins de la présente synthèse, l'étude des écoulements de surface se limitera à une analyse du ruissellement et de l'écoulement fluvial. Le ruissellement est la portion des précipitations qui ne s'évapore pas, mais se déverse plutôt dans les cours d'eau par diverses voies. La figure 1.7 montre le ruissellement annuel pour le Canada. Le ruissellement se transforme en écoulement fluvial lorsqu'il atteint un cours d'eau. L'écoulement fluvial est le débit (ou le volume) d'eau dans un cours d'eau, tandis que le ruissellement est souvent représenté comme une épaisseur moyenne sur un bassin.

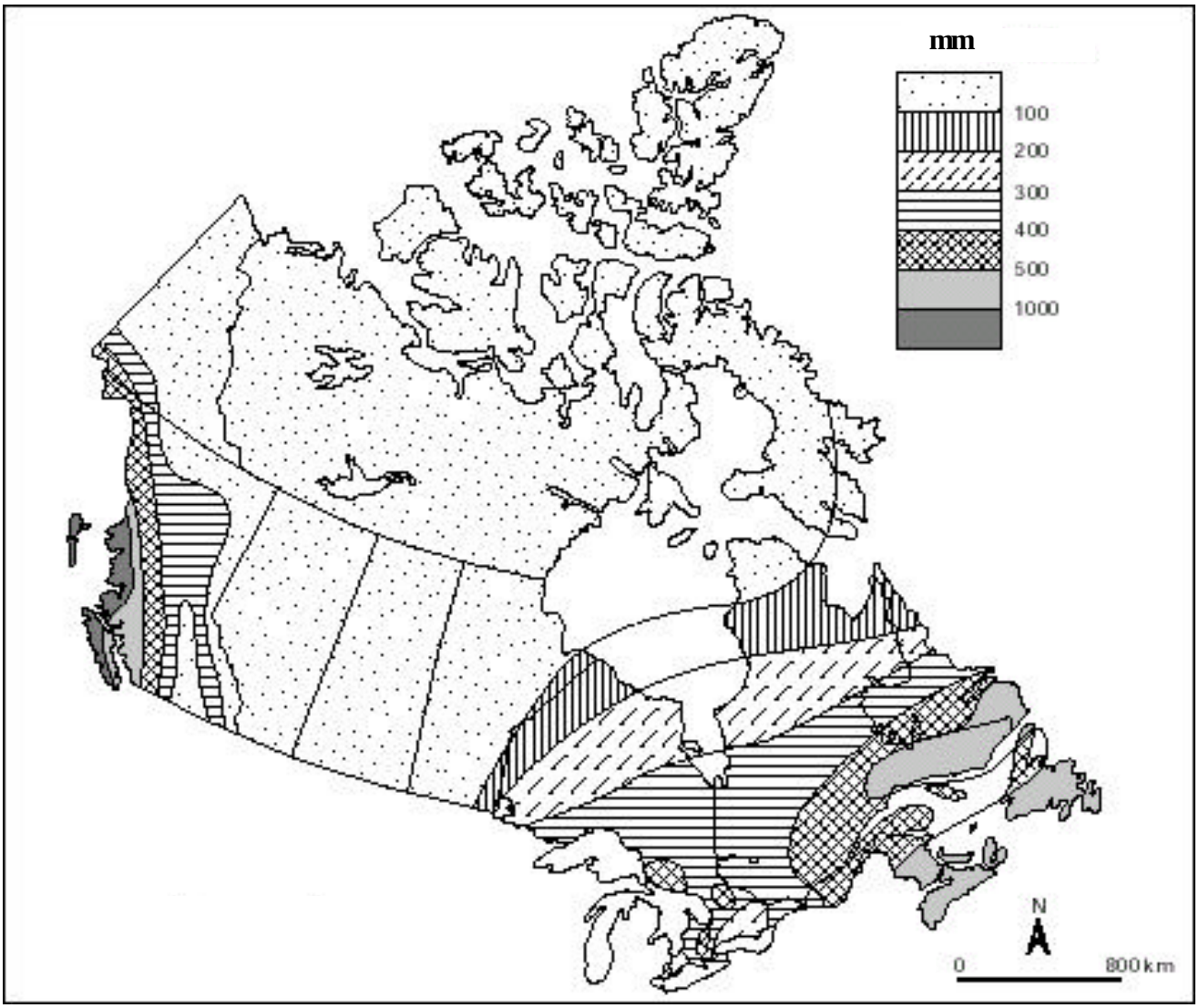
Variabilité et événements extrêmes

Les écoulements de surface varient tant dans l'espace qu'en fonction des saisons. Au Canada, tous les cours d'eau connaissent des variations annuelles de débit. Par exemple, Pêches et Environnement Canada (1978) ont déterminé que, pour 60 % des stations mesurées, c'est au mois de juin que le débit mensuel est maximal. Au Canada, la plupart des débits de pointe sont causés par la neige (*idem)*, c'est-à-dire que le manteau nival s'accumule au cours de l'hiver et est libéré au printemps pendant la fonte printanière ou crue nivale.

Au Canada, le débit minimal mensuel moyen à long terme se produit à l'un ou l'autre de deux moments. Dans le sud du pays, il survient souvent à la fin de l'été, après que les réserves en eau du sol se sont taries par évapotranspiration. Dans le nord, par contre, le débit d'étiage survient à la fin de l'hiver, lorsque les cours d'eau sont couverts de glace et même parfois gelés jusqu'au fond (*idem*).

Lorsque ces débits sont illustrés au moyen d'hydrogrammes, on constate que les valeurs de pointe sont influencées par la capacité de stockage relative (*idem*). Par exemple, la rivière Saskatchewan possède une capacité de stockage relativement faible, et son hydrogramme présente des crêtes et des creux marqués, tandis que le Saint-Laurent présente une courbe très lisse en raison de la grande capacité de stockage des Grands Lacs. Une grande capacité de stockage a essentiellement tendance à uniformiser les débits et réduit la prédominance du débit de pointe dans le cours d'eau.

**Figure 1.7**
**Ruissellement annuel moyen pour le Canada**




La variabilité de l'écoulement fluvial se traduit également par des événements extrêmes comme les inondations. Les recherches effectuées indiquent que ces événements extrêmes pourraient devenir plus fréquents, dans une hypothèse de changement climatique (GIEC, 1996). Ces inondations sont souvent causées par les conditions climatiques (précipitations extrêmes, embâcles et fonte rapide des neiges au printemps), mais peuvent également être largement tributaires de l'activité humaine. Il y a eu des inondations dans toutes les régions du pays, et ces inondations se sont produites fréquemment. On trouvera au tableau 1.7 une liste partielle des grandes inondations survenues au Canada, ainsi qu'une description de certaines de leurs conséquences négatives.

**Tableau 1.7 Grandes inondations survenues au Canada**

| | |
|---|---|
| 1798 | Les inondations de Montréal et Trois-Rivières (Québec) ont été décrites comme les « pires de mémoire d'homme » dans les comptes rendus de l'époque. |
| 1826 | Le niveau de la rivière Rouge, au Manitoba, a dépassé de 2 m celui atteint lors de la fameuse inondation de 1950. |
| 1865 | Le niveau du Saint-Laurent monte de 3 à 4 m à Sorel et à Trois-Rivières (Québec). Quarante-cinq personnes périssent noyées. |
| 1883 | Un mur d'eau le long de la rivière Thames, à London (Ontario), fait 18 victimes. |
| 1928 | Débordement des rivières Rideau, Chaudière et Quyon (Québec). Plusieurs personnes périssent noyées. |
| 1937 | Le débordement de la rivière Thames, à London (Ontario) fait 4 000 sans-abri. |
| 1948 | Les inondations dans la vallée du Fraser, en Colombie-Britannique, laissent 9 000 personnes sans abri. On a dit de ces inondations qu'elles étaient « les pires de l'histoire de la Colombie-Britannique ». |
| 1950 | Le niveau de la rivière Rouge dépasse la normale de 10 m; 100 000 personnes ont dû être évacuées. |
| 1954 | Le ruisseau Etobicoke (Ontario) déborde pendant l'ouragan Hazel et fait 80 victimes. |
| 1973 | Débordement du fleuve Saint-Jean, au Nouveau-Brunswick; les dommages atteignent 12 millions de dollars. |
| 1974 | La rivière Grand inonde Cambridge (Ontario); les dommages atteignent 7 millions de dollars. Importantes inondations dans les Prairies. |
| 1979 | Le niveau de la rivière Rouge dépasse la marque de 1950. Le fleuve Yukon inonde 80 % de la ville de Dawson. |
| 1980 | Les inondations du lendemain de Noël, le long de la rivière Squamish (Colombie-Britannique), causent des dommages évalués à 13 millions de dollars. |
| 1986 | Le niveau de la rivière Saskatchewan Nord gonflée par les pluies atteint 7,6 m au-dessus de la normale et force l'évacuation de 900 résidents à Edmonton. |
| 1996 | L'inondation du Saguenay cause des dommages atteignant presque le milliard de dollars; l'intensité des précipitations constitue un nouveau record national. |
| 1997 | Le débordement de la rivière Rouge au Dakota du Sud (É.-U.) et au Manitoba entraîne le déplacement de milliers de personnes et cause des millions de dollars en dommages. |

(modifié de Phillips, 1990)

Lawford (1990) a suggéré que la modification possible des écoulements de surface était l'aspect du changement climatique qui suscitait le plus d'inquiétude, dans l'ouest du Canada. Les conséquences d'une diminution des écoulements de surface ont pu être constatées au printemps de 1988. Il est tombé très peu de neige sur le sud des Prairies, au cours de l'hiver 1987-1988, et le printemps qui a suivi a été sec et l'été, hâtif. Le manque de précipitations a limité le ruissellement de printemps et mené à une faible teneur en eau du sol dans presque tous les bassins hydrographiques des Prairies. Au nombre des problèmes causés par le manque de précipitations figurent les conflits quant à l'utilisation de l'eau le long de certains petits cours d'eau, une insuffisance d'eau pour diluer les eaux usées des villes et un manque d'eau pour l'irrigation. Les pénuries furent particulièrement aiguës dans le sud de la Saskatchewan. La sécheresse hydrologique de 1988 est représentative des conditions susceptibles de se produire avec une fréquence accrue advenant que le changement climatique mène à une réduction des précipitations (*idem*).

Tendances des débits/écoulements fluviaux

Un certain nombre d'études ont exploré les tendances des données relatives au régime hydrologique; une bonne étude canadienne à cet égard a été effectuée dans le cadre de l'Atelier sur l'application des données hydrométriques à la détection et au monitorage du changement climatique (" Using hydrometric data to detect and monitor climatic change ") de l'Institut national de recherches en hydrologie (INRH) (Kite et Harvey, 1992). Il se pourrait que les caractéristiques de l'écoulement fluvial, comme l'ordre de grandeur des débits moyens et des débits d'étiage, changent avec le temps. Les débits d'étiage semblent en effet se produire plus tard dans l'année, alors que les débits de crue semblent se produire plus tôt, ce qui est compatible avec les conséquences possibles d'un effet de serre accru. Ashfield *et al.* (1991) ont pour leur part analysé les données de 41 stations hydrométriques ontariennes sur une période minimale de trente ans prenant fin en 1990. Plus de 50 % des stations indiquent une augmentation des débits mensuels moyens pour la période de septembre à janvier, et environ 25 % montrent une tendance à la baisse du débit pour la période d'avril à septembre. Trente-cinq pour cent des stations font état de débits d'étiage à la hausse. Anderson *et al. (*1991) ont analysé des séries chronologiques de débits d'étiage, moyens et de crue pour 27 stations (débit non régularisé) dans diverses régions du Canada; les données ont indiqué une diminution du débit d'étiage estival, une augmentation du débit moyen et du débit d'étiage d'hiver, mais peu de tendance marquée en ce qui a trait aux débits de crue.

Le moment de survenue des événements hydrologiques est important pour les écosystèmes (renouvellement des terres humides et des lacs perchés) et pour la gestion des ressources en eau (remplissage des réservoirs), par exemple. Le moment de la crue nivale l'est particulièrement parce que cette dernière contribue souvent de manière importante au débit annuel total. Le moment de la crue nivale peut être plus sensible aux températures qu'aux précipitations parce qu'il est lié à l'accumulation et à la fonte des neiges. Il peut de plus constituer un bon indicateur des impacts du changement climatique sur l'hydrologie. Burn (1994) a analysé les données à long terme consignées pour 84 bassins hydrographiques non régularisés allant du nord-ouest de l'Ontario à l'Alberta dans le but de relever les changements dans le moment de la crue nivale. Dans l'échantillon, les cours d'eau les plus nordiques montraient une tendance à une crue nivale plus hâtive; les impacts sur le moment de survenue étaient toutefois plus marqués dans la portion récente des données. Le ruissellement printanier s'est produit de plus en plus tôt au cours des dernières années, ce qui peut être attribuable à des températures printanières plus élevées. La figure 1.8 montre un fort degré de coïncidence entre le moment de la crue nivale de la rivière Bow (Alb.) et la hausse des températures printanières régionales (*idem*).

Les tendances du débit du Saint-Laurent (à la hauteur de Cornwall) sont illustrées à la figure 1.9. Depuis 1860, il s'est produit deux grandes périodes de bas débit : les années 30 et les années 60. La moyenne à long terme est d'environ 7 000 mètres cubes à la seconde. Le débit fluvial est supérieur à cette moyenne à long terme pour la période récente (1970 à 1990).

**Figure 1.8 Tendances de la crue nivale de la rivière Bow et des températures printanières régionales (Burn, 1994)**

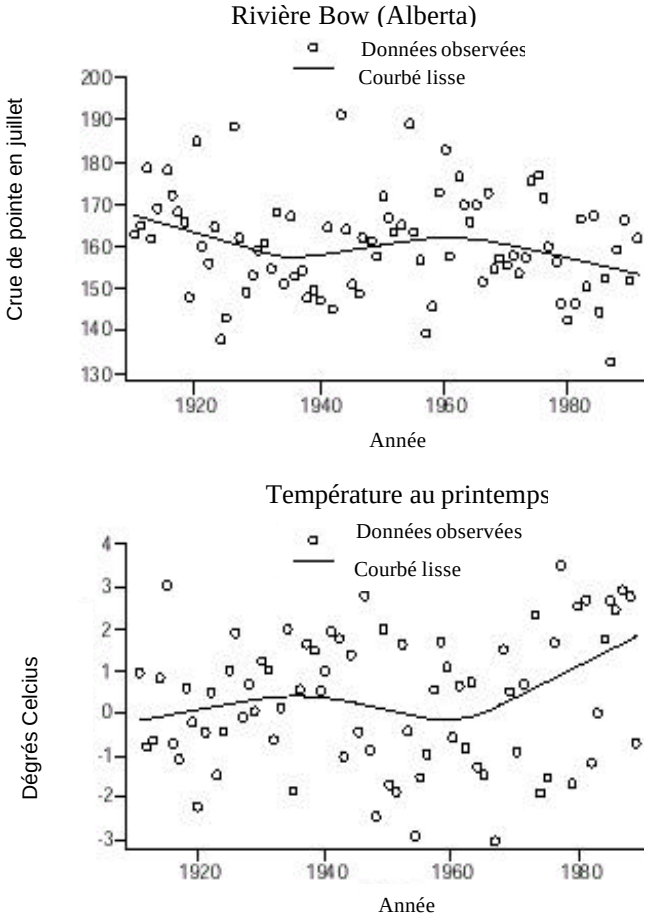


**Figure 1.9 Tendances du débit fluvial du Saint-Laurent à la hauteur de Cornwall (1861-1994) et de Ville Lasalle (1955-1994)** (Environnement Canada, 1994b)

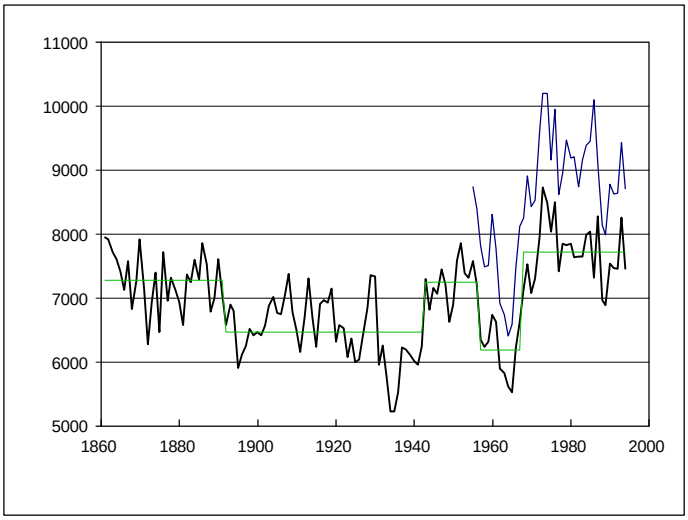
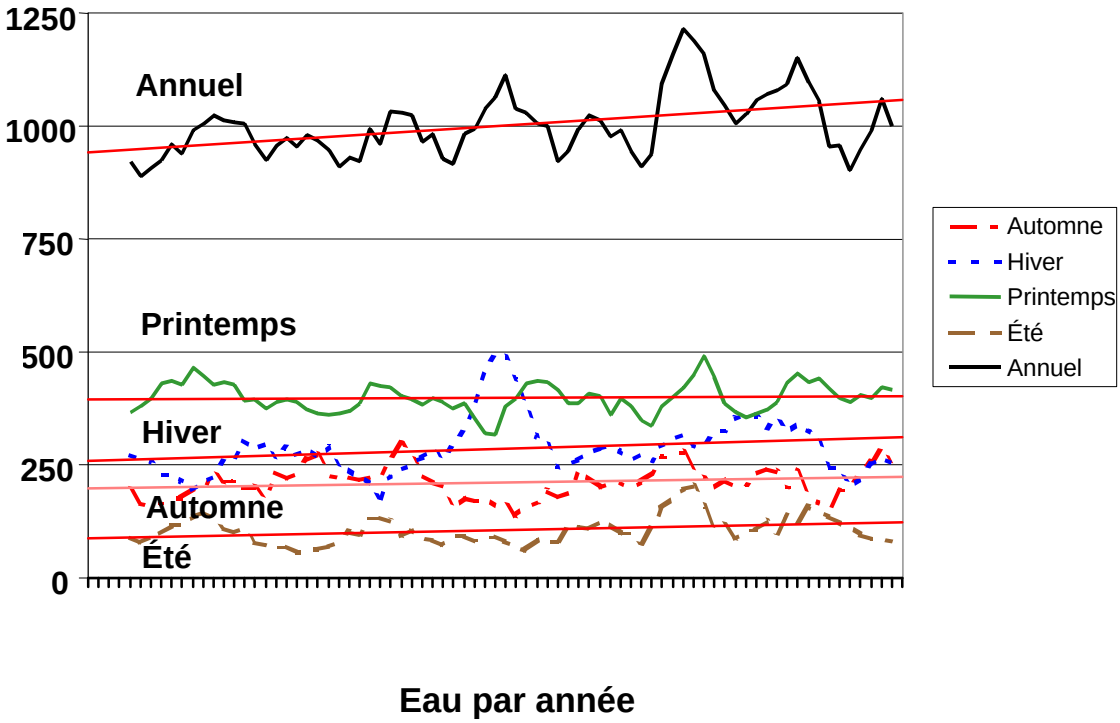



**Figure 1.10 Ruissellement saisonnier et annuel (moyennes mobiles pour cinq ans) pour la rivière St. Mary's (N.-É.)** (Clair *et al.*, 1997, 63)



## Tableau 1.8 Études canadiennes d'impact du climat sur l'hydrologie - Revue des scénarios, méthodes et impacts

| Auteurs | Bassin hydrographique | Scénario climatique | Changements annuels de scénario de temp. et précip. | Impacts hydrologiques (annuels) | Modèle hydrologique |
|---|---|---|---|---|---|
| **Canada** | | | | | |
| Mcmillan et Pynes, 1994 | Rivière Oldman (Alberta) | • analogues sur dix ans (temp. et précip.)<br>• GISS87<br>• GFDL87<br>• OSU88 | • analogues sur dix ans (temp. et précip.)<br>• +6 °C, +11 %<br>• +6,2 °C, +2 %<br>• +2,8 °C, +6 % | débit fluvial :<br>• -19,5 à + 6,1 % | empirique : ruissellement fonction des temp. et précip. (Langbein) |
| Zadeberg, 1990 | Rivière Watson (Manitoba) | • hypothétique | • -2 °C, +20 %<br>• +2 °C, -20 % | ruissellement :<br>• +79 à 950 %<br>• -69 % à -61 % | bilan hydrologique : ruissellement fonctionnel (Langbein) |
| | | • GFDL30<br>• GISS34 | • +2,8 °C, +48 %<br>• +4,5 °C, +10 % | • +53 %<br>• -5 à -11 % | |
| Coulson, 1997 | Colombie-Britannique (19 stations de bassins hydrogr.) | • CCC92 | | ruissellement :<br>• -25 mm à + 84 mm | bilan hydrologique de Thornthwaite |
| Cohen et al., 1985; Cohen, 1991 | Rivière Saskatchewan | • GFDL30<br>• GISS34<br>• OSU88<br>• GFDL87<br>• GISS87 | • +2,2 °C, +18 %<br>• +4 °C, +19 %<br>• +3,0 °C, +8 %<br>• +6,7 °C, +7,5 %<br>• +6 °C, +19 % | ruissellement (irrigation faible et élevée) :<br>• -66 %, -70 %<br>• +33 %, +40 %<br>• +2 %, +4 %<br>• -27 %, -35 %<br>• +23 %, +35 % | bilan hydrologique de Thornthwaite |
| **Centre du Canada** | | | | | |
| Ordey, 1990; 1992 | Bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent | • GISS34<br>• GFDL87<br>• OSU88 | • +4,3 à +4,7 °C; -7,3 à +18 %<br>• +5,7 à +7,2 °C; -4,8 à -7 %<br>• 3,2 à 3,5 °C, +5,8 à +8 % | ruissellement :<br>• -2,8 à +1 %<br>• 0,8 à 8 %<br>• -19,8 à -28 % | modèle de ruissellement à grand bassin |
| Walker, 1996 | Bassin de la baie de Quinte (Ontario) | • CCC92 | • 1,6 à 5,6 °C | ruissellement :<br>• -12 % | programme de simulation hydrologique - FORTRAN (HSPF) |
| Sanderson et Smith, 1993; Smith et McBean, 1993 | Rivière Grand (Ontario) | • GISS87<br>• GFDL87<br>• CCC92 | • +4,7 °C, +1,9 %<br>• +5,3 °C, +0,4 %<br>• +5,7 °C, -6,3 % | ruissellement :<br>• -11 %<br>• -21 %<br>• -22 % | bilan hydrologique de Thornthwaite empirique ; modèle HELP |
| Martineau et Bultsky, 1992; Bultsky et Martin, 1996 | Rivière Moisie (Québec) | • CCC92<br>• 4 bassins hydrométriques (UKTR, GFDL, ECHAM1-H) | • +2,2 °C, +1,1 %<br>• voir 2.3.4.2 | ruissellement :<br>• -5,0 %<br>• voir 2.3.4.2 | CEQUEAU conceptuel |
| **Atlantique** | | | | | |
| Ng et Marsalek, 1992 | Rivière Waterford (Terre-Neuve) | • hypothétique | • +1, +2, +3, +4 °C<br>• 5, 10, 20 % | • débit de pointe accru<br>• modification du moment | Programme de simulation hydrologique - FORTRAN (HSPF) |
| **Nord canadien** | | | | | |
| Singh, 1987; 1988 | • Rivière La Grande<br>• Rivière Caniapiscau<br>• Rivière Opinaca-Eastmain (Québec) | • GISS34<br>• GFDL30 | | ruissellement :<br>• +15,5 à +16,5 %<br>• +13,0 à +15,7 %<br>• +20,2 à +6,7 % | Bilan hydrologique |
| Soulis et al., 1994 | Fleuve Mackenzie | • composite<br>• GFDL(R30)<br>• CCC92 | • +3,5 °C, +10 %<br>• +6,0 °C, +3 %<br>• +3,5 °C, +3 % | ruissellement :<br>• +7,1 %<br>• -7,1 %<br>• -37 % | Approche de maillage carré modifié |

Tendances du ruissellement

Les tendances du ruissellement annuel et saisonnier (moyennes mobiles sur cinq ans) pour le bassin de la rivière St. Mary's (Nouvelle-Écosse) sont présentées à la figure 1.10. On remarque une longue période de plateau ou de hausse légère jusqu'en 1970, année à partir de laquelle le ruissellement augmente de façon très marquée et s'accompagne d'une variabilité accrue (Clair *et al.*, 1997). Une analyse des données des vingt-cinq dernières années montre que le ruissellement a tendance à être plus faible en hiver et à présenter une diminution moins prononcée en été. Au cours de la même période, la saison de glace a été plus longue dans les rivières (*idem*).

Une analyse des tendances pour seize bassins hydrographiques du sud des Prairies (écoulement naturel) indique une tendance modérée à un ruissellement annuel accru des bassins dans la région herbagère du sud des Prairies, comparativement à une diminution modérée dans la région herbagère du nord des Prairies (Wiens, 1991)

Impacts du changement climatique sur l'écoulement fluvial et le ruissellement

Les scénarios de changement climatique utilisés pour l'étude d'impact hydrologique ont été élaborés à partir des sorties de MCG (climat à l'équilibre et aux états transitoires), de changements hypothétiques de la température et des précipitations, et d'analogues de transposition spatiale (Mortsch et Quinn, 1996). Les données climatiques actuelles utilisées comme données d'entrée des modèles hydrologiques ont été rajustées ou remplacées par ces scénarios pour pouvoir étudier la réponse du système hydrologique telle qu'elle est décrite par les modèles. On trouvera au tableau 1.8 un résumé des travaux de recherche récents effectués au Canada sur les impacts hydrologiques du changement climatique. Le tableau dresse un inventaire des bassins étudiés, et des méthodes et scénarios utilisés, et présente certains des impacts annuels que ces travaux ont permis de déterminer. Dans l'ensemble, l'impact du changement climatique sur le ruissellement et l'écoulement fluvial varie d'une région à une autre. Si la tendance générale va dans le sens de hausses annuelles des températures et des précipitations, les résultats obtenus pour ce qui est du ruissellement incluent tant des augmentations que des diminutions, et dépendent de la région et du scénario considérés.

Une des difficultés inhérentes aux évaluations de l'impact du climat est le retard avec lequel les progrès de la recherche en modélisation MCG sont incorporés aux études. Il en résulte qu'aucune étude canadienne n'utilise les versions les plus récentes des MCG, lesquelles incluent les effets du refroidissement par les aérosols. Le tableau 1.8 permet également de constater l'existence de lacunes régionales, notamment en ce qui concerne l'étude des bassins hydrologiques de l'est de l'Arctique et des provinces de l'Atlantique.

Différents scénarios et modèles hydrologiques ont été utilisés comme méthodes d'évaluation des impacts hydrologiques, dans les études considérées. De nombreux défis méthodologiques se posent. La plupart des études ont utilisé les liens empiriques entre les températures et les précipitations d'une part, et le ruissellement d'autre part, et/ou l'approche de bilan hydrologique comme méthodes de modélisation. Seules quelques études ont été basées sur des modèles conceptuels (Ng et Marsalek, 1992; Walker, 1996; Morin et Slivitzky, 1992; Slivitzky et Morin 1996). La majorité des scénarios de changement climatique utilisés ont consisté à appliquer

différents changements hypothétiques des températures et des précipitations, ou les résultats de MCG à l'équilibre. Des changements mensuels (différences et rapports) des valeurs actuelles ont été utilisés. Il est à noter que les différentes méthodes ont recours à des modifications des valeurs moyennes seulement (p. ex., températures et précipitations moyennes); la variabilité demeure inchangée. À l'heure actuelle, la résolution spatiale des MCG ne permet pas d'élaborer des scénarios de précipitations extrêmes, qui sont d'une importance critique pour la modélisation des inondations extrêmes et des impacts connexes. Les scénarios de transposition spatiale prévoient pour leur part une évolution tant des moyennes que de la variabilité, mais un certain nombre de mises en garde doivent être faites quant à l'interprétation des résultats (Mortsch et Quinn, 1996). Les changements de la variabilité sont plus importants que les changements des moyennes, pour ce qui est de la gestion des ressources en eau (Katz et Brown, 1992). La résolution spatiale des scénarios est également importante. La résolution des MCG est trop grossière pour l'étude de nombre de petits bassins hydrologiques. De « meilleurs » scénarios de changement climatique sont vus par les spécialistes du domaine comme essentiels aux activités prévisionnelles. Les modèles régionaux peuvent combler certains des besoins en matière de résolution spatiale, mais la question de l'échelle temporelle ne sera pas résolue avant un certain temps. Les chercheurs doivent toutefois reconnaître que les études de sensibilité hydrologique régionale peuvent jouer un rôle précieux dans l'évaluation des impacts du climat.

Les impacts du changement climatique sur le ruissellement et l'écoulement fluvial sont importants. Le changement climatique aurait un effet sur l'ordre de grandeur des écoulements moyens, minimaux et extrêmes, ainsi que sur leur distribution temporelle et leur durée. Des changements régionaux des ressources en eau sont également à prévoir. Les changements hydrologiques saisonniers incluent :

- des augmentations possibles du ruissellement hivernal par suite de températures de l'air plus élevées et des pluies plus fréquentes en résultant;
- une quantité moindre de précipitations stockées dans le manteau nival;
- des diminutions du volume du ruissellement printanier en raison de la réduction du manteau nival;
- une survenue plus hâtive des crues printanières en raison d'un réchauffement printanier précoce;
- une baisse supplémentaire des débits d'étiage d'été et d'automne par suite d'une évapotranspiration plus élevée et de contributions moindres à l'écoulement souterrain;
- un allongement des périodes de débit d'étiage estivales et automnales (Leavesley, 1994).

Les évaluations d'impact indiquent également la possibilité d'une variabilité accrue des écoulements. En premier lieu, les diminutions de l'écoulement annuel moyen semblent indiquer une baisse de la persistance de l'écoulement attribuable à un débit de base moindre et à une évapotranspiration accrue; les périodes de débit d'étiage augmentent en fréquence et en durée. Cependant, des pluies ou des chutes de neige extrêmes pourraient causer davantage de ruissellement et d'inondations extrêmes (GIEC, 1996; Whetton *et al.*, 1993).

De nombreuses études ont été consacrées aux impacts du changement climatique sur l'écoulement fluvial et le ruissellement. Certains des détails des évaluations canadiennes sont résumés ci-dessous. À la suite de l'estimation de l'écoulement fluvial effectuée à Le Pas, sur la

rivière Saskatchewan, dans le cadre de laquelle ont été utilisés les résultats de trois scénarios de MCG, ainsi que le modèle de bilan hydrologique de Thornthwaite, Cohen *et al.* (1989) ont indiqué que selon le scénario du GISS, l'écoulement augmentait d'environ 15%, tandis que, selon le scénario du GFDL, il diminuait de près de 20 %; et, que selon le scénario de l'OSU, il demeurait stable. L'incertitude des impacts des scénarios complique la prise de décisions en matière de planification des ressources en eau.

Ng et Marsalek (1992) ont étudié la sensibilité des simulations d'écoulement fluvial aux changements dans les données d'entrée climatiques pour un petit bassin hydrographique présentant des chutes de neige abondantes et un taux élevé de conversion des précipitations en écoulement fluvial (plus de 80 %). Dans les expériences de simulation, des changements hypothétiques des températures et des précipitations ont été incorporés à une période de simulation de 29 mois. Les auteurs ont évalué les impacts sur l'écoulement fluvial annuel, sur les écoulements saisonniers et mensuels, et sur l'écoulement maximal mensuel (*idem*). Leurs principales conclusions sont :

- les hausses de température ont eu une incidence négligeable sur l'écoulement fluvial annuel; elles ont mené à un ruissellement d'hiver plus important et plus hâtif lorsque les précipitations étaient stockées dans le manteau nival, et à des écoulements maximaux d'hiver/printemps accrus;
- les effets des fluctuations des précipitations ont été plus directs ; les changements de l'écoulement annuel et saisonnier ont été directement proportionnels aux changements des précipitations, et les valeurs de pointe mensuelles ont augmenté presque deux fois plus que les précipitations.

Dans le cadre de l'étude effectuée pour la Colombie-Britannique et le Yukon, les données climatiques de 18 stations ont été modifiées conformément au scénario MCGII $2xCO_2$ du CCC pour permettre l'évaluation de la réponse hydrologique au réchauffement. La méthode du bilan hydrologique indique une augmentation du ruissellement annuel, hivernal et printanier. Le débit d'étiage estival se produirait plus tard dans le sud de la Colombie-Britannique, et légèrement plus tôt dans le nord de la province et le sud du Yukon. Les crues de printemps augmentent et se produiraient jusqu'à un mois plus tôt (Coulson *et al.*, 1997).

Nkemdirim et Purves (1994) ont pour leur part cherché à estimer les impacts possibles sur l'écoulement dans le bassin de la rivière Oldman, en Alberta, à l'aide d'une approche basée sur les analogues. Ils ont analysé les données historiques de températures et de précipitations pour trois stations dans le but de trouver des valeurs coïncidant avec celles générées au moyen des MCG du GISS, du GFDL et de l'OSU. Selon leurs conclusions, une hausse de 1 $^{o}$C de la température annuelle moyenne au cours d'une période de cinq ans, combinée à des précipitations normales, entraînerait une réduction de l'écoulement fluvial de 15 % par année, alors qu'une augmentation de 1% des précipitations combinée aux températures actuelles mènerait à une augmentation de 1% de l'écoulement fluvial.

Le scénario de changement climatique MCGII du CCC a été appliqué au Programme FORTRAN de simulation hydrologique (HSPF) pour le bassin de la baie de Quinte. Les résultats obtenus indiquent des hausses de la température de l'air de l'ordre de 1,6 à 9,6 °C. On remarque en outre

une réduction du ruissellement global vers la baie de Quinte de l'ordre de 12 %. Des modifications majeures du ruissellement ont également été enregistrées pour l'ensemble de l'année hydrologique; il est passé d'un faible débit d'hiver avec gel et accumulation de neige, fonte rapide et crue nivale à un ruissellement caractéristique d'un scénario $2xCO_2$, dans lequel les chutes de neige font place à des pluies plus abondantes, des événements de ruissellement fréquents et une crue nivale mineure. La fréquence des sécheresses augmente, mais les débits extrêmes demeurent similaires. Les résultats à long terme indiquent une hausse des concentrations en phosphore d'environ 8 % dans les eaux de ruissellement. Cette hausse serait due à une réduction du débit, plutôt qu'à une augmentation des charges en polluants phosphorés entraînées vers la baie (Walker, 1996).

À la suite d'une évaluation d'impact réalisée pour la région du Mackenzie, Soulis *et al. (*1994) et Kerr (1997) ont signalé que l'application des scénarios CCC et GFDL, ainsi que des scénarios composites, a généré une hausse des précipitations dans tous les cas. Ces précipitations accrues auraient dû se traduire par une augmentation du ruissellement mais, dans les deux scénarios de MCG, l'évapotranspiration plus abondante a mené à des débits plus faibles et à un niveau des lacs plus bas. En outre, le déglacement printanier s'est produit plus tôt et les débits ont été plus élevés.

Le Saint-Laurent : étude de cas d'un grand cours d'eau

Un certain nombre des activités qui se déroulent dans le Saint-Laurent entre la décharge du lac Ontario et la ville de Québec sont sensibles à des bas niveaux d'eau, et des diminutions des débits et des niveaux d'eau ont des impacts considérables. La navigation de plaisance, très importante pour l'économie locale, y est particulièrement sensible; Bergeron (1995) a, par exemple, montré qu'il s'était produit une augmentation des accidents de navigation de plaisance au cours des années de bas niveau d'eau de 1988 et 1989. La production d'énergie hydroélectrique à la centrale de Beauharnois, à la décharge du lac Saint-François, est directement liée au débit du Saint-Laurent; sa production annuelle pour la période de 1943 à 1991 a été de 12,4 térawatts-heures (TWh), soit environ 7,2 % de la production totale du réseau d'Hydro-Québec.

La réussite économique du port de Montréal, qui génère quelque 1,2 milliard de dollars annuellement en activités commerciales, est étroitement liée à la fréquence des bas niveau d'eau (*idem*). Ainsi, la baisse additionnelle d'environ 30 cm survenue au cours de la période de bas niveau d'eau de 1988 à 1991 a entraîné une diminution d'environ 15 % du tonnage annuel moyen (550 000 tonnes) manutentionné par le port.

En aval de Montréal, le lac Saint-Pierre alimente actuellement une importante industrie de la pêche en eau douce; en 1992, les quantités débarquées ont atteint 572 tonnes, pour une valeur commerciale de 1,7 million de dollars, ce qui représente 60 % des prises totales en eau douce effectuées dans le fleuve (Centre Saint-Laurent, 1996). Les niveaux d'eau élevés du printemps aident les poissons à remonter le fleuve jusqu'aux frayères, à l'embouchure des rivières, et assurent une productivité soutenue.

**Figure 1.11 Niveaux d'eau trimestriels (SRIGL 1985) au port de Montréal, jetée n° 1, au cours des années 30, en fonction du régime actuel de régularisation du lac Ontario (plan 58D), et niveau de référence.** (avec la permission de Michel Slivitzky)

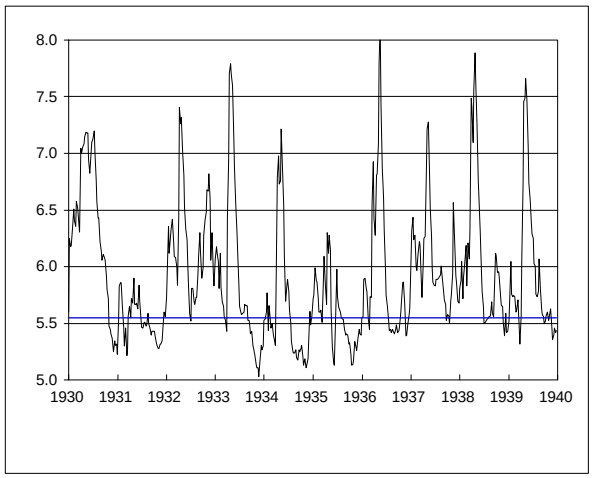



**Tableau 1.9 Débits du Saint-Laurent à la hauteur de Montréal - Conditions historiques et associées à un scénario 2x$CO_2$ (débits mensuels en $m^3/s$)**(Étude concernant les fluctuations du niveau des eaux, 1993)

| | 1900-1990 | 2x$CO_2$ | Différence |
|---|---|---|---|
| **moyenne** | 8 200 | 5 100 | -3 100 |
| **maximum** | 12 800 | 7 600 | -5 200 |
| **minimum** | 5 900 | 3 300 | -2 600 |

On a présenté à la figure 1.9 la courbe des débits du Saint-Laurent à la hauteur de Cornwall pour la période de 1861 à 1994, et de Ville de Lasalle pour la période de 1955 à 1994. Depuis le milieu des années 70, les débits moyens des Grands Lacs ont été parmi les plus élevés de l'histoire, tandis que les années 30 et 60 ont connu des périodes continues de bas niveaux d'eau. Une analyse de l'historique des bas débits au cours des années 30 montre que, pour cinq de ces années (figure 1.11), le niveau hebdomadaire moyen au Port de Montréal aurait été en deçà du niveau de référence pendant des périodes de 20 à 28 semaines, et ce, en supposant un régime de régularisation du lac Ontario identique au régime actuel.

Les niveaux et conditions d'écoulement actuels seraient entièrement transformés, si les scénarios de changement climatique de type 2x$CO_2$ se matérialisaient. Le tableau 1.9 montre la différence entre les débits moyens mensuels et extrêmes dans les conditions d'écoulement actuelles à long terme, et les débits qui prévaudraient dans des conditions associées à un scénario 2x$CO_2$ (Étude concernant les fluctuations du niveau des eaux, 1993). Les débits et niveaux d'eau moyens pourraient baisser en deçà des minimums historiques, et les débits maximaux pourraient être inférieurs au débit moyen actuel. Un tel scénario de changement climatique entraînerait une réduction de la production d'énergie de l'ordre de 38 %, ou 4,7 TWh, à Beauharmois. En outre, une baisse annuelle moyenne du débit d'environ 3 100 $m^3/s$ pourrait réduire la fourchette des niveaux d'eau du port de Montréal d'environ 1,25 m, ce qui aurait un effet catastrophique sur son commerce outre-mer. Les impacts et les mesures d'adaptation pourraient être dramatiques, incluant des travaux sans précédent de dragage du chenal, et la construction de barrages et d'écluses en aval de Montréal qui pourraient transformer complètement le fleuve. Une diminution des débits de printemps d'environ 5 000 $m^3/s$ dans le lac Saint-Pierre réduirait le niveau des hautes eaux de quelque 1 m à 1,4 m, et compromettrait gravement la productivité des pêches en eau douce.

La rivière Moisie (Québec) : étude de cas

Le bassin de la rivière Moisie, sur la rive nord du Saint-Laurent, présente une orientation générale nord-sud, s'étend sur une longueur de 320 km et une largeur de 70 km, et couvre une superficie de 19 250 $km^2$. Son hydrologie est caractéristique de celle de l'ensemble de la rive nord, laquelle fournit près de 41 % de la production hydroélectrique totale d'Hydro-Québec.

L'information climatologique est disponible pour les stations de Sept-Îles (à l'extrémité sud du bassin) et de Wabush (à l'extrémité nord). Les températures normales annuelles y sont de +1,1 et -3,8 °C, respectivement, et les précipitations annuelles atteignent 1 125 et 895 mm. Le ruissellement annuel moyen de la rivière, près de Sept-Îles, est d'environ 720 mm.

Morin et Slivitzky (1992) ont utilisé le MCG du Centre climatologique canadien (CCC), de pair avec le modèle hydrologique conceptuel CEQUEAU (Morin et Couillard, 1990), pour évaluer l'impact possible d'un scénario $2xCO_2$ sur le régime hydrologique de la Moisie. Slivitzky et Morin (1996) ont appliqué la même méthode aux résultats de trois scénarios de changement climatique d'expériences de changement climatique transitoire réalisées avec des MCG couplés océan-atmosphère par le United Kingdom Meteorological Office (UKTR) en Angleterre, le Max Planck Institute en Allemagne (ECHAM1-A) et le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory aux États-Unis (GFDL89).

Pour simuler les débits quotidiens dans des conditions de changement climatique et calculer l'impact sur le ruissellement, Morin et Slivitzky ont appliqué les changements mensuels des températures et des précipitations générés par les MCG aux valeurs quotidiennes observées pour la période de 1966 à 1989. Le tableau 1.10 présente les résultats de la passe de contrôle hydrologique, du modèle MCGII du CCC et des trois scénarios aux états transitoires. Les différences moyennes de températures et de précipitations générées par les scénarios climatiques sont présentées dans les colonnes trois et quatre, tandis que la colonne cinq donne les valeurs du ruissellement annuel moyen produites par le modèle de simulation hydrologique. Les résultats du modèle MCGII du CCC coïncident avec ceux du scénario $2xCO_2$. Pour ce qui est des modèles aux états transitoires, les trois prévoient des hausses de la température mondiale d'environ 1,16 °C pour la décennie 2, et un réchauffement planétaire d'environ 2 à 2,5 °C pour la décennie 3.

Les différences dans le ruissellement sont petites et se situent probablement dans les limites de précision des diverses méthodes d'interpolation et de simulation. Étant donné la définition régionale des quatre scénarios de changement climatique examinés, les moyennes annuelles à long terme du ruissellement dans le bassin de la rivière Moisie pourraient ne pas être touchées de manière significative. Les effets pourraient être comparables dans des régions similaires de la rive nord du Saint-Laurent.

Morin et Slivitzky (1992) ont analysé en détail les changements hydrologiques mensuels susceptibles de se produire dans le cas d'un scénario $2xCO_2$ du CCC; le même type de résultats est généré par les trois scénarios aux états transitoires. Le ruissellement de printemps se produit plus tôt en raison des températures hivernales plus élevées, tandis que les augmentations sont principalement causées par une fonte accrue résultant d'une hausse des précipitations pendant l'hiver. Les diminutions observées en été et à l'automne sont attribuables à une baisse des précipitations estivales, ainsi qu'à l'augmentation des températures et de l'évapotranspiration au cours de l'été et de l'automne.

**Tableau 1.10 Impacts hydrologiques de différents scénarios de changement climatique sur la rivière Moisie**

| | | Différences dans les températures | Différences dans les précipitations | Ruissell. | Différences dans le ruissellement |
|---|---|---|---|---|---|
| Modèle | Période | (ºC) | (mm) | (mm) | (%) |
| Passage de base | 1966-89 | ---- | ---- | 715 | ---- |
| CCC | 2x$CO_2$ | +4,2 | +1,1 % | 679 | -5,0 |
| ECHAM1-A | Décennie 2 | +0,5 | +20 | 754 | +4,2 |
| ECHAM1-A | Décennie 3 | +0,6 | -2 | 704 | -1,5 |
| UKTR | Décennie 2 | +2,9 | +62 | 756 | +5,7 |
| UKTR | Décennie 3 | +4,2 | +80 | 760 | +6,3 |
| GFDL89 | Décennie 2 | +1,5 | -4 | 719 | +0,6 |
| GFDL89 | Décennie 3 | +3,4 | +110 | 796 | +11,3 |

Changements de la variabilité hydrologique

La variabilité hydrologique augmentera vraisemblablement dans une bonne partie du pays selon différents scénarios de changement climatique. Il est probable que l'intensité et la variabilité accrues des précipitations mèneront à des inondations plus importantes et/ou plus fréquentes et graves (GIEC, 1996).

La variabilité hydrologique plus accentuée altérera les caractéristiques physiques, la qualité de l'eau et les communautés biologiques des écosystèmes aquatiques. Ces changements imposeront de recourir à des méthodes modifiées de gestion de l'eau. Les changements physiques causés par la variabilité hydrologique accrue incluent une érosion des rives des cours d'eau, et une augmentation de la quantité de charges solides et de la sédimentation des chenaux (GIEC, 1996). Ces impacts seront vraisemblablement plus accentués dans le cas des cours d'eau des régions arides, où la végétation riveraine est clairsemée (GIEC, 1996, 349, Grimm *et al.*, 1997), ainsi que dans les régions agricoles pendant l'hiver, alors que les sols sont davantage exposés (GIEC, 1996). Plus particulièrement, la variabilité aura un impact sur i) la qualité de l'eau, ii) la productivité et la biodiversité des cours d'eau, et iii) les activités de gestion de l'eau.

Qualité de l'eau

La variabilité accrue de l'hydrologie modifiera probablement la qualité de l'eau de plusieurs façons. Les sécheresses estivales étant plus graves, on devrait observer des concentrations plus faibles d'oxygène dissous, et des concentrations plus fortes d'éléments fertilisants et de contaminants (Schindler, 1996). L'ampleur et la fréquence accrues des inondations feront augmenter le volume des charges solides de sédiments, d'éléments fertilisants et de contaminants provenant des régions agricoles et urbaines (GIEC, 1996). Au Canada, ces changements dans la qualité de l'eau seront probablement plus accentués dans les régions urbaines densément peuplées et dans les régions d'agriculture intensive.

Productivité et biodiversité

L'accroissement de la variabilité hydrologique pourrait faire baisser la productivité et la biodiversité dans les cours d'eau au Canada. Les inondations plus importantes augmenteront vraisemblablement l'affouillement des lits des cours d'eau, les charges solides et la sédimentation. Ces facteurs ont tendance à réduire l'abondance d'organismes et l'habitat disponibles pour le rétablissement des colonies dans les petits cours d'eau. Des sécheresses plus graves mènent à une détérioration de la qualité de l'eau (faibles concentrations d'oxygène dissous, températures et concentrations de contaminants plus élevées) et augmentent la probabilité d'une aridisation. Les organismes se concentrent dans des refuges (p. ex., dans des fosses plus profondes) pendant les périodes de débits extrêmement bas, ce qui augmente la probabilité qu'ils soient éliminés par prédation ou concurrence intense.

Changements en matière de gestion de l'eau

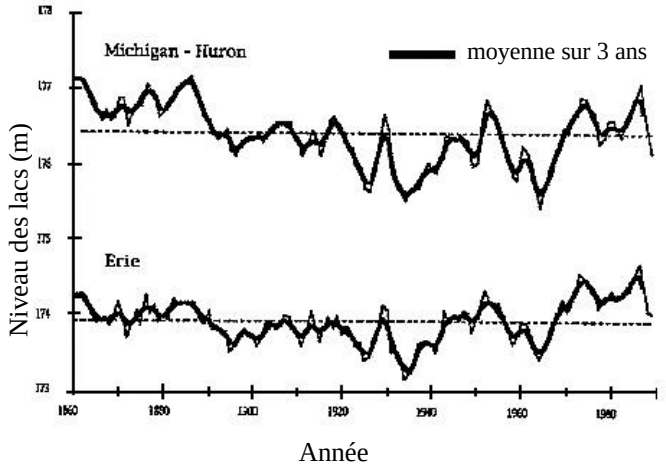
La variabilité hydrologique accrue aura des incidences importantes sur la gestion des ressources en eau au Canada. Des inondations plus fréquentes ou plus graves nécessiteront des dépenses accrues pour la gestion des inondations, et exerceront des pressions additionnelles sur les finances publiques et l'industrie de l'assurance (GIEC, 1996). La gravité et l'ampleur accrues des inondations exigeront une modification des structures de lutte contre les inondations en fonction des débits de pointe supérieurs prévisibles.

***Lacs***

Tendances du niveau d'eau des Grands Lacs

Les changements climatiques ont un impact sur les entrées et les sorties d'eau des lacs, sur l'approvisionnement net en eau des bassins et sur le niveau des lacs. On distingue trois grands types de fluctuations du niveau de l'eau : les variations à court terme dues aux ondes de tempête, les variations saisonnières et les variations annuelles. Historiquement, la fourchette de fluctuation des niveaux d'eau annuels dans les Grands Lacs a été de l'ordre d'environ 1,8 m. Il y a eu des périodes de niveaux extrêmement bas dans les années 30 et les années 60 et, depuis la fin des années 60, une période du haut niveau qui a culminé avec les records atteints en 1986 (figure 1.12, séries chronologiques du niveau des lacs Michigan-Huron et Érié). Une sécheresse survenue de 1987 à 1990 a occasionné des baisses majeures du niveau des lacs, mais les lacs Michigan, Huron et Érié sont demeurés au-dessus de la moyenne à long terme. Des cycles saisonniers (0,3 à 0,4 m) se superposent aux niveaux annuels; de manière générale, les niveaux sont à leur minimum en janvier ou février, puis augmentent sous l'effet de la fonte des neiges et des précipitations printanières pour atteindre un maximum en juin (Érié et Ontario) ou septembre (Supérieur). Une baisse de niveau saisonnière se produit à la fin de l'été et en automne (Hartmann, 1990b; Magnuson *et al.*, 1997). Les variations du niveau de l'eau ont des répercussions économiques et environnementales importantes.

**Figure 1.12 Niveaux annuels moyens des Grands Lacs** (Nuttle, 1993b, 5)




Changement climatique et niveau des Grands Lacs

Le tableau 1.11 résume les impacts de quatre scénarios de changement climatique de MCG liés aux modèles hydrologiques des Grands Lacs. Tous les scénarios prévoient une diminution générale du ruissellement annuel. Ils prévoient également une baisse des débits annuels moyens et des niveaux annuels moyens.

De manière générale, ces scénarios prévoient que les niveaux à long terme des Grands Lacs vont baisser jusqu'à leurs minimums historiques ou en-dessous. Dans le cas du lac St. Clair, le scénario MCGII du CCC suggère une réduction de 15 % de la superficie et de 37 % du volume, son niveau moyen pouvant baisser de 1,6 m, ce qui reculerait la ligne de rivage de 1 à 6 km et exposerait le fond du lac (Lee *et al.*, 1996).

Les milieux humides, les frayères, la navigation de plaisance, la navigation commerciale et l'approvisionnement en eau des villes seraient touchés par la baisse des niveaux des lacs. La mise à découvert de sédiments toxiques et les mesures correctives à cet égard préoccupent également (Rhodes et Wiley, 1993). Dans les régions développées, l'adaptation à ces importants changements du niveau des lacs serait coûteuse; Chagnon (1993) a estimé que le coût du dragage, du remplacement des rampes d'accès et des quais, du déplacement des aménagements récréatifs, de la prolongation et de la modification des ouvrages de prise d'eau et d'évacuation des eaux usées pour une section de 110 km de la rive du lac Michigan incluant la ville de Chicago se situerait entre 298 et 401 millions de dollars US pour une baisse du niveau de 1,3 m, et entre 605 et 827 millions de dollars US pour une baisse de 2,5 m.

**Tableau 1.11 Impacts des divers scénarios MCG sur les Grands Lacs**

| | Scénarios MCG | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Lac/fleuve** | CCC | GFDL | GISS | OSU |
| **Modification du ruissellement annuel (en %)** | | | | |
| Supérieur | -12 | -26 | -2 | -8 |
| Michigan | -38 | -27 | -24 | -14 |
| Huron | -36 | -19 | -29 | -9 |
| Érié | -54 | -22 | -41 | -19 |
| Ontario | -34 | -28 | -33 | -7 |
| **Modification du débit moyen annuel (%), par rapport au niveau de référence** | | | | |
| Supérieur | -13 | - | -2 | -19 |
| Michigan-Huron | -33 | - | -25 | -20 |
| Érié | -40 | - | -32 | -23 |
| Ontario | -39 | - | - | - |
| Saint-Laurent à Montréal | -40 | - | - | - |
| **Modification du niveau moyen annuel (m), par rapport au niveau de référence** | | | | |
| Supérieur | -0,23 | - | -0,46 | -0,47 |
| Michigan-Huron | -1,62 | -2,48 | -1,31 | -0,99 |
| Érié | -1,36 | -1,91 | -1,16 | -0,87 |
| Ontario | -1,30 | - | - | - |
| Saint-Laurent à Montréal | -1,30 | - | - | - |
| **Modification de la température moyenne annuelle de l'eau de surface (°C)** | | | | |
| Supérieur | +5,1 | +7,4 | +5,6 | +4,8 |
| Michigan | +5,6 | +5,5 | +4,7 | +3,4 |
| Huron | +5,0 | +6,0 | +4,7 | +3,6 |
| Érié | +4,9 | +5,0 | +4,4 | +3,0 |
| Ontario | +5,4 | +5,9 | +4,9 | +3,6 |

(Mortsch et Quinn, 1996, 904)

Impacts du changement climatique sur les petits lacs

On estime qu'environ 25 000 lacs du delta du Mackenzie seraient sensibles aux impacts du changement climatique sur l'englacement des rivières, le débit du fleuve, le déglacement et les embâcles, le niveau de la mer, et l'ampleur et la fréquence des inondations (Marsh et Hey, 1989; Marsh et Schmidt, 1993). Les lacs du delta du Mackenzie sont très productifs en raison des inondations fréquentes du delta au printemps, qui assurent un apport en éléments nutritifs et en sédiments, et permettent le maintien du niveau des lacs perchés ou élevés, soit 33 % des lacs (Marsh et Hey, 1989). À l'heure actuelle, ces lacs sont inondés tous les deux à dix ans par le ruissellement de printemps, lui-même régi par le ruissellement nival des portions sud du bassin et les embâcles dans les principaux chenaux du delta. Le changement climatique pourrait altérer le bilan hydrologique des lacs entre les inondations, et réduire le débit et les niveaux d'eau dans le Mackenzie et son delta. Marsh et Lesack (1997) ont étudié l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de ces lacs entre les inondations, et ont modélisé les niveaux d'eau pour les lacs perchés. Les niveaux d'eau des lacs ont décru plus rapidement entre les inondations et un lac élevé type disparaîtrait en moins de dix ans. Ces lacs perchés du delta sont particulièrement vulnérables parce qu'ils présentent un bilan hydrologique légèrement négatif s'ils ne sont pas inondés par le Mackenzie pendant la crue du printemps (Marsh et Lesak, 1997).

Dans les provinces des Prairies, il existe un grand nombre de marécages semi-permanents alimentés par les eaux souterraines, les précipitations et la fonte des neiges, et susceptibles de s'assécher pendant les périodes de sécheresse grave (Poiani et Johnson, 1991; 1993a,b). Eilers *et al.* (1988) ont déterminé que, dans le centre nord des États-Unis, certains lacs de drainage et lacs d'infiltration sont sensibles aux précipitations; leur niveau a décru de façon importante pendant

la sécheresse de la fin des années 80. Également à cette époque, l'approvisionnement en eau du lac Old Wives a diminué considérablement, de sorte qu'en 1988, ce lac était complètement asséché (Wittrock et Wheaton, 1992). Les lacs de la Saskatchewan au sud de 53º N sont petits, peu profonds et salins (Wittrock et Wheaton, 1992). La variabilité climatique modifie les niveaux des lacs, et influe sur la salinité ainsi que sur la composition de la flore et de la faune (Hammer, 1990). Ces lacs sont vulnérables au changement climatique. Il nous faudra plus d'informations pour déterminer comment les changements dans les précipitations et l'évapotranspiration influeront sur l'approvisionnement en eau, la chimie et la biologie des lacs salins.

Le pergélisol prévient le mouvement hivernal des eaux souterraines; la fonte du pergélisol et l'approfondissement de la couche active mèneraient au drainage de l'eau des lacs nordiques. Les pertes d'eau seraient également accrues par une évaporation plus prononcée.

Seules des recherches limitées ont concerné l'impact du changement climatique sur les petits lacs.

### *Climat, échange thermique, structure thermique et glace de lac des lacs de grande superficie*

Les sections qui suivent décrivent l'importance et les impacts du climat et du changement climatique sur les échanges de chaleur, la structure thermique et la couverture glacielle des lacs de grande superficie.

#### Climat et échange de chaleur des lacs de grande superficie

Les échanges de chaleur des lacs jouent un rôle important dans la compréhension de la dynamique et de l'hydrologie des lacs, et des réponses des écosystèmes. La rareté des données rend cependant difficile l'évaluation des échanges calorifiques des lacs dans les régions éloignées. C'est pourquoi la majeure partie de la recherche sur les lacs de grande superficie au Canada a porté sur les Grands Lacs, pour lesquels il existe une abondance de données, et a ensuite été appliquée à d'autres régions du pays. Le présent exposé est axé sur les travaux relatifs au bilan thermique des lacs étendus et prend les Grands Lacs en exemple dans l'analyse des impacts possibles du changement climatique.

#### Stockage de chaleur et flux thermique

Schertzer (1997a) fournit une comparaison du flux thermique annuel moyen des Grands Lacs. De façon générale, les changements positifs surviennent de février à septembre principalement par transfert radiatif net, du fait que les échanges turbulents sont relativement réduits. Au cours du refroidissement automnal, par contre, les échanges turbulents plus importants mènent à des changements négatifs du stockage de chaleur, du fait que le transfert radiatif net est faible. La déperdition de chaleur maximale à la surface des lacs survient de décembre à janvier.

#### Impacts du changement climatique sur le bilan thermique des lacs de grande superficie

Différents scénarios de MCG et de transposition de climat (Schertzer et Croley, 1997a; 1997b) ont été utilisés dans le but de déterminer lesquels des impacts possibles du changement

climatique requièrent un calcul des composants du bilan thermique des lacs. Boyce *et al.* (1992) ont spécifiquement incorporé le scénario MCGII du CCC afin d'évaluer la réponse du lac Ontario aux pertes de refroidissement en eau profonde et au réchauffement planétaire. Le climat de référence a été établi à partir des données météorologiques et des flux de rayonnement détaillés (Davies et Schertzer, 1974) déterminés dans le cadre de l'Année internationale d'étude des Grands Lacs (IFYGL). La comparaison des conditions de changement climatique aux réponses du climat de référence (au moyen des données IFYGL) a indiqué que les changements du bilan thermique de la surface avaient occasionné des changements importants de la structure thermique des lacs. En particulier, les flux de rayonnement de grande longueur d'onde émis ou reçus par le lac ont augmenté de façon similaire, ce qui signifie que le changement climatique a une légère incidence sur le rayonnement net de grande longueur d'onde. D'avril à décembre, le refroidissement par évaporation a augmenté. Au cours des mois d'hiver, soit de janvier à mars, les changements, tant positifs que négatifs, ont été extrêmement variables. Le flux de chaleur sensible n'a pas varié beaucoup de mai à novembre, mais le flux de chaleur sensible descendant a augmenté de façon marquée pendant l'hiver (de janvier à avril). Les tests de sensibilité ont indiqué que le lac Ontario était beaucoup plus sensible aux élévations de la température de l'air au cours des mois d'hiver que les autres lacs, et plus à cette période qu'aux autres.

Climat et structure thermique des lacs de grande superficie

La température des lacs est une des variables limnologiques de base importantes pour comprendre les réactions physiques, chimiques et biologiques du milieu naturel, ainsi que pour définir l'habitat. La variabilité de cette température est largement tributaire tant de la diversité du climat que de leur morphométrie. Il existe environ deux millions de lacs d'eau douce au Canada, et on applique une classification thermique générale en lacs amictiques, monomictiques ou dimictiques pour les décrire. Le présent exposé porte sur la structure thermique des lacs de grande superficie en utilisant les Grands Lacs pour en décrire les caractéristiques et la variabilité de la stratification thermique. Les changements possibles de la structure thermique indiqués par les scénarios de changement climatique sont également étudiés.

Caractéristiques thermiques saisonnières

Les Grands Lacs, qui sont étendus et profonds, connaissent des changements saisonniers majeurs de l'apport thermique net et donc un cycle thermique annuel. Dans les conditions climatiques actuelles, les Grands Lacs sont des lacs dimictiques (il s'y produit un brassage du haut vers le bas deux fois par année, au printemps et à l'automne), le moment de survenue du processus étant lié aux fluctuations via la température de densité maximale (4 $^{o}$C). Pendant l'hiver, les eaux superficielles sont généralement toutes sous la température de densité maximale. Au printemps, l'eau proche des rivages se réchauffe progressivement jusqu'à dépasser les 4 $^{o}$C, et la barre thermique se forme et avance vers le milieu du lac (Rodgers, 1965). La disparition de la barre thermique marque le début de la stratification thermique et un abaissement progressif de la thermocline. À la fin de l'été, les lacs ont atteint leur point de stockage thermique maximal; le refroidissement de la surface qui se produit à l'automne met fin à la stratification thermique. La renverse d'automne marque la fin de la stratification estivale, et le refroidissement se poursuit jusque sous la température de densité maximale par le brassage en profondeur causé par les tempêtes d'automne.

Modélisation des températures

Des modèles de température unidimensionnels ont été largement appliqués aux Grands Lacs inférieurs pour l'analyse à long terme de la structure thermique. Par exemple, Lam et Schertzer (1987) ont simulé les profils verticaux des températures quotidiennes à l'échelle du bassin et du lac pour le lac Érié (1967-1983), et ont déterminé la profondeur et la variabilité mensuelles moyennes à long terme des interfaces épilimnion-mésolimnion et mésolimnion-hypolimnion dans les conditions climatiques actuelles, ainsi que la variation saisonnière de la température en fonction de la profondeur. Les caractéristiques de stratification des lacs de grande superficie ont été tirées de Croley *et al.* (1996) et Croley (1997b). Des modèles tridimensionnels d'ordre supérieur doivent habituellement être utilisés pour simuler la variation spatiale de la température verticale des lacs, mais les exigences relatives aux données et aux calculs sont plus rigoureuses. Des simulations à long terme combinées à des observations sont essentielles pour établir une climatologie de la structure thermique des lacs de grande superficie, ainsi que les réponses dynamiques de la température et des structures actuelles au forçage météorologique en surface. On connaît mal les changements possibles de la fréquence ou la variabilité des réponses hydrodynamiques des lacs à un climat modifié, ainsi que la façon dont cette modification influerait sur les composants de l'écosystème.

Impacts du changement climatique sur la structure thermique des lacs de grande superficie

Les lacs étendus sont essentiellement des intégrateurs des conditions climatiques. On peut donc avancer que les enregistrements thermiques à long terme des lacs grands et profonds aident à prévoir les variations en fonction des « normales » climatiques, de sorte que les écarts par rapport à la plage de valeurs ainsi définies indiqueraient une réaction à des conditions climatiques régionales modifiées. Une climatologie de la température des lacs (observations et simulations) est donc essentielle, non seulement pour les Grands Lacs, mais pour différents lacs de grande superficie situés à différentes latitudes et longitudes. On a effectué des projections des modifications possibles du régime physique de certains lacs en examinant leurs réactions à des conditions climatiques chaudes prises comme analogues du changement climatique (Rodgers 1987; Schertzer et Sawchuk, 1990), en appliquant des scénarios de MCG (Boyce *et al.*, 1993) et en appliquant des scénarios de transposition à la région des Grands Lacs (Croley, 1995). Schertzer et Croley (1997a et 1997b) ont fait un résumé de ces études. De manière générale, elles indiquent que le réchauffement climatique tel qu'il est simulé au moyen de scénarios MCGII du CCC (et d'autres) peut avoir une incidence significative sur l'hydrologie et la structure thermique des bassins et des lacs, en particulier dans les lacs et les baies vulnérables. Le réchauffement climatique peut augmenter l'évaporation des lacs, réduire l'approvisionnement net des bassins, et abaisser les niveaux et les débits des lacs. Les projections selon lesquelles des conditions climatiques plus chaudes pourraient réduire la fréquence des renverses de la colonne d'eau sont particulièrement préoccupantes du point de vue de la qualité de l'eau et de l'habitat. Dans nombre de scénarios, les températures de l'eau de surface pourraient ne pas baisser sous les 4 $^{o}$C (température de densité maximale), ce qui aurait des conséquences importantes sur l'environnement du fait que les renverses de printemps et d'automne sont importantes pour la distribution des nutriments, l'oxygénation de l'eau, etc. (Lam *et al.* 1987a et 1987b; Schertzer et Lam, 1991). Les simulations effectuées pour des lacs hypothétiques à différentes latitudes (Meyer *et al.*, 1994) corroborent certains des impacts du changement climatique suggérés par les

études sur les Grands Lacs, et semblent indiquer une sensibilité particulière au réchauffement près des régions de transition, aux latitudes comprises entre 30° et 45° N/S, et 65° et 80° N/S. Aux latitudes plus chaudes, les périodes de stratification pourraient être prolongées. Sous les latitudes élevées plus froides, la fréquence de la renverse pourrait augmenter et les lacs subpolaires, qui sont actuellement des lacs monomictiques froids, pourraient devenir dimictiques. La formation de la glace pourrait être réduite ou totalement éliminée dans les régions subpolaires.

Glace de lac

Le forçage climatique régional influe de façon considérable sur la dynamique de la couverture glacielle des lacs. Les chercheurs ont commencé à quantifier la relation entre les variables climatiques et la durée de la saison des glaces il y a plus de 50 ans, en Europe, dans le but d'aider la navigation et le transport, de disposer d'indicateurs possibles des tendances climatiques et d'aider à l'élaboration d'hypothèses de changement climatique (Walsh, 1995; Skinner, 1992). Les travaux ont porté sur le lien entre la température de l'air régionale et la date d'englacement, la date du déglacement et la durée du couvert glaciel. Bien que certains modèles basés sur les processus aient incorporé la dynamique de la croissance de la glace, la disponibilité des données sur l'épaisseur de la neige et des glaces est souvent un facteur limitatif (Varvus *et al.*, 1996; Gu et Stefan, 1990; Patterson et Hamblin, 1988).

Richards (1964) a montré que l'analyse des degrés-jours de gel permettait de prévoir la date d'englacement et de déglacement, ainsi que l'extension des glaces sur les Grands Lacs. Dans une revue de la littérature, Barry et Maslanik (1993) ont déterminé qu'un changement de 1 ºC de la température de l'air à l'automne ou au printemps occasionnait un décalage de quatre à six jours de la date moyenne d'englacement ou de déglacement. La date de déglacement est également fonction de l'épaisseur de la neige et de la glace, de l'albédo de la surface et de l'action mécanique (p. ex., le vent); elle ne constitue pas un indicateur climatique très efficace. En outre, il a été observé que la sensibilité du cycle de la couverture glacielle aux variations de la température de l'air augmentait avec la latitude (Walsh, 1995).

Il y a une concordance générale entre la température de l'air et les tendances de la couverture glacielle au Canada pour le dernier siècle. Ainsi, Williams (1971) a relevé une tendance à un déglacement plus hâtif et à une plus courte durée de la couverture pour les Grands Lacs entre 1870 et 1940, mais pas de tendance significative pour la période allant de 1940 à 1971. Hanson *et al.* (1992) ont observé une tendance marquée à un déglacement plus hâtif entre 1965 et 1990 sur les Grands Lacs (à l'exception du lac Ontario, pour lequel la tendance a été moins marquée). Skinner (1992) a relevé une tendance similaire dans le nord-ouest et le centre du Canada. Schindler *et al.* (1996) ont déterminé que la saison des glaces avait diminué de quinze jours depuis 1970, en raison d'un déglacement plus hâtif, dans la région des lacs expérimentaux du nord-ouest de l'Ontario, ce qui concorde avec l'analyse des lacs du Wisconsin (Anderson *et al.*, 1996; Robertson *et al.*, 1992). Ces tendances récentes ont été attribuées à des températures de l'air plus élevées au printemps et à un manteau nival inférieur à la moyenne (Schindler *et al.*, 1996; Walsh, 1995; Skinner, 1992).

Des travaux de modélisation limités ont été consacrés à l'effet du réchauffement climatique futur sur les glaces des lacs au Canada. Assel (1991) a appliqué une analyse des degrés-jours de gel et un modèle de la couverture glacielle aux lacs Érié et Supérieur, dans le cadre de scénarios de réchauffement $2xCO_2$ (U.S. EPA, 1989). Les résultats obtenus indiquaient l'absence de formation significative de glace en milieu de lac, et une réduction de la durée de couverture de cinq à treize semaines sur le lac Supérieur, et de huit à treize semaines sur le lac Érié. Dans les conditions climatiques actuelles, l'extension annuelle maximale de la glace pour l'ensemble des Grands Lacs survient vers la fin de février (Assel *et al.*, 1983). Elle se situe autour de 60 %, en moyenne, et peut varier d'environ 30 % pendant les hivers doux à plus de 90 % au cours des hivers rigoureux (Assel *et al.*, 1996).

Les recherches limitées sur les glaces au Canada sont souvent attribuées au manque de données regroupées à l'échelle nationale. Le Service de l'environnement atmosphérique tient à jour une base de données sur 250 lacs au Canada; l'information compilée inclut les dates de formation des premières glaces permanentes, d'englacement complet, des premiers signes de détérioration et de déglacement complet du plan d'eau (Skinner, 1992). D'autres organismes, dont le Centre de recherche de Dorset, dans le centre-sud de l'Ontario, tiennent des registres sur les glaces pour d'autres lacs (Dorset Research Center, 1994; Skinner, 1992). On pourrait utiliser différents lacs comme indicateurs climatiques régionaux, mais Wynne *et al.* (1996) ont constaté que les dates de déglacement pour 62 lacs du Bouclier canadien ne montraient pas de comportement similaire dans le temps.

Walsh (1995) a suggéré le recours à la surveillance de la couverture glacielle par télédétection comme méthode de détection du changement climatique à une échelle nationale ou planétaire. Une telle méthode nécessiterait une couverture orbitale suffisante et une résolution fine, de manière à permettre un échantillonnage fréquent (quotidien, de préférence) et une définition spectrale pour les lacs de petite étendue (Walsh, 1995; Barry et Maslanik, 1993).

### *Eau souterraine*

L'eau souterraine, comme les autres ressources en eau, est susceptible d'être touchée de différentes façons par le changement climatique et la variabilité climatique accrue (Mimikou *et al.*, 1991; Kuchment, 1989). L'eau souterraine doit en conséquence être vue comme un des composants clés de l'étude de l'impact du changement climatique sur le cycle hydrologique (Kovalevskii *et al.*, 1989; van der Kamp et Maathuis, 1992; Thomsen, 1990). On possède relativement peu d'informations sur les détails des impacts du changement climatique et sur la mesure dans laquelle ces impacts peuvent se traduire en préoccupations sociétales. Il existe un lien direct entre les ressources en eau souterraine et le changement climatique par l'entremise de processus hydrologiques comme les précipitations et l'évapotranspiration, et d'interactions avec les eaux de surface. Les ressources en eau souterraine sont également touchées par les activités humaines, comme le pompage de l'eau souterraine. La valeur de l'eau souterraine rend plus important encore le fait de comprendre les impacts du changement climatique sur les ressources en eau souterraine.

L'eau souterraine est une importante ressource en eau dans la plupart des régions du Canada; par exemple, les statistiques indiquent que 26 % des Canadiens dépendent de l'eau souterraine pour

leur approvisionnement en eau (Environnement Canada, 1993). La dépendance vis-à-vis de l'eau souterraine varie d'une province à une autre, et est plus élevée dans les régions rurales, où 90 % de la population se procure ainsi la totalité ou une partie de son approvisionnement en eau. L'eau souterraine est en outre le plus important réservoir unique d'eau douce. Les ressources mondiales en eau souterraine sont évaluées à 500 fois la quantité d'eau des lacs, rivières, réservoirs et terres humides (Freeze et Cherry, 1979). Si elles sont très considérables en quantité, les ressources en eau souterraine ne sont pas uniformément réparties, même à l'échelle locale. De plus, des conditions hydrogéologiques comme la faible conductivité hydraulique en limitent souvent les possibilités de récupération. Il va sans dire qu'il est important de ne pas détruire cette ressource.

La connaissance que l'on a des ressources en eau souterraine au Canada est cependant limitée (Hofmann, 1996; Bruce et Mitchell, 1995; Mitchell et Shrubsole, 1994). Les chercheurs se plaignent que l'eau souterraine est *loin des yeux*, et donc, *loin du cœur*. Cette même caractéristique fait en sorte qu'il est difficile de mesurer avec précision les ressources en eau souterraine.

Le Canada se divise en six régions hydro-physiographiques, sur la base de la similarité des caractéristiques géologiques, climatiques et topographiques (Herr, 1978). Pour chacune de ces régions, différents facteurs peuvent définir les impacts du changement climatique sur le ruissellement souterrain. Dans les régions nordiques, ces impacts sur le pergélisol constitueront un facteur important régissant les modifications possibles du ruissellement souterrain (Michel et van Everdingen, 1994; Hinzman et Kane, 1992). Dans les régions côtières, les changements du niveau de la mer sont susceptibles de constituer un facteur déterminant du déplacement des interfaces entre l'eau salée et l'eau douce (Cole *et al.*, 1994; Cieslak et Duffy, 1994; Werkheiser et Ayers, 1993; Buddemeier et Oberdorfer 1990). On prévoit également que les façons dont le changement climatique influera sur l'accumulation de neige dans les régions montagneuses sera un facteur clé des effets sur le cycle hydrologique (Mimikou *et al.*, 1991). Dans les Prairies, ce sont les impacts du changement climatique sur les interactions entre l'eau souterraine et les lacs qui prennent de l'importance (Crowe, 1993).

L'eau souterraine est une importante source d'approvisionnement en eau. Le principal effet nuisible du changement climatique sera vraisemblablement une diminution des réserves si l'alimentation de la nappe souterraine diminue par suite d'une baisse des précipitations, seule ou en conjonction avec une évapotranspiration accrue (Sharma, 1989; Vaccaro, 1992; Hokett *et al.*, 1990; Alexander *et al.*, 1987; Flint *et al.*, 1993; Sandstrom, 1995). Pour des raisons économiques, les puits ne descendent généralement qu'à la profondeur minimale nécessaire à un approvisionnement adéquat. Des réserves moindres d'eau souterraine causeraient l'assèchement de certains puits, les rendant inutilisables, alors que d'autres deviendraient moins productifs par suite de la faible charge piézométrique (Soveri et Ahlberg, 1989).

Une diminution des réserves d'eau souterraine peut entraîner une baisse du ruissellement vers les nappes d'eau de surface (Crowe, 1993; McAdams *et al.*, 1993; Freeman *et al.*, 1993). L'apport de l'eau souterraine aux cours d'eau est visible dans le débit de base de ceux-ci (Cooper *et al.*, 1995; Timofeyeva, 1994; Panagoulia et Dimou, 1995) et est défini comme le débit minimal dans les cours d'eau entre les épisodes de ruissellement. Il sert fréquemment à déterminer la capacité

d'approvisionnement en eau des cours d'eau et des lacs, ainsi que leur capacité d'assimilation des contaminants de sources ponctuelles et non ponctuelles.

L'ordre de grandeur des nappes souterraines varie considérablement, tout comme leurs capacités de retenue et de transport de l'eau; les temps de séjour de l'eau souterraine vont de quelques jours à des dizaines de milliers d'années (van der Kamp et Maathuis, 1992). Un éventail aussi large peut retarder et disperser les impacts du changement climatique (Wilkinson et Cooper, 1993). Par exemple, une baisse de l'alimentation des nappes souterraines pourrait ne pas entraîner de réduction immédiate et équivalente du débit de base des cours d'eau. À la place, le débit de base pourrait diminuer plus lentement que l'alimentation et cette baisse durer un certain temps après une éventuelle augmentation de l'alimentation. Les répercussions du changement climatique sur les ressources en eau souterraine pourraient ne pas être détectables immédiatement et l'efficacité de stratégies d'adaptation visant à maintenir les ressources en eau souterraine serait difficile à évaluer.

L'évaluation des impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau souterraine est d'un ordre moins intuitif que celle de ses impacts sur la quantité de l'eau souterraine. Avec des concentrations accrues de $CO_2$ atmosphérique, les précipitations pourront être enrichies en $CO_2$, ce qui aura des répercussions sur la géochimie de l'eau souterraine en modifiant la solubilité des minéraux. Les impacts sur l'eau souterraine entraîneront vraisemblablement des préoccupations à plus grande échelle, du fait du changement de la température (Kukkonen *et al.*, 1994), de la chimie (Webster *et al.*, 1990; Peck, 1988), et de la capacité d'assimilation des cours d'eau et des lacs (Crowe, 1993). Une baisse des débits de base pourrait conduire à des variations de température plus importantes parce que l'influence de la stabilité thermique de l'eau souterraine diminuera face aux variations saisonnières et diurnes. Ces fluctuations de température pourraient avoir un effet nuisible sur les organismes aquatiques sensibles à la température et à la teneur en oxygène dissous (Meisner *et al.*, 1988; Sinokrot *et al.*, 1995). Le débit de base étant moindre, il y aura également une diminution de la dilution des contaminants naturels et anthropiques dans les plans d'eau de surface, ce qui aura des incidences évidentes sur la qualité de l'eau (Jury et Gruber, 1989).

Les impacts du changement climatique présentés ci-dessus sont des impacts directs et sont plus ou moins proportionnels à l'ampleur du changement. Ce dernier peut également avoir des impacts indirects sur les ressources en eau souterraine, qui pourraient être disproportionnés par rapport à l'ampleur réelle du changement climatique. Par exemple, l'allongement de la saison de croissance et la hausse des températures causés par le réchauffement climatique pourraient nécessiter le recours à l'irrigation dans des régions où ce n'est actuellement pas requis. L'irrigation consomme de forts volumes d'eau et pourrait avoir une incidence beaucoup plus grande sur les ressources en eau souterraine que ne le laissent prévoir les seuls impacts directs du changement climatique comme l'alimentation réduite (Howitt et M'Marete, 1990). En outre, l'irrigation est principalement pratiquée en été, alors que les niveaux d'eau souterraine et les écoulements de surface sont à leur minimum ou presque.

Il faudra mener des recherches considérables pour comprendre les impacts possibles du changement climatique sur les ressources en eau souterraine, la manière dont ces impacts pourraient induire des préoccupations sociétales, quelles stratégies d'adaptation pourraient être

appliquées en réponse à ces préoccupations et comment elles pourraient être mises en œuvre. Au moins deux méthodes pourraient être élaborées pour déterminer les impacts du changement climatique. La première pourrait être axée sur la définition des facteurs climatiques, physiographiques, hydrogéologiques et anthropiques associés aux effets nocifs, comme la baisse des réserves d'eau souterraine. Un modèle conceptuel, qui consisterait par exemple en une comparaison des débits d'alimentation, de consommation et de ruissellement de l'eau souterraine, serait mis au point pour faire le lien entre ces facteurs. Ces relations pourraient ensuite être utilisées à l'échelle nationale pour permettre de repérer, d'un point de vue qualitatif, les régions qui présentent un risque élevé d'impacts nuisibles. Dans une seconde optique, complémentaire à la première, on procéderait à des études détaillées dans des contextes différents comme les régions du nord, des côtes et des prairies. Ces résultats permettraient de mieux définir la portée et les mécanismes des impacts du changement climatique, et compléteraient les résultats de la première méthode, qui ont une bonne couverture spatiale, mais ne donnent pas assez de détails sur le plan quantitatif.

Un prototype de recherche visant les impacts du changement climatique sur les ressources en eau souterraine à une échelle régionale est actuellement en cours dans le bassin de la rivière Grand, dans le sud de l'Ontario. Cette recherche est une initiative conjointe de la Division des affaires hydriques, Région de l'Ontario (Environnement Canada), de l'Institut national de recherche sur les eaux (Environnement Canada) et de l'Office de protection de la rivière Grand. La méthodologie adoptée consiste à interpréter les ressources en eau souterraine de la région en analysant les dossiers de forage de puits, à utiliser cette information pour élaborer un modèle de ruissellement souterrain dans le bassin, à relier les modèles de ruissellement souterrain et d'écoulement de surface, et, enfin, à évaluer les impacts de différents scénarios de changement climatique sur le modèle intégré des ressources en eau.

**Eau souterraine - Étude de cas du changement climatique : le bassin de la rivière Grand**

McLaren et Sudicky (1993) ont appliqué un modèle bidimensionnel simple d'écoulement d'état stable à une sous-région du bassin de la rivière Grand, dans le sud de l'Ontario, afin d'examiner les impacts possibles du changement climatique sur l'eau souterraine (à l'aide des scénarios GISS, GFDL et CCC). Plus précisément, ils ont examiné les impacts possibles sur l'extraction de l'eau souterraine pour les besoins domestiques/municipaux. La modélisation a indiqué une réduction de l'alimentation de la nappe souterraine de l'ordre de 15 à 35 %, laquelle se traduit par une incidence maximale (baisse du niveau piézométrique) de 5 à 20 m, respectivement, aux centres de pompage existants (McLaren et Sudicky, 1993, 66). Dans le nord de la région étudiée, ces baisses vont de 2 à 7m. La majeure partie de la consommation, dans ces régions, est de type domestique rural et pourrait être touchée gravement par les baisses du niveau piézométrique, en particulier les usages qui dépendent de puits peu profonds. L'étude a également mis en évidence qu'une réduction de 15 à 35 % de l'alimentation de la nappe souterraine entraînait une réduction du ruissellement souterrain de 17 à 39 % (*idem*). Le pourcentage de variation du ruissellement n'est pas égal au pourcentage de variation de l'alimentation de la nappe parce que, lorsque cette alimentation diminue, les puits de pompage prélèvent une portion légèrement supérieure de l'alimentation totale (*idem*).

### *Qualité de l'eau*

On prévoit que le changement climatique occasionnera des changements dans la qualité de l'eau. Ces changements sont généralement considérés comme négatifs. La présente discussion sera limitée aux effets suivants : températures plus élevées, quantité d'eau moindre, changement dans la saisonnalité du ruissellement et qualité de l'eau des lacs de grande superficie.

#### Élévation des températures

Des températures de l'air plus élevées peuvent causer une dégradation de la qualité de l'eau. Par exemple, des hausses de la température des cours d'eau réduisent la solubilité de l'oxygène, augmentent les taux de respiration biologique, d'où une baisse des concentrations d'oxygène dissous, en particulier pendant les périodes de débit d'étiage estival aux latitudes moyennes (GIEC, 1996). Les concentrations d'oxygène dissous dans l'hypolimnion des lacs, en particulier les lacs plus eutrophes, peuvent également décroître, alors que les zones d'anoxie augmenteront par suite de la fréquence respiratoire accrue dans un climat plus chaud (*idem*). La durée réduite de la couverture glacielle peut toutefois réduire l'incidence de l'anoxie hivernale dans les lacs et les cours d'eau situés plus au nord.

#### Diminution de la quantité d'eau

Lawford (1990) a suggéré que les impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau dans l'Ouest canadien sont liés à ses impacts sur la quantité. La sécheresse de 1988 a illustré les problèmes que pourrait amplifier le changement climatique. Par exemple, il y a eu une érosion du sol en de nombreux endroits, ce qui a causé des problèmes de sédimentation dans les cours d'eau. Si les niveaux des rivières et des lacs baissent sous l'action du changement climatique, la capacité de diluer les polluants diminuera elle aussi. Des températures plus élevées peuvent également nuire à la solubilité et à la mobilité des contaminants.

#### Changements de la saisonnalité du ruissellement

Les changements dans la saisonnalité du ruissellement peuvent également nuire à la qualité de l'eau. Sous les latitudes moyennes et élevées, le déplacement de la période de ruissellement abondant, qui prendrait place en hiver et au début du printemps au lieu de se produire à la fin du printemps et en été, pourrait réduire la qualité de l'eau à la fin de l'été - en particulier dans le cas de scénarios de bas débits. Schindler (1997) a indiqué que des sécheresses prolongées dans les régions boréales pourraient causer une acidification des cours d'eau en raison de l'oxydation des poches de soufre organique dans les sols. Les épisodes acides associés à la fonte des neiges dans les cours d'eau et les lacs pourraient toutefois être réduits dans un climat plus chaud, du fait d'une accumulation plus faible de neige et de débits moindres pendant la fonte (GIEC, 1996; Moore *et al.* 1997). Dans l'ensemble, les problèmes de qualité de l'eau (en particulier les bas niveaux d'oxygène dissous et les concentrations élevées de contaminants) associés aux impacts des activités humaines sur les ressources en eau (p. ex., les effluents d'eaux usées, l'évacuation de l'eau de refroidissement) seront exacerbés par la réduction du ruissellement annuel davantage que par les autres changements dans les régimes hydrologiques (GIEC, 1996).

Climat et qualité de l'eau des lacs de grande superficie

Pour les grands systèmes lacustres, les études sur la qualité de l'eau ont principalement porté sur l'eutrophisation et les substances toxiques. Les recherches indiquent que le climat peut influer de façon importante sur les processus limnologiques responsables du transport, de la distribution et des voies des polluants, et donc de la qualité de l'eau.

Lorsque de grandes quantités de matière organique produites par les algues présentes dans l'épilimnion s'enfoncent dans l'hypolimnion, la décomposition peut appauvrir les réserves en oxygène et causer l'anoxie de l'hypolimnion. L'appauvrissement des réserves d'oxygène estivales peut influer sur le biote des lacs (phytoplancton, zooplancton et organismes benthiques) et la santé des pêches. En situation d'anoxie, l'eau peut devenir odorante et désagréable au goût, et impropre à la consommation. En outre, la décomposition des algues et la prolifération de *cladophora* peuvent polluer les plages, obstruer les prises d'eau et réduire la valeur des propriétés riveraines. L'anoxie peut également entraîner la libération dans la colonne d'eau de nutriments et de métaux présents dans les sédiments.

Lam *et al.* (1987a) décrivent un modèle de qualité de l'eau appliqué au lac Érié pour la prévision des concentrations de nutriments et d'oxygène dissous dans les conditions climatiques actuelles. La vérification du modèle au moyen de données couvrant la période de 1967 à 1982 a permis de simuler avec succès la température, les nutriments (concentrations de phosphore total et de phosphore réactif soluble) et la concentration d'oxygène dissous pour les conditions du bassin et de l'ensemble du lac. Les résultats obtenus grâce au modèle ont montré que, dans l'hypolimnion critique et peu profond du lac Érié, tant la dynamique de la thermocline que les charges de nutriments contribuaient à prévenir l'anoxie de l'hypolimnion. La position de la thermocline et la température dans la colonne d'eau forment le lien direct avec les conditions météorologiques (climatiques) en surface. En outre, l'hydrologie climat-bassin tend à régulariser la charge de nutriments. Les courbes de probabilité pour la profondeur de l'hypolimnion et les concentrations d'oxygène observées dans le bassin central du lac Érié indiquent clairement que l'occurrence d'anoxie (c.-à-d. la qualité de l'eau) est reliée aux caractéristiques thermales du lac forcées par le climat. Cela implique que la modification des conditions climatiques peut avoir une impact sur les conditions de qualité de l'eau, comme les concentrations de nutriments et d'oxygène dissous, et les composants de l'écosystème tributaires de ces facteurs.

Pour les lacs vulnérables, comme le bassin central du lac Érié, une réduction de l'approvisionnement net du bassin, une baisse des niveaux d'eau et l'altération du cycle thermique (avec une absence possible de renverse) peuvent influer de façon importante sur la qualité de l'eau. Les scénarios préliminaires de charge de nutriments en fonction du climat indiquent des réductions significatives des charges de nutriments en provenance de la rivière Détroit et des bassins récepteurs. Pour étudier les réactions de la qualité de l'eau aux effets du réchauffement climatique, on peut examiner les réactions de la qualité de l'eau au climat dans des conditions anormalement chaudes en tant qu'analogue des réponses et simulations basées sur les scénarios des MCG (Schertzer et Lam, 1997).

Schertzer et Sawchuk (1990) ont étudié la réaction du bassin central du lac Érié au cours d'une année chaude (1982-1983) pour évaluer la réaction physique et l'anoxie hypolimnique en tant

qu'analogue de conditions de réchauffement climatique. L'étude a indiqué que l'année avait été caractérisée par des pertes thermiques importantes en surface pendant l'hiver et des gains thermiques supérieurs à la moyenne au cours de l'été. Sur une base annuelle, les gains thermiques importants de l'été avaient été compensés par les pertes des autres mois. On a observé des températures de l'eau de surface plus élevées, des réductions significatives de la durée et de l'étendue de la couverture glacielle, et une disparition plus hâtive de l'isotherme 4 $^{o}$C signalant un début hâtif de la stratification thermique. Par suite du réchauffement accru en surface et des vents faibles, la thermocline s'est formée plus haut dans la colonne d'eau, et la stratification a duré plus longtemps que les autres années. L'allongement de la période de stratification (malgré un hypolimnion plus épais) a contribué à une légère anoxie hypolimnique dans le bassin central du lac. Les simulations de réchauffement climatique montrant que les températures des lacs ne font pas toujours l'objet d'une renverse complète (Boyce *et al.*, 1993; Schertzer et Croley, 1997a), il est raisonnable de supposer que la qualité de l'eau (distribution des nutriments et de l'oxygène dissous) risque d'être affectée. On s'attend à ce que la hausse de la température et la modification des conditions relatives aux nutriments et à l'oxygène influent sur des composants de l'écosystème tels que l'habitat et la santé des pêches.

***Milieux humides***

Les milieux humides sont des terres saturées d'eau de surface ou de subsurface pendant des périodes suffisamment longues pour favoriser la croissance d'hydrophytes (plantes herbacées, laîche et autres) et le développement de sols gleyfiés (mal drainés) ou tourbeux (Environnement Canada, 1994a, 28). Les milieux humides peuvent être catégorisés en savanes, tourbières, marais salés et d'eau douce, marécages et marais peu profonds. Ils représentent 14 % de la superficie totale des terres au Canada, et sont disséminés en différents endroits. Ils incluent les marais salés de la baie d'Hudson et des côtes du Pacifique et de l'Atlantique, les savanes et tourbières des régions boréales et sub-arctiques, les marais et marécages riverains du bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent, et les bourbiers ou cuvettes des Prairies (National Wetland Working Group, 1988; Zoltai, 1988). Le Canada abrite 25 % de la totalité des milieux humides de la planète (Environnement Canada, 1994a).

Les fonctions des milieux humides sont importantes tant pour le milieu naturel que pour la société. On y inclut les suivantes : production primaire; amélioration de la qualité de l'eau par transformation et séquestration des nutriments, des sédiments et des substances chimiques toxiques; protection contre l'érosion par les vagues et les inondations; contribution au débit de base; habitat faunique d'espères rares ou menacées, de poissons, d'oiseaux aquatiques, d'oiseaux de rivage, d'amphibiens et de mammifères, notamment; et activités commerciales, récréatives et éducatives. Une diminution de la superficie des milieux humides dans le bassin des Grands Lacs aurait de nombreuses répercussions, dont une incidence négative sur les pêches parce que la moitié des espèces des Grands Lacs utilisent les milieux humides comme frayères, et les oiseaux aquatiques les utilisent comme haltes. Les cuvettes des Prairies sont extrêmement importantes pour la reproduction des oiseaux aquatiques.

Les milieux humides sont des systèmes dynamiques, considérés comme des systèmes de transition entre les écosystèmes terrestre et aquatique. L'emplacement, la superficie, la productivité et la diversité des milieux humides sont vulnérables aux changements du cycle

hydrologique, et les impacts prévus du changement climatique inquiètent les spécialistes des milieux humides. Les aspects préoccupants du point de vue hydrologique sont les suivants : changements des composants du bilan hydrologique, changements des précipitations, diminution du ruissellement de surface, réduction des chutes de neige, raccourcissement de la saison du gel, réduction du stockage d'eau souterraine et accroissement de l'évapotranspiration. On prévoit une baisse importante des niveaux d'eau dans le bassin des Grands Lacs; il semble que ces incidences et d'autres, sur les milieux humides, seront graves (Croley, 1990; 1993; Lee *et al.*, 1996; Mortsch, 1990).

Les hausses de température associées au changement climatique pourraient altérer les barrières biogéographiques de longue date qui influent sur le fonctionnement, la diversité et l'emplacement des écosystèmes (Vitousek, 1994). Des projections des principales modifications apportées aux écosystèmes au Canada ont été préparées pour différents scénarios $2xCO_2$, et incluent la réduction des écozones de la toundra, sub-arctique et boréale, et une expansion vers le nord des écozones de prairies tempérées (Rizzo, 1990; Rizzo et Wiken, 1992). Ces changements peuvent mener à des disparitions rapides, ainsi qu'à la réorganisation de la composition et de la structure des communautés végétales des milieux humides en fonction des tolérances à la température. Le domaine de certaines espèces (p. ex., exotiques) peut également s'étendre et les amener en concurrence avec les espèces indigènes.

Une nappe élevée ou des inondations fréquentes sont nécessaires au maintien des écosystèmes des milieux humides. Naturellement, l'approvisionnement en eau d'un milieu humide (par les précipitations, le ruissellement de surface et le ruissellement souterrain) doit être supérieur aux pertes dues à l'évapotranspiration et au ruissellement. On prévoit que le changement climatique altérera les processus hydrologiques régionaux en modifiant la quantité et la qualité de l'eau, et rompra cet équilibre. Bien que des variations périodiques des niveaux d'eau, de même que des cycles d'années humides et sèches, soient nécessaires au maintien de la diversité des milieux humides, la vitesse du changement, la fréquence des événements extrêmes et la diminution des volumes d'eau emmagasinés associées au changement climatique pourraient perturber le fonctionnement des écosystèmes des milieux humides et compromettre leur valeur multifonctionnelle (Mortsch, 1990; Martinello et Wall, 1993; Poiani et Johnson, 1993a,b). La productivité des milieux humides est amoindrie par une inondation ou un assèchement prolongés, alors que des changements périodiques du niveau d'eau augmentent la diversité et la productivité de la végétation (van der Valk et Davis, 1978).

La position de la nappe d'eau dans les milieux humides détermine la taille des couches aérobies et anaérobies dans une tourbière; le degré d'anaérobiose influe sur l'échange de gaz carbonés (méthane, dioxyde de carbone) avec l'atmosphère, ainsi que sur l'exportation du carbone organique dissous (COD) (Rouse *et al.*, 1997). Le dégagement de $CO_2$ du sol augmente de façon linéaire avec la réduction de la nappe d'eau, tandis que le flux de méthane connaît une diminution exponentielle (Moore et Knowles, 1989). Une réduction de la nappe d'eau peut transformer une tourbière de puits net de $CO_2$ en source (Roulet *et al.*, 1992).

Les divers types de milieux humides réagiront et s'adapteront différemment au changement et à la variabilité climatiques. Les marais, par exemple, s'adaptent plus facilement à des niveaux d'eau réduits que les marécages. Le pourtour intérieur des marais s'assécherait, mais leur

végétation herbacée pourrait coloniser rapidement des sites propices exposés. Les arbres, qui forment la végétation dominante des marécages, ne pourraient cependant pas se régénérer ou coloniser rapidement d'autres sites. Les milieux humides fermés ou étanches du littoral, de même que les milieux humides de l'intérieur, seraient plus exposés à l'assèchement. Les milieux humides ouverts du littoral peuvent migrer, mais la colonisation est limitée par la nécessité d'un substrat et de lits de germination appropriés. Les fonctions de protection contre les inondations et l'érosion assumées par ces milieux humides, ainsi que leur fonction d'habitat faunique, seraient réduites.

Les savanes sont particulièrement vulnérables au changement climatique étant donné leur dépendance vis-à-vis des précipitations. Les précipitations constituent leur principale source d'approvisionnement en eau, puisqu'elles sont isolées du régime souterrain local par l'accumulation de mousse. Une diminution des précipitations (et un rabattement de la nappe) altérera l'organisation de la végétation. En outre, elle exposera la mousse et les sédiments à des conditions aérobies qui provoqueront une oxydation accrue, et une modification des propriétés physiques (et du comportement hydrologique) ainsi que du flux des nutriments, des gaz et des sédiments (Woo, 1992). De même, nombre de cuvettes saisonnières des Prairies sont alimentées seulement par la fonte des neiges et les précipitations. Elles s'assèchent pendant les périodes de sécheresse, et persistent toute une saison en cas de précipitations abondantes. Les cuvettes semi-permanentes sont alimentées par l'eau souterraine, en plus des précipitations et de la fonte, et s'assèchent seulement pendant les périodes de sécheresse grave, pendant lesquelles les réserves d'eau souterraine sont taries.

Les milieux humides disparaissent rapidement en raison du changement de vocation des terres; la pollution en réduit la qualité. Par exemple, une étude manitobaine s'étendant de 1930 à 1970 a révélé que la superficie des milieux humides avait diminué de plus de 60 % pendant cette période, et de 56 % de plus par la suite (Lawford, 1990). Des réductions similaires ont été signalées dans le sud de la Saskatchewan et dans la forêt-parc albertaine (*idem*). Le changement climatique est un autre facteur d'agression. Étant donné la diversité des milieux humides au Canada, il est peu probable qu'il exerce le même effet sur tous. Il ne semble pas que son action s'exercera de manière uniforme ou linéaire. On espère surtout que la vitesse du changement climatique ne dépassera pas la capacité d'adaptation des écosystèmes des milieux humides.

### *Domaine glaciel*

Cette section porte sur les glaces des cours d'eau, le pergélisol et, enfin, les glaciers. La question de la glace des lacs d'eau douce a été traitée dans la section sur les lacs.

#### Glace de cours d'eau

On a signalé une avance des dates de déglacement, pouvant atteindre quinze jours, pour le fleuve Saint-Jean, au Nouveau-Brunswick (Williams, 1970) et la rivière Rouge, au Manitoba, (Rannie, 1983). Dans le nord et l'est du Nouveau-Brunswick et de l'Île-du-Prince-Édouard, on relève une faible tendance à une quantité moindre de glace dans les cours d'eau alors qu'on ne relève aucun changement dans le sud du Nouveau-Brunswick et le centre de la Nouvelle-Écosse. La durée de

la période de glace semble toutefois augmenter sensiblement au Cap-Breton et pour la majeure partie de Terre-Neuve (Clair *et al.*,1997).

Le changement climatique aura diverses conséquences sur la couverture glacielle des cours d'eau des différentes régions du pays. Dans le cas des régions tempérées, où elle est intermittente, comme la Colombie-Britannique et le sud-ouest de l'Ontario, elle pourrait disparaître complètement ou devenir plus intermittente. Dans les régions nordiques, l'élévation des températures d'hiver peut ne pas causer de déglacement en hiver, mais la saison d'eaux libres pourrait allonger. Il est également possible que l'épaisseur de la glace diminue (Clair *et al.*, 1997). Les régions intermédiaires pourraient connaître des débâcles d'hiver, qui s'accompagneraient d'inondations.

Pergélisol

Le pergélisol est défini par Brown et Kupsch (1974) comme un état thermique dans lequel la température du sol ou de la roche est inférieure à 0 $^{o}$C pendant au moins deux hivers consécutifs, ainsi que pendant l'été qui les sépare. Il s'agit d'un état thermique, qui peut s'accompagner ou non de glace.

Dans les scénarios des MCG 2x$CO_2$, les limites du pergélisol continu et discontinu se déplacent d'environ 500 km vers le pôle (Woo *et al.*, 1992), et la superficie du pergélisol diminue à moins de 80 % de son étendue actuelle. Certaines parties du globe, comme la Sibérie, enregistrent déjà des vitesses de régression du pergélisol de l'ordre de 60 à 80 km par degré Celsius (Prowse, 1996). Il a été suggéré que, dans les régions où la température annuelle moyenne est de -6 $^{o}$C ou moins, le pergélisol risquait de disparaître complètement (*idem*). Kwong et Gan (1994) ont procédé à des relevés du pergélisol le long de la route du Mackenzie, au sud du Grand lac des Esclaves. Ils ont constaté que la limite sud de la zone de pergélisol sporadique discontinu s'était déplacée d'environ 120 km vers le nord. Pour déterminer si ce changement est causé par le réchauffement, ils ont effectué une analyse détaillée des tendances (test non paramétrique de Kendall) des températures moyennes de l'air consignées pour neuf stations météorologiques. Les résultats indiquent une tendance à un réchauffement régional pour la période de 1949 à 1989. Un réchauffement futur causé par le changement climatique provoquerait un recul supplémentaire du pergélisol.

Le pergélisol confine l'écoulement de l'eau vers la couche active et restreint l'interaction de la surface avec l'eau souterraine. Une saison de dégel prolongée, ainsi que la fonte du pergélisol et de la glace de sol, etc., auraient des incidences multiples, dont :

- affaissement des terrains, et modification des caractéristiques de la surface et des réseaux hydrographiques;
- érosion du thermokarst;
- accroissement de la charge de sédiments dans les cours d'eau et les lacs;
- développement et épaississement de la couche active, et réduction parallèle de la formation d'étangs et de l'écoulement en raison de la plus grande quantité d'eau emmagasinée dans la couche active, allongement de la période d'infiltration et augmentation de la contribution au réseau de ruissellement souterrain;

- formation de voies de ruissellement en subsurface, qui mènera à un accroissement du drainage des tourbières et des milieux humides;
- assèchement des tourbières et des milieux humides, qui peuvent devenir des sources de carbone atmosphérique;
- disparition des milieux humides arctiques actuellement alimentés par l'écoulement de surface;
- drainage latéral ou souterrain des plans d'eau dont la séparation des phases est liée au pergélisol;
- inondation des lacs dégelés.

(Prowse, 1996; GIEC, 1996; Rouse *et al.*, 1997; Woo *et al.*, 1992; Mackay, 1992).

Glaciers

L'eau de fonte des glaciers est un important apport pour les cours d'eau des régions montagneuses; les débits de crue se produisent au début ou au milieu de l'été (selon la latitude). Les impacts du changement climatique sur les glaciers dépendront de l'emplacement géographique de ces derniers et de leur élévation. Les glaciers du sud de la Colombie-Britannique sont généralement à faible altitude; en cas de réchauffement, une proportion accrue des précipitations annuelles tombera sous la forme de pluie et augmentera la fonte estivale. Les glaciers plus élevés ne seraient pas aussi vulnérables. Ceux du Yukon et du nord-ouest de la Colombie-Britannique pourraient recevoir des précipitations accrues, qui compenseraient les impacts des températures plus élevées; il semble que les glaciers continueront à progresser (Brugman *et al.,* 1997). Demuth (1994, 1995) a également montré que les changements des régimes de précipitations/évaporation pourraient faire reculer les glaciers le long des pentes orientales de la ligne de partage des eaux.

Des températures plus élevées entraîneraient une fonte des glaciers. Si les chutes de neige demeurent stables, les glaciers fondront et leur niveau d'équilibre reculera à des élévations supérieures (Lawford, 1990). Initialement, cette fonte causerait un ruissellement accru mais, après un certain nombre d'années, cette hausse serait remplacée par un apport réduit d'eau des glaciers, devenus plus petits (GIEC, 1996; Brugman *et al.*, 1997). Une fois que le glacier aurait fondu en grande partie, il ne fournirait aucun apport d'eau au débit de fin d'été et d'automne, ce qui mènerait à une baisse importante de l'écoulement. Si les chutes de neige augmentent, toutefois, le bilan massique des glaciers pourrait ne pas changer de façon significative, et leur apport total en eau pourrait augmenter (Lawford, 1990). Brugman *et al.* (1997) ont défini trois zones caractéristiques d'impact d'un réchauffement $2xCO_2$ sur les glaciers pour la Colombie-Britannique et le Yukon, à savoir :

- au sud, une zone de déclin où la plupart des glaciers sont minces et régressent;
- une zone de transition où les glaciers qui présentent des aires d'accumulation importantes progressent, et les autres régressent;
- au nord, une zone où la plupart des glaciers progressent.

Le ruissellement de ces glaciers est important pour le maintien du débit et du milieu naturel dans le cours supérieur de plusieurs grands cours d'eau des Prairies. L'apport résultant de la fonte des

glaciers est particulièrement important pendant la transition entre les débits de crue estivale et les débits de base.

La prévision des tendances du bilan massique des glaciers est assez complexe. Ainsi, au cours d'une étude réalisée dans les années 80 aux environs du parc provincial de Garibaldi, on a observé que le bilan massique de deux des glaciers diminuait rapidement, mais qu'un troisième ne présentait aucun signe net de diminution. Il n'a pas été possible de déterminer si ces résultats étaient attribuables à des conditions micro-météorologiques dans le parc, à la forme des glaciers ou à des problèmes de méthodologie (Lawford, 1990).

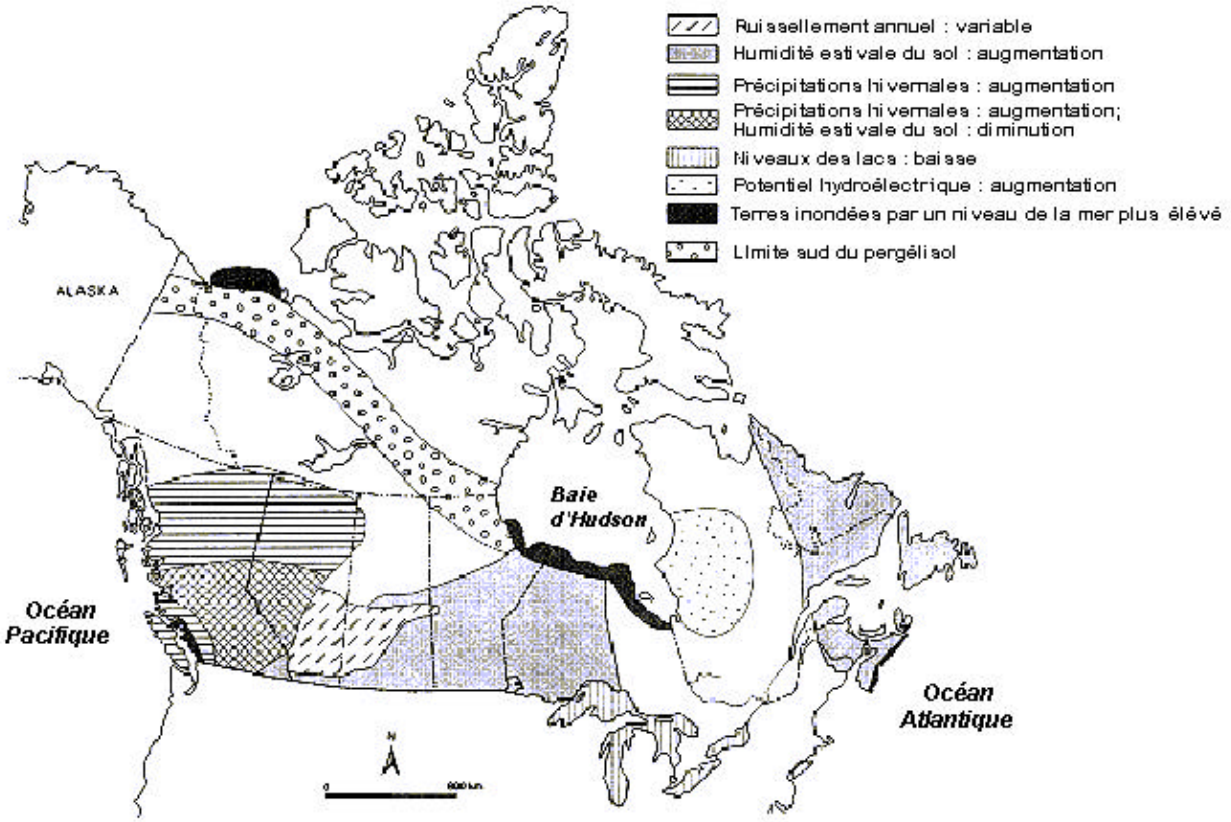
Les rivières et les réservoirs qui sont alimentés par la fonte des neiges ou dont le débit de printemps et d'été est tributaire de la fonte des glaciers, alors que la consommation aux fins agricole et municipale est élevée et les précipitations faibles, peuvent présenter un grave problème de déséquilibre de l'approvisionnement et de la demande. La région des Prairies est particulièrement vulnérable de ce point de vue (Cohen *et al.*, 1989).

***Résumé***

Les impacts du changement climatique étudiés ci-dessus sont résumés au tableau 1.12. Les impacts hydrologiques ont été évalués pour le climat canadien au moyen de différents scénarios de changement climatique et méthodes de modélisation.

La figure 1.13 illustre certains des impacts hydrologiques généraux découlant des plus récents scénarios de changement climatique de MCG sur différentes régions du Canada. Les impacts incluent des hausses des précipitations en hiver sur l'île de Vancouver et la côte sud de la Colombie-Britannique, des hausses des précipitations en hiver et des baisses de l'humidité du sol en été dans le sud-est de la Colombie-Britannique et le sud-ouest de l'Alberta, et des baisses de l'humidité du sol en été dans le sud-est de la Saskatchewan, le sud du Manitoba, le nord-ouest de l'Ontario et la majeure partie des Maritimes. La carte montre également la régression de la limite sud du pergélisol.

**Figure 1.13 Résumé des impacts hydrologiques au Canada** (Lawford, 1992, 12)



## Tableau 1.12 Résumé des impacts hydrologiques à partir d'études canadiennes réalisées pour différents scénarios de changement climatique *

| Aspect | Impact | Région étudiée | Références |
|---|---|---|---|
| **Évaporation/ Évapotranspiration** | • augmentations | • Grands Lacs, bassin du Mackenzie, rivière Saskatchewan | Croley, 1990, 1992; Cohen, 1987b; Soulis *et al.*, 1994; Cohen, Welsh et Louie, 1989 |
| **Ruissellement/ Écoulement fluvial** | | | |
| • moyenne | • diminutions | • Grands Lacs, rivière Saskatchewan, Mackenzie, rivière Moisie (Québec), rivière Grand (Ontario) | Croley, 1990, 1992; Cohen, Welsh et Louie, 1989; Cohen, 1986, 1987; Soulis *et al.*, 1994; Singh, 1987; Ng et Marsalek, 1992; Morin et Slivitzky, 1992; Smith, 1991; McBean et Smith, 1993; Haas et Marta, 1988; Kerr, 1996; Walker, 1996 |
| | • augmentations | • Nord du Québec, rivière Saskatchewan, Mackenzie | |
| | | • Rivière Grand (Ontario); bassin de la baie de Quinte | |
| • minimum | • durée et fréquence accrues | • Rivière Waterford (Terre-Neuve); Grands Lacs; Mackenzie; bassin de la baie de Quinte | |
| • pointe du printemps | • plus hâtive; maximum moins élevé | • Bassin de la baie de Quinte | |
| • maximum | • demeure le même ou diminue (changement minimal) | | |
| **Niveau des lacs** | | | |
| • minimum | • durée et fréquence accrues; records de bas niveaux | • Grands Lacs; Grand lac des Esclaves et Grand lac de l'Ours. | Hartmann, 1990a et 1990b; Croley, 1990, 1992 ; Kerr et Loewen, 1995; Kerr, 1996 |
| • maximum | • diminutions | | |
| • cycle annuel | • maximum saisonnier plus hâtif; diminutions de l'amplitude | | |
| **Humidité du sol** | • diminutions; déficit au cours de l'été | • Rivière Grand (Ontario), Grands Lacs, Saskatchewan, sud de l'Ontario | Sanderson et Smith, 1990; Woo, 1992; Cohen, Welsh et Louie, 1989; Brklacich, 1990 |
| **Eaux souterraines** | | | |
| • alimentation | • diminutions | • Rivière Grand (Ontario) | McLaren et Sudicky, 1993 |
| • niveaux | • diminution | • Rivière Grand (Ontario) | |
| **Manteau nival** | • diminutions<br>• plus intermittent | • Bassin de la baie de Quinte | Walker, 1996 |
| **Glaces** | | | |
| • glace de lac | • couverture réduite ou éliminée<br>• saison de couverture plus courte | • Grands Lacs, Mackenzie, nombreux lacs nordiques | Assel, 1991; Andres, 1994; Skinner, 1993; Sanderson, 1987 |
| **Intrusion d'eau salée** | • la hausse du niveau de la mer touche les rivières côtières | • Saint-Laurent et fleuve Saint-Jean | Slivitzky, 1993; Martec, 1987 |

## RESSOURCES EN EAU : CHANGEMENT ET VARIABILITÉ CLIMATIQUES

La section, *Hydrologie : changement et variabilité climatiques*, analysait les impacts du premier ordre sur le cycle hydrologique. Dans la présente section, nous examinerons les impacts du second ordre sur les ressources en eau. En 1933, Zimmerman a soumis que les composants de l'environnement pouvaient seulement être considérés comme des « ressources » s'ils étaient requis/recherchés par les humains (Mitchell, 1989a). Dans le présent cas, l'« eau » est vue comme une ressource en raison des différents usages qu'en font les humains. Ce point de vue est essentiellement anthropocentrique, mais fait ressortir les impacts du changement climatique sur les usages de l'eau.

L'analyse contenue dans la présente section se limite aux points qui suivent, en ce qui a trait aux ressources en eau :

- usage agricole et rural;
- pêches;
- loisirs et tourisme;
- santé;
- hydroélectricité;
- navigation;
- approvisionnement en eau des villes;
- réservoirs;
- entreprises industrielles et commerciales.

### *Usage agricole et rural*

Ressources en eau et agriculture : un lien important

Les changements dans la disponibilité de l'eau constituent une des préoccupations majeures pour l'agriculture. L'eau est déjà rare dans une bonne partie des régions des plaines, au Canada, et, selon Rosenberg et Katz (1991), deviendra plus rare et plus coûteuse pour les générations futures à mesure que la qualité de l'eau se dégradera, que les réserves souterraines diminueront et que la concurrence pour l'eau de surface augmentera. En outre, si la variabilité interannuelle des précipitations change de telle sorte que la probabilité d'événements extrêmes (p. ex., sécheresses) augmente, l'irrigation deviendra nécessaire dans certaines régions alors qu'ailleurs, on s'inquiétera davantage des dommages causés par les inondations.

Les répercussions des changements induits par les ressources en eau, sur l'agriculture, peuvent aller de questions d'ordre très global (p. ex., sécurité alimentaire) à des questions très spécifiques (p. ex., décisions de gestion à la ferme en matière d'irrigation). Au Canada, la disponibilité de surplus exportables est, pour la plupart des céréales, déterminée par la variabilité climatique. Cependant, comme l'ont décrit Adams *et al.* (1995) pour les États-Unis, les baisses enregistrées dans les rendements agricoles peuvent avoir des conséquences économiques pour certaines régions, et entraîner un déplacement régional des profils de production.

Impacts du changement climatique sur les usages de l'eau en agriculture

Les impacts du changement climatique sur l'agriculture varieront en nature et en ampleur. Chaque région du Canada aura à relever un défi différent. Dans la plupart des régions, on prévoit que le changement climatique suscitera tant des possibilités que des limitations (Smit, 1989b). On distingue trois grands types d'usages agricoles de l'eau :

- l'eau servant à l'irrigation;
- l'eau servant à l'abreuvement du bétail;
- l'eau servant aux autres besoins de la ferme.

Du point de vue de l'agriculture, les facteurs sur lesquels le changement climatique exerce un impact direct sont les suivants :

- quantité de précipitations;
- moment de survenue des précipitations;
- événements extrêmes;
- changements dans la teneur en humidité du sol;
- changements de température qui influent sur l'évapotranspiration.

Les travaux effectués par Bootsma *et al.* (1984) dans la vallée de l'Annapolis, dans l'est du pays, suggèrent qu'une élévation des températures (sans changement des précipitations) pourrait réduire les rendements, mais qu'une augmentation des précipitations mènerait vraisemblablement à des rendements accrus. Stewart et Muma (1990) ont pour leur part utilisé un scénario $2xCO_2$ (partiellement basé sur trois scénarios de MCG) dont les résultats suggèrent une augmentation des possibilités de culture du maïs, du soja et du blé d'hiver dans l'est par suite de l'abaissement du rapport *précipitations/évaporation potentielle* plus près des valeurs optimales (Bootsma, 1997). Dans l'est du Canada toujours, les changements dans le moment de survenue et l'intensité des précipitations pourraient modifier les niveaux de stockage des réservoirs et d'humidité du sol. Ces deux facteurs auraient des impacts tant directs qu'indirects sur l'agriculture (Houtman, 1994).

Bootsma (1997) a noté que peu d'études ont examiné de façon spécifique les impacts du changement climatique lié au $CO_2$ sur l'agriculture dans l'est du Canada. La sensibilité de l'agriculture aux changements de température et de précipitations a toutefois été étudiée. Bootsma a suggéré que des changements dans le sens de conditions plus humides ou plus sèches pourraient avoir des répercussions tant positives que négatives dans les Maritimes. Par exemple, une humidité accrue atténuerait les baisses de rendement dues aux sécheresses, augmenterait l'occurrence des maladies, réduirait le temps de travail aux champs disponible et entraînerait une érosion accrue du sol. Une teneur en humidité plus faible aurait les effets contraires (Bootsma, 1997).

Au Québec, une hausse des précipitations et de l'humidité du sol réduirait l'utilisation de l'irrigation. Les besoins en eau pour l'abreuvement des bêtes pourraient augmenter tant en raison des besoins accrus des animaux que du nombre plus élevé de têtes de bétail. Singh et Stewart (1991) ont déterminé qu'au Québec, les rendements agricoles augmenteraient pour certaines

cultures comme le maïs, le soja, les pommes de terre et le sorgho, mais diminueraient pour les céréales et les oléagineux (p. ex., blé, orge, avoine, tournesol et colza), dans l'éventualité d'un scénario de changement climatique de type GISS.

En Ontario, Brklacich (1990) a suggéré que, dans la partie sud-ouest de la province, la culture du maïs-grain, du soja et du blé nécessitera le recours à l'irrigation. Les rendements pourraient toutefois ne pas être supérieurs aux rendements actuels, du fait que les températures seront supérieures aux températures optimales, et que les cultures risquent de souffrir d'un excès de chaleur. Ceci mènera sans aucun doute à une rentabilité moindre des exploitations agricoles.

Dans l'Ouest canadien, les activités agricoles dépendent davantage du climat, même si, selon Goos (1989), les cultures en général, et les céréales en particulier, sont bien davantage tributaires du climat que ne l'est le bétail. On prévoit que la production agricole des Prairies canadiennes deviendra davantage vulnérable aux sécheresses du fait que l'accroissement substantiel de l'évapotranspiration l'emportera sur les légères hausses des précipitations (Jackson, 1992). Pour les Prairies dans leur ensemble, les études prévoient une augmentation de la superficie des terres agricoles en raison d'une expansion de la production vers le nord, ce qui pourrait se révéler profitable pour la production fourragère. À moins que de nouveaux marchés appropriés ne soient trouvés, toutefois, ce fourrage devra être consommé par le bétail local, ce qui pourrait augmenter la quantité d'eau requise pour l'abreuvement des bêtes.

Il existe peu d'information quant à l'impact du changement climatique sur l'agriculture dans le nord du Canada. Goos et Wall (1994) ont indiqué que, si le changement climatique suit les prévisions, la présence de glace et de pergélisol diminuera partout dans le nord, ce qui pourrait avoir des répercussions sur l'activité économique régionale. Brklacich *et al.* (1997) ont suggéré que l'agriculture dans le bassin du Mackenzie pourrait bénéficier du changement climatique. C'est-à-dire que la saison de croissance plus longue pourrait être avantageuse pour l'agriculture dans la région, mais une agriculture plus intensive serait toutefois nécessaire à la rentabilité des exploitations.

Pratiques d'irrigation

La production agricole dans les régions arides et semi-arides du Canada (comme l'intérieur de la Colombie-Britannique, le sud de l'Alberta et de la Saskatchewan) est très étroitement liée à la disponibilité de l'eau. Ici, le déficit en eau du sol est habituellement compensé par l'irrigation. Au Canada, la dépendance vis-à-vis de l'irrigation varie selon les régions; dans l'est, l'irrigation est minimale, tandis que l'ouest (en particulier l'Alberta et la Colombie-Britannique) a davantage recours à l'irrigation et en est davantage tributaire, comme le montre le tableau 1.13. Dans l'Ouest canadien, l'irrigation représente 82 % de la totalité des prélèvements d'eau aux fins agricoles (Lawford, 1990).

Un climat plus chaud aura une incidence sur l'irrigation en augmentant l'évapotranspiration et en réduisant l'approvisionnement en eau, ce qui pourrait avoir des impacts sociaux et économiques importants (Peterson et Keller, 1990). Dudek (1989) a suggéré que l'agriculture dans les régions arides et semi-arides, qui sont tributaires de l'irrigation, est particulièrement vulnérable au changement climatique. En ce qui a trait à l'Alberta, Byrne *et al.* (1989) estiment qu'il se

produira des pénuries d'eau dans le sous-bassin de la rivière Oldman. Dans certaines parties du Manitoba, par contre, le changement climatique pourrait ne pas nécessiter d'irrigation supplémentaire en raison de l'humidité accrue du sol.

Pour avoir des renseignements plus détaillés sur l'impact du changement et de la variabilité climatiques sur l'agriculture, le lecteur est invité à se reporter au chapitre 4 de l'ÉPC.

**Tableau 1.13 Superficie cultivée et irrigation au Canada, par province**

| Province | Superficie cultivée en 1986 (000 ha) | Superficie irriguée en 1988 (000 ha) | Superficie irriguée par rapport à la superficie totale |
|---|---|---|---|
| Terre-Neuve | 40 | 0,05 | 0,0013 |
| Île-du-Prince-Édouard | 300 | 0,25 | 0,0008 |
| Nouvelle-Écosse | 400 | 0,80 | 0,0020 |
| Nouveau-Brunswick | 400 | 1,50 | 0,0375 |
| Québec | 3 600 | 40,00 | 0,0111 |
| Ontario | 5 600 | 42,00 | 0,0075 |
| Manitoba | 7 700 | 21,00 | 0,0027 |
| Saskatchewan | 26 600 | 105,00 | 0,0039 |
| Alberta | 20 700 | 565,00 | 0,0273 |
| Colombie-Britannique | 2 400 | 118,00 | 0,0492 |
| CANADA | 67 800 | 893,60 | 0,0132 |

Source : Chiffres sur les superficies tirés de Shady (1989) et ceux de la dernière colonne estimés par les auteurs

***Pêches***

En ce qui a trait aux pêches en eau douce, deux facteurs importants liés à l'eau sont directement touchés par le changement climatique, à savoir :

- la quantité d'eau (p. ex., niveau des lacs, débit/écoulement fluvial);
- la qualité de l'eau (p. ex., température de l'eau) (McBean *et al.*, 1992).

La majorité des scénarios de changement climatique (comme nous l'avons mentionné dans la section sur l'hydrologie) semblent indiquer que des modifications de ces facteurs auraient une incidence négative sur les pêches.

On distingue généralement trois grands types de pêche, soit la pêche commerciale, la pêche sportive et la pêche de subsistance. Si ces trois types de pêche sont pratiqués simultanément, différents types de pêche prévalent dans différentes régions. Par exemple, la pêche commerciale

Utilisation rurale de l'eau et adaptation climatique en Ontario : étude de cas

Si les secteurs des services municipaux, de la fabrication et, en particulier, de la production d'électricité sont les plus grands utilisateurs d'eau en Ontario, on estime que l'eau consommée par les utilisateurs agricoles représente 32 % de la consommation totale d'eau (Vandierendonck, 1996). Les presque 2,4 millions d'utilisateurs domestiques (22 % des Ontariens) ne bénéficiant pas de services d'eau municipaux représenteraient, d'après les estimations, 3 % de la consommation totale. De plus, un nombre indéterminé d'utilisateurs industriels, miniers, municipaux et autres sont en concurrence avec les utilisateurs agricoles et ruraux, pour ce qui est des approvisionnements en eau. Malgré la richesse hydrique apparente de l'Ontario, Gabriel et Kreutzwiser (1993) ont déterminé qu'il y a rarement une année sans que des régions de la province soient aux prises avec des pénuries d'eau. Les prélèvements, en particulier les prélèvements d'eau souterraine, sont de plus en plus une source de conflit entre les utilisateurs ruraux et d'autres (Hofmann, 1994; 1996; Leadlay, 1996). La variabilité climatique intensifie périodiquement la concurrence et les conflits entre les utilisateurs en diminuant l'approvisionnement et en occasionnant souvent une augmentation parallèle des besoins. Le réchauffement climatique prévu ne fera qu'exacerber cette situation (Wall et Sanderson, 1990; Koshida *et al.*, 1993).

Il existe peu de données sur la consommation rurale de l'eau en Ontario et dans nombre d'autres régions au Canada. Elle est rarement mesurée ou suivie, et l'information sur les impacts des épisodes de sécheresse et sur les initiatives prises en réponse à ces derniers est souvent anecdotique. Dans un sondage effectué auprès des propriétaires ruraux de certains cantons du sud de l'Ontario (Kreutzwiser, 1996), 35 % des répondants ont indiqué avoir eu un problème de quantité d'eau au cours de la sécheresse de 1988 ou après. Le forage de nouveaux puits, l'irrigation des cultures, l'approfondissement des puits existants et le transport par camion de l'eau nécessaire aux besoins domestiques ont été les initiatives les plus fréquemment citées comme moyens adoptés pour augmenter les approvisionnements en eau. La réduction de la consommation d'eau à l'extérieur et la mise en place de dispositifs domestiques visant à économiser l'eau ont été les initiatives les plus fréquemment citées comme moyens utilisés pour réduire la consommation d'eau pendant les pénuries. Ces moyens sont seulement quelques-unes des nombreuses mesures possibles d'adaptation au changement et à la variabilité climatiques.

prédomine sur les côtes de l'Atlantique et du Pacifique, mais la pêche sportive est la pêche la plus importante dans les Grands Lacs. La valeur au débarquement de la pêche commerciale dans les Grands Lacs en 1985 (Canada et É.-U.) a été d'environ 41 millions de dollars US, tandis que les pêcheurs sportifs auraient dépensé près de deux milliards de dollars US au cours de la même année (Jackson, 1990, 53). Les changements hydrologiques dus au changement climatique peuvent véritablement avoir des impacts économiques et environnementaux importants sur les pêches.

Quantité d'eau

La baisse du débit des cours d'eau et du niveau des lacs prévue par les chercheurs presque partout au Canada, par suite du changement climatique, (*Hydrologie : changement et variabilité climatiques*) aura des répercussions sur les pêches. Par exemple, la taille des populations de poissons suit l'évolution de l'écoulement fluvial, car ce dernier détermine l'habitat physique disponible. Le même principe vaut pour le niveau d'eau des lacs : une baisse du niveau entraînera une réduction parallèle de l'habitat disponible. Dans l'ensemble, ces différents types de mesures de la quantité d'eau sont toutes des indications de l'habitat disponible. On assistera également à une concurrence accrue entre les espèces et entre les membres de certaines espèces.

Les « eaux de ruissellement » ont fait l'objet d'importantes études qui ont établi l'existence d'un lien entre les incidences négatives de l'activité humaine (p. ex., des projets hydroélectriques) et l'habitat du poisson. De nombreux modèles statistiques montrent qu'il existe un lien certain entre la population sur pied ou l'abondance de poissons et les eaux de ruissellement. Par exemple, les modèles ont démontré l'existence d'un lien entre la variabilité annuelle du nombre d'alevins de saumon atlantique dans une rivière du Québec entre 1971 et 1977, et les eaux de ruissellement saisonnières (Regier et Meisner, 1990, 12). Une étude sur la truite dans un ruisseau du Montana a révélé qu'une baisse de 62 % du débit avait entraîné une réduction de la population totale de truites de l'ordre de 90 % (Regier et Meisner, 1990).

Les changements dans le débit des cours d'eau pourraient également avoir des effets négatifs sur les populations d'espèces migratrices, comme différents salmonidés (McBean *et al.*, 1992). En outre, les canaux de fraye dont la remontée est actuellement difficile pourraient devenir impraticables (p. ex., cours d'eau asséchés). Non seulement les populations sont vulnérables aux changements dans la quantité de l'eau, mais ces changements peuvent menacer la survie de l'espèce tout entière. Certaines espèces pourraient ainsi ne plus être en mesure de survivre dans les régions où les débits ont diminué de façon substantielle parce que l'habitat y est devenu inadéquat. D'autres espèces pourraient par contre s'y installer si l'habitat est davantage approprié à leurs besoins.

Le tableau 1.14 montre l'importance du lien entre le climat et les différents stades du cycle biologique du poisson en Colombie-Britannique.

Qualité de l'eau

Les pêches seront touchées par la dégradation de la qualité de l'eau susceptible de résulter du changement climatique. La section *Hydrologie : changement et variabilité climatiques* décrit les paramètres de la qualité de l'eau qui pourraient être touchés par le changement et la variabilité climatiques :

- températures;
- oxygène (lien inversement proportionnel entre l'oxygène dissous et la température de l'eau);
- débit et capacités d'assimilation;
- nutriments.

**Tableau 1.14**
**Liens entre les pêches en Colombie-Britannique et les changements climatiques locaux (stades du cycle biologique touchés par le climat)**

| Pêche | Durée de vie des reproducteurs | Descente à la mer | Taille adulte | Migration |
|---|---|---|---|---|
| Saumon (toutes les espèces) | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Hareng | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Flétan, morue, plie rouge, sébaste et autres | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Thon | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Maquereau | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Sardines | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Anchois | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Crabes | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Crevettes | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Grosses crevettes | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| Huîtres et palourdes | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ |
| ◆<br>◆<br>◆ | Légende<br>très touché<br>modérément touché<br>peu touché<br><br>(adapté de McBean *et al.*, 1992, 12) | | | |

Les changements dans la qualité de l'eau modifient l'habitat du poisson. Les impacts sont tant positifs que négatifs, et incluent :

- hausse/baisse du taux de reproduction;
- déclin/augmentation de populations;
- élimination de populations;
- introduction d'espèces d'eaux chaudes plus tolérantes (McBean *et al.*, 1992; Regier et Meisner, 1990; Magnuson *et al.*, 1990).

L'impact du changement climatique dépendra de la mesure dans laquelle l'habitat modifié convient aux différentes espèces. Le changement et la variabilité climatiques peuvent rendre un habitat plus approprié pour certaines espèces et moins pour d'autres. L'aptitude à tolérer les changements du milieu varie d'une espèce à une autre en fonction du niveau de tolérance de l'espèce considérée. Par exemple, certaines espèces ne peuvent pas tolérer un faible taux d'oxygène dissous et des températures plus chaudes (p. ex., la truite), et seraient touchées négativement par le changement climatique. Pour plus de détails sur la qualité de l'eau et le poisson, le lecteur est prié de se reporter au Chapitre 5 de l'ÉPC.

La température de l'eau joue un rôle majeur dans la répartition des espèces (Jackson, 1990). Les poissons sont des ectothermes hétérothermiques dont la température corporelle diffère de quelques dixièmes de degré seulement de celle de l'eau de leur milieu biologique (Magnuson *et al.*, 1990). La température du milieu influe directement sur leur physiologie et leur

comportement (*idem*). Les changements de température peuvent accroître ou réduire la taille de l'habitat thermique disponible. Il en résulte que la température définit les limites nord et sud de chaque espèce, ainsi que la répartition du poisson dans un lac ou un cours d'eau.

Un changement de 1°C des températures annuelles moyennes pourrait causer le retrait ou l'expansion d'espèces sur des centaines de kilomètres, ou encore la perte de stocks génétiquement uniques (Jackson, 1990). La température de l'eau mène également à des changements dans les régimes de circulation et le renouvellement des nappes d'eau, deux points qui ont des répercussions considérables sur l'habitat du poisson. Les populations de poissons du golfe Saint-Laurent, en particulier, risquent d'être touchées parce que nombre des espèces en cause sont actuellement à la limite nord ou à la limite sud de leur aire de répartition (*idem*). McBean *et al.* (1992) ont suggéré que le réchauffement climatique pouvait entraîner la migration d'espèces d'eaux chaudes à partir des portions sud du bassin du fleuve Columbia. On ne prévoit pas que le changement climatique éliminera les espèces indigènes de la Colombie-Britannique, mais il pourrait en repousser les limites vers le nord et les altitudes plus élevées (*idem*). Le même phénomène de déplacement des limites pourrait favoriser l'arrivée et l'expansion de plusieurs espèces dans les Grands Lacs, y compris plusieurs espèces de cyprin et de crapet-soleil (Minns et Moore, 1992).

Des études ont été effectuées pour déterminer les impacts du changement et de la variabilité climatiques sur l'habitat du poisson dans les lacs, et en particulier les Grands Lacs. Magnuson *et al.* (1990) ont estimé les changements possibles de l'habitat thermique des espèces d'eaux froides, d'eaux fraîches et d'eaux chaudes pour le sud du lac Michigan et le bassin central du lac Érié. Leurs recherches indiquent que les habitats favorables aux espèces d'eaux froides, d'eaux fraîches et d'eaux chaudes augmenteraient dans le lac Michigan, alors que seulement les habitats favorables aux espèces d'eaux froides et d'eaux chaudes augmenteraient dans le lac Érié (*idem*, 25). Des études d'impact ont également été effectuées pour les poissons de rivière. Meisner (1990) a étalonné un modèle hydrométéorologique des températures des cours d'eau pour deux cours d'eau du sud de l'Ontario (les rivières Rouge et Humber) pendant l'été, dans le but d'estimer la diminution de l'habitat thermique de la truite mouchetée susceptible de résulter du réchauffement climatique; les résultats obtenus ont indiqué une diminution de l'habitat thermique estival de la truite mouchetée de 42 et 30 %, respectivement. On trouvera au tableau 1.15 un résumé de certains des impacts clés du changement climatique sur les pêches dans les Grands Lacs.

Les températures régissent également le rythme de développement des embryons et des larves, mais d'autres facteurs compliquent l'effet global sur les populations de poissons. Dans le cas du saumon du Pacifique et d'autres poissons qui migrent dans des bassins où les températures sont proches des températures physiologiques optimales, de légères hausses des températures pourraient ramener les conditions sous les valeurs optimales et causer un taux élevé de mortalité avant la fraye (McBean *et al.*, 1992). Les impacts nets des températures accrues et des niveaux d'oxygène moindres pourraient aller dans le sens d'une réduction de l'habitat estival et d'une plus grande fréquence de la mortalité estivale (*idem*).

**Tableau 1.15 Impacts sur les pêches dans les Grands Lacs**

| Espèces | Impacts |
|---|---|
| ◆ achigan à petite bouche<br>◆ achigan à grande bouche<br>◆ buffalo à grande bouche | ◆ extension vers le nord de l'aire de répartition |
| ◆ truite grise<br>◆ grand corégone | ◆ contraction vers le nord de l'aire de répartition |
| ◆ truite mouchetée | ◆ contraction de l'aire aux cours supérieurs<br>◆ populations réduites par suite de la concurrence avec d'autres espèces de truite pour l'habitat restant |
| ◆ grand corégone<br>◆ perchaude (sud)<br>◆ doré (sud) | ◆ populations réduites par suite d'une mortalité accrue des œufs et des larves ou d'une reproduction inhibée |
| ◆ gaspareau<br>◆ perchaude (nord)<br>◆ doré (nord) | ◆ populations accrues par suite d'une reproduction accrue et d'une mortalité moindre |
| ◆ grand corégone<br>◆ grand brochet<br>◆ doré | ◆ rendement durable moindre |

(Meisner *et al.*, 1987; Hartmann, 1990b

Autres effets

Les pêches pourraient également être touchées d'autres façons, outre les incidences sur les espèces de poissons. Par exemple, Hartmann (1990a) a suggéré qu'une baisse du niveau des lacs pourrait rendre l'accès aux ports/quais plus difficile. Cet accès est important pour la pêche sportive et commerciale. De plus, la réussite des programmes d'empoissonnement (pour la pêche tant commerciale que sportive) risque d'être compromise advenant que les espèces utilisées ne soient pas en mesure de survivre dans l'habitat fourni (Hartmann, 1990b). Le remplacement des espèces en place pourrait être nécessaire. Jackson (1990) a déterminé que le changement climatique pourrait mener à une augmentation de la production aquicole. En 1987, l'aquaculture représentait 3% de la valeur au débarquement des pêches canadiennes. On prévoit que ce chiffre pourrait grimper à 25% d'ici l'an 2000, en partie à cause du changement climatique, mais également en raison des problèmes liés aux stocks de poissons (*idem*).

Pour avoir plus de détails sur les impacts du changement et de la variabilité climatiques sur les pêches, le lecteur est invité à se reporter au chapitre 5 de l'ÉPC.

***Loisirs et tourisme***

La présente discussion se limitera aux intérêts récréatifs et touristiques directement liés à l'eau, dont les loisirs aquatiques d'extérieur et les loisirs d'hiver. Une bonne partie des activités récréatives se déroulent sur l'eau ou à proximité. Les changements hydrologiques dus au réchauffement climatique, comme des précipitations accrues, des niveaux d'eau plus bas et une qualité de l'eau moindre, peuvent avoir des répercussions sur les possibilités et le déroulement des activités récréatives et touristiques. Ces changements peuvent notamment influer sur la commodité et la valeur esthétique, les possibilités récréatives (p. ex., débits trop bas), ainsi que l'agrément et le déroulement des activités dans leur ensemble.

Loisirs aquatiques d'extérieur

Les activités récréatives aquatiques et les autres activités récréatives estivales d'extérieur pourraient être avantagées par un été plus long et des températures plus chaudes. Dans le cas du camping, par exemple, Rogers (1994) a suggéré que le prolongement de la saison estivale était susceptible de générer une hausse des avantages économiques de l'ordre de 14 millions de dollars US. Les conséquences de l'augmentation des précipitations, y compris les événements extrêmes, n'ont toutefois pas été très bien étudiées. On trouvera ci-dessous un résumé de certaines des préoccupations, en matière de loisirs et de tourisme, liées aux bas et aux hauts niveaux d'eau. Une bonne partie des incidences évoquées sont tirées des études sur les niveaux extrêmement hauts et extrêmement bas connus récemment.

Bas niveaux d'eau

- La dégradation de l'habitat, ou la disparition de milieux humides, risquent d'avoir un impact négatif sur les loisirs tributaires de l'écosystème, comme la pêche ou l'observation des oiseaux (Hartmann, 1990b; Rissling, 1996).
- Le niveau plus bas des lacs pourrait mettre à découvert une proportion accrue des rivages. Il serait toutefois possible d'adapter les activités en suivant l'évolution du rivage (Hartmann, 1990b; Wall, 1990), mais l'accès public aux plages pourrait devenir un problème. En outre, les niveaux plus bas pourraient causer l'apparition de vasières et avoir d'autres effets ayant une incidence négative sur la valeur esthétique.
- La baisse du niveau des lacs risque d'assécher les marinas et de faire reposer les installations nautiques sur le fond, menant à l'élimination à long terme de l'accès à certains ports et marinas. Des niveaux moindres pourraient rendre la profondeur d'eau insuffisante dans certains chenaux, baies et marinas, et entraîner une congestion des zones plus profondes, le pourrissement des échelles et quais, et un endommagement des embarcations ancrées (Rissling, 1996). Cette situation aurait des répercussions tant sur la pêche sportive que sur la navigation de plaisance (Hartmann, 1990b; Wall, 1990; Rissling, 1996).
- Les possibilités de canotage en rivière pourraient être réduites du fait que les débits deviendraient trop bas en tout temps à l'exception des périodes de ruissellement maximal (Hartmann, 1990b, 64).
- Les niveaux plus bas pourraient entraîner une réduction de l'érosion des rives et des escarpements, et la mise à découvert des plages pourrait mener à la formation de dunes protectrices (Rissling, 1996).

Niveaux d'eau élevés

- Des niveaux d'eau élevés pourraient avoir différentes répercussions sur l'industrie des loisirs et du tourisme. Si la majorité des scénarios des MCG prévoient une baisse des niveaux d'eau presque partout au Canada, certaines régions risquent d'être aux prises avec une hausse de ces niveaux, en particulier au cours d'épisodes extrêmes (inondations). Une étude réalisée dans un parc provincial de l'Ontario a révélé que les niveaux d'eau élevés de la fin des années 80 ont occasionné les dommages suivants (le changement climatique pourrait avoir des impacts similaires) : réduction de la superficie des plages, disparition des sentiers situés le long des rives, limitation des activités de camping, érosion des plages et des dunes,

formation de dépôts sur les plages, endommagement des installations (poteaux de lignes électriques), inondation des quais, et réduction des budgets d'exploitation par suite des coûts de nettoyage (Rissling, 1996). Des niveaux d'eau élevés peuvent avoir des effets négatifs sur la navigation de plaisance, comme des problèmes d'accès aux quais et aux rampes de mise à l'eau, un dégagement insuffisant sous les ponts, un endommagement des quais, et l'inondation des installations à terre et des marinas (*idem*).

- Pour les propriétaires riverains, y compris les propriétaires de chalets, de hauts niveaux d'eau pourraient signifier une érosion accrue des rives, et des dommages aux constructions (p. ex., inondations) de l'ordre de milliers de dollars (*idem*).

Loisirs d'hiver

Les températures hivernales plus élevées pourraient nuire aux loisirs d'hiver (p. ex., ski, pêche blanche, motoneige) en réduisant la durée et l'épaisseur de la couverture glacielle, la quantité de précipitations sous forme de neige et la fiabilité du manteau nival.

Des recherches ont été effectuées sur les impacts du changement climatique sur le ski alpin. Étant donné le changement dans la forme des précipitations (p. ex., plus de précipitations sous la forme de pluie) suggéré par les scénarios de changement climatique, l'industrie du ski alpin dans le sud de l'Ontario risque d'être décimée. Wall (1990) a suggéré que les pertes liées aux dépenses des skieurs étaient susceptibles d'atteindre 36,5 millions de dollars (dollars de 1985) par année dans le sud de la baie Georgienne, et 12,5 millions de dollars (dollars de 1985) dans la région de Collingwood. Les régions du nord de l'Ontario ne seront pas aussi touchées parce que la valeur économique de l'industrie du ski alpin y est moindre.

Pour avoir plus de détails sur les impacts du changement et de la variabilité climatiques sur les loisirs et le tourisme, le lecteur est invité à se reporter au chapitre 12 de l'EPC.

### *Énergie hydroélectrique*

Si de nombreuses formes d'énergie peuvent être touchées par le changement et la variabilité climatiques, la présente discussion portera sur la forme d'énergie qui dépend le plus des ressources en eau : l'énergie hydroélectrique. Il existe des centrales hydroélectriques dans tout le Canada. Le climat est un des facteurs clés de la production d'énergie hydroélectrique. En 1986, l'Office national de l'énergie (ONE) estimait que l'hydroélectricité constituait 12 % des sources d'énergie au Canada (Jackson, 1990). Le changement climatique aura des impacts de deux types sur l'énergie hydroélectrique : en premier lieu, des effets sur la production de l'énergie hydroélectrique et, en second lieu, des incidences sur la consommation de cette énergie. La présente discussion traite des impacts sur la production d'énergie hydroélectrique.

Une bonne partie des travaux de recherche sur le changement climatique et l'hydroélectricité a porté sur les Grands Lacs. Ces derniers sont largement utilisés pour la production d'énergie hydroélectrique. Des variations importantes des précipitations (et donc de l'écoulement fluvial et du niveau des lacs, notamment) et/ou des réductions importantes des précipitations réduiraient la productivité d'un site. La fiabilité du débit des Grands Lacs fait en sorte que la mise en place d'installations de production hydroélectrique y est souhaitable. Les débits dans les chenaux

interlacustres des Grands Lacs ne sont toutefois pas constants; depuis 1962, en effet, le débit annuel moyen de la rivière Niagara a varié de 161 800 pieds cubes à la seconde ($pi^3/s$) à 253 300 $pi^3/s$, alors que la production annuelle nette du projet hydroélectrique de Niagara (É.-U.) et du projet Saint-Laurent-FDR a varié de 9 550 GWh (gigawatts-heures) à 18 000 GWh, et de 5 340 à 7 790 GWh, respectivement (Jackson, 1990).

Les bas niveaux et les débits records atteints dans les années 60, bien qu'ils ne soient pas aussi importants que les projections relatives au changement climatique, ont entraîné des pertes de production de l'ordre de 19 à 26 % dans la rivière Niagara et le Saint-Laurent (Hartmann, 1990a). Les pertes encourues, en matière de production d'énergie hydroélectrique, ont des répercussions économiques importantes parce que cette forme de production d'énergie est relativement peu coûteuse et non polluante, comparativement aux principales solutions de rechange que sont les installations alimentées au combustible fossile ou au nucléaire (Hartmann, 1990a). La baisse du niveau d'eau des lacs due au changement climatique, jointe à une consommation accrue d'eau, pourrait mener à une perte de 4 165 GWh pour les centrales hydroélectriques canadiennes des Grands Lacs (Sanderson, 1987; Jackson, 1990; Wall, 1990). Ontario Hydro devra trouver 111 millions de dollars (dollars de 1984) pour produire l'énergie manquante au moyen du nucléaire et des combustibles fossiles (Sanderson, 1987; Wall, 1990).

La pleine mesure des impacts du changement et de la variabilité climatiques sur la production hydroélectrique dépend également des changements en matière de consommation d'énergie. On a estimé que des températures plus élevées mèneraient à une consommation moindre en hiver, mais à une consommation légèrement plus élevée en été (p. ex., climatisation), soit des économies annuelles moyennes de 61 à 92 millions de dollars (dollars de 1984) (Sanderson, 1987; Wall, 1990).

Sanderson (1987, 4) a déterminé que la saison des glaces plus courte dans les Grands Lacs influerait sur la production d'énergie hydroélectrique :

> *Actuellement, une digue contre les glaces est placée près de la source de la rivière Niagara pour réduire le risque que des embâcles influent sur le débit d'alimentation des centrales hydroélectriques. La réduction du couvert de glace du lac Érié qui se produirait dans le cas d'un scénario climatique $2xCO_2$ diminuerait les effets nuisibles des glaces et raccourcirait la durée des impacts de ces dernières sur la production hydroélectrique. Dans le Saint-Laurent, la pratique opérationnelle consiste à tirer parti de la formation d'un couvert de glace stable. Avec des températures plus élevées, il se formerait moins souvent une couverture de glace, mais le nombre d'années au cours desquelles il y aura des glaces sans qu'un couvert stable puisse se former augmenterait. C'est pourquoi un climat de type $2xCO_2$ pourrait nécessiter une modification des pratiques opérationnelles dans les centrales du Saint-Laurent.* (Traduction libre)

Singh (1987, 1988) a évalué les impacts des scénarios de changement climatique sur l'hydrologie des rivières La Grande, Caniapiscau et Opinaca-Eastmain, qui font partie du projet de la baie James. Les scénarios indiquent, pour ces bassins, une augmentation du ruissellement se traduisant par une production hydroélectrique accrue. Jackson (1990) a noté que, malgré

l'importance du sujet pour le Canada, un nombre étonnamment limité de travaux de recherche (à l'exception de travaux sur les Grands Lacs) ont examiné l'impact du changement climatique sur l'énergie hydroélectrique.

Pour avoir plus de détails sur les impacts du changement et de la variabilité climatiques sur l'énergie hydroélectrique, le lecteur est invité à se reporter au chapitre 7 de l'ÉPC.

***Santé***

Les humains utilisent l'eau pour une variété de besoins liés à la santé, dont la consommation d'eau potable, la cuisson, l'hygiène et les loisirs. Le changement et la variabilité climatiques influent sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau, et ont des répercussions importantes sur la santé humaine. Une dégradation, en particulier de la qualité de l'eau, pourrait mener à des problèmes de santé graves.

Parmi les effets liés à l'hydrologie, mentionnons :

- l'exposition aux contaminants par suite des bas niveaux d'eau et des activités de dragage;
- la capacité d'assimilation moindre des usines de traitement;
- la fermeture de plages (p. ex., pollution bactérienne après des tempêtes ou en raison de faibles débits);
- la fréquence accrue de contamination des eaux des villes (cas de maladies, notamment).

On s'attend que le changement climatique mène à plus d'événements extrêmes. Ces événements sont d'une importance particulière du point de vue de la santé humaine. Ils peuvent avoir des incidences nuisibles directes sur les humains (p. ex., noyades au cours des inondations). D'autres effets nuisibles possibles incluent ce qui suit.

- Après des pluies abondantes, les quantités excessives d'eau pluviale peuvent dépasser la capacité des usines de traitement, et entraîner l'évacuation d'eaux usées non traitées. Dans les vieilles installations, les égouts d'eau pluviale et d'eaux usées sont souvent combinés. Lorsque la capacité de ces égouts unitaires est dépassée, le mélange d'eau pluviale et d'eaux usées est évacué directement dans les cours d'eau en raison du débordement du réseau. Les inondations peuvent causer des problèmes similaires. Cette absence de traitement peut entraîner l'apparition de maladies diverses.

- Les fortes tempêtes créent des gîtes larvaires pour les insectes ou des conditions favorables aux rongeurs vecteurs de maladies. La destruction ou la contamination des abris, ainsi que la contamination des approvisionnements en eau, exposent davantage les populations humaines à des vecteurs infectieux et à la possibilité d'épidémies (p. ex., affections diarrhéiques). Ainsi, des précipitations inhabituellement fortes ont entraîné une éclosion de toxoplasmose en Colombie-Britannique en 1995; les pluies excessives ont en effet mené à un ruissellement plus abondant qui a causé la contamination d'un réservoir par des oocystes provenant de chats domestiques et sauvages (Centers for Disease Control, observ. écrites, 1995).

- La malaria est propagée par les moustiques. Les gîtes larvaires des moustiques sont tributaires de l'eau, et sont liés au niveau de la nappe phréatique, à la vitesse d'écoulement des cours d'eau, aux variations de niveau de l'eau et au mouvement des marées, facteurs sur lesquels le changement climatique pourrait avoir un impact. Selon le scénario MCGII du CCC, deux types de malaria pourraient s'installer dans le sud de l'Ontario étant donné les conditions chaudes requises pour le développement des moustiques porteurs de la maladie (Duncan, 1996).

- La cryptosporidiose cause des diarrhées graves chez les enfants et peut être mortelle pour les individus immunodéprimés; il s'agit d'une des maladies transmises par l'eau les plus fréquentes au Canada. La maladie est associée aux fermes laitières, aux eaux usées domestiques et à la contamination de l'eau en résultant. Les événements naturels (p. ex., inondations, tempêtes, pluies abondantes, fonte des neiges et cours d'eau gonflés) entraînent les matières d'origine fécale, principalement de sources agricoles diffuses, dans l'eau potable. Il s'est produit une éclosion de cryptosporidiose dans la municipalité de Waterloo en 1991, laquelle aurait causé un décès. Le changement climatique pourrait augmenter la fréquence de cette infection.

La variabilité hydrologique peut également causer des problèmes de santé. Les bactéries, virus ou parasites (qui se fixent à des insectes à sang froid pour assurer leur développement) sont sensibles à la variabilité climatique. En outre, les maladies transportées par les petits rongeurs, dont les populations dépendent fortement de l'environnement immédiat, réagissent aux changements climatiques et hydrologiques. Par exemple, l'épidémie d'hantavirus pulmonaire qui a sévi dans le sud-ouest des États-Unis aurait été attribuable à une augmentation des populations de rongeurs par suite de six années de sécheresse, suivies de pluies de printemps extrêmement abondantes en 1993. Il en est résulté une multiplication par dix de la population de souris sylvestres (porteuses de l'hantavirus).

Pour avoir plus de détails sur les impacts du changement et de la variabilité climatiques sur la santé humaine, le lecteur est invité à se reporter au chapitre 11 de l'ÉPC.

### *Navigation*

Sanderson (1987) a fait remarquer que le transport par voie d'eau est le plus efficace moyen de transport des marchandises, et que la voie maritime des Grands Lacs et du Saint-Laurent est la voie navigable la plus fréquentée du monde. De tous les modes de transport, le transport par eau est le plus vulnérable aux changements des conditions économiques, du fait qu'il est fortement tributaire des produits basés sur les ressources naturelles. Par exemple, la récession de la fin des années 80 et du début des années 90, ainsi que la sécheresse grave qui a entraîné une baisse dramatique de la production de blé en 1988, ont eu une incidence négative sur le transport maritime (Statistique Canada, 1994, 100). Deux questions clés liées au changement et à la variabilité climatiques influent sur la navigation. La première est la baisse prévue des niveaux d'eau dans nombre de bassins d'eau douce au Canada, et la seconde est la durée moindre du couvert de glace et l'allongement de la saison de transport maritime qui en résulte.

Baisse des niveaux d'eau

Le transport maritime dépend étroitement des niveaux d'eau. La section *Hydrologie : changement et variabilité climatiques* décrit les changements prévus par différents scénarios de changement climatique. Selon un scénario $2xCO_2$ pour les Grands Lacs, les débits moyens dans les chenaux interlacustres pourraient baisser de 20 à 40 % (y compris les pertes dues à une consommation accrue de l'eau) (Jackson, 1990). Les bas niveaux d'eau typiques des années 30 et 60 pourraient devenir la norme (*idem*). Ces bas niveaux d'eau auraient de nombreux effets négatifs, dont on trouvera un résumé ci-dessous.

- Étant donné les bas niveaux d'eau, il pourrait être nécessaire de réduire les cargaisons, et donc d'augmenter le nombre de voyages pour transporter la même quantité de fret (Hartmann, 1990a et 1990b; Wall 1990; Sanderson, 1987; Marchand *et al.*, 1988).

- Des opérations coûteuses de dragage des chenaux (Hartmann, 1990a et 1990b; Wall, 1990; Sanderson, 1987; Marchand *et al.*, 1988) pourraient être requises. Si ces travaux n'étaient pas faits, le plus grand nombre de voyages requis pourrait faire augmenter du tiers les coûts de transport (Wall, 1990; Sanderson, 1987). La législation environnementale pourrait par ailleurs interdire le dragage dans certaines zones gravement contaminées, comme les zones critiques définies par la Commission mixte internationale (Hartmann, 1990a et 1990b).

- La circulation accrue pourrait causer des engorgements aux goulots d'étranglement actuels (comme les écluses) de la voie maritime (*idem*).

- Dans l'ensemble, les armateurs devront vraisemblablement assumer des coûts accrus (Marchand *et al.*, 1988; Sanderson, 1987; Hartmann, 1990a et 1990b; Jackson, 1990; Wall, 1990). Sanderson (1987) et Marchand *et al.* (1988) ont estimé que les coûts du transport maritime dans les Grands Lacs augmenteraient de 30 %. Cohen (1986) a pour sa part suggéré que les pertes économiques annuelles au chapitre de la navigation dans les Grands Lacs se chiffreraient à près de 27,8 millions de dollars (américains).

Les coûts associés à des niveaux d'eau plus bas seraient toutefois contrebalancés par les avantages découlant d'une saison de navigation plus longue, comme nous l'avons mentionné précédemment.

Saison de navigation plus longue

Actuellement, au Canada, de nombreuses voies de transport maritime sont fermées pendant une partie de l'hiver en raison de la couverture glacielle. Les glaces recouvrent une bonne partie des Grands Lacs et du Saint-Laurent au cours des mois d'hiver. De la même manière, elles limitent à une très courte saison estivale le transport dans l'archipel Arctique canadien et sur le Mackenzie. Les six semaines de saison active du port de Churchill sont un bon exemple de ces limitations (Jackson, 1990). Les projections des différents scénarios de changement climatique suggèrent toutefois que les températures plus élevées mèneront, pour la plupart des régions canadiennes, à une saison de navigation et à une période d'eaux libres plus longues (tableau 1.16).

| Tableau 1.16 Résumé des impacts sur la navigation au Canada | | |
|---|---|---|
| **Région** | **Changement climatique** | **Impacts sur la navigation** |
| Arctique | Réduction du couvert de glace | ◆saisons de transport maritime plus longues au Labrador et dans la baie d'Hudson, notamment; plus grande utilisation du port de Churchill pour le grain et le ravitaillement, par exemple;<br>◆transport maritime accru dans le Haut-Arctique; possibilité de besoins accrus en matière de recherche et sauvetage, d'aides à la navigation et de services similaires. |
| Mackenzie | Couvert de glace moins important, niveaux d'eau plus élevés | ◆saison plus longue, calaison et charges utiles augmentées. |
| Grands Lacs | Niveaux d'eau plus bas | ◆une réduction de la calaison et de l'efficience de la flotte des Grands Lacs mènera à des coûts de transport plus élevés;<br>◆pourrait être atténuée par des ouvrages de régulation du niveau d'eau. |
| | Couvert de glace réduit | ◆rend la navigation pendant onze mois ou à l'année plus facilement réalisable. |
| (modifié de IBI Group, 1990, 4) | | |

Selon un scénario de changement climatique de type $2xCO_2$, les couverts de glace maximaux moyens diminueraient comme suit (valeurs actuelles entre parenthèses) : lac Supérieur 0 % (72 %), lac Michigan 0 % (38 %), lac Huron 0 % (65 %), lac Érié 50 % (90 %) et lac Ontario 0 % (33 %) (Sanderson, 1987). Ces statistiques montrent que la couverture glacielle diminuera de façon draconienne. On estime que cette saison plus longue d'eaux libres allongera d'un à trois mois la saison du transport maritime dans les Grands Lacs et le Saint-Laurent (Sanderson, 1987; Wall, 1990).

Jackson (1990) a indiqué que, dans un golfe du Saint-Laurent et sur une côte atlantique libres de glaces, des coûts d'exploitation annuels (p. ex., brise-glace) de l'ordre de 18,5 millions de dollars seraient éliminés. Il a toutefois fait remarquer que l'activité maritime accrue mènerait à une augmentation des coûts d'entretien des bouées, et de recherche et sauvetage.

Jackson (1990) a également averti que d'autres facteurs, outre une saison maritime plus longue, ont une incidence sur la viabilité de la navigation. Par exemple, il semblerait que Churchill (Manitoba) soit en mesure de tirer avantage d'une saison maritime plus longue; les quantités de grain récemment expédiées par le port ont toutefois atteint leur plus bas niveau depuis 60 ans. Les forces du marché, en particulier la concurrence de Thunder Bay, déterminent la viabilité du port. Churchill est cependant depuis peu une destination de croisière recherchée et on s'attend que cette situation s'accentue du fait des impacts du changement climatique (*idem*). D'autres travaux de recherche sont requis, non seulement sur la navigation, mais également sur les liens entre la navigation et d'autres secteurs.

### *Approvisionnement en eau et consommation des villes*

Dans les conditions climatiques actuelles, les besoins en eau augmentent en raison de la croissance de la population et du développement économique. La consommation continuera à monter dans des conditions climatiques plus chaudes et nécessitera une gestion plus intensive des ressources en eau (GIEC, 1996). Lawford (1990) a suggéré que, si les tendances actuelles de

consommation à la hausse observées dans l'Ouest canadien se maintiennent, la consommation d'eau approchera le seuil de disponibilité à certains moments de l'année. Une meilleure gestion des infrastructures, des politiques de tarification et une gestion améliorées de la consommation pourraient atténuer certaines des incidences d'une consommation d'eau croissante (Mitchell et Shrubsole, 1994; Frederick et Gleick, 1989).

Changement climatique et approvisionnement en eau des villes

Une étude dans la rivière Grand a permis à Robinson et Creese (1993) de déterminer que le réchauffement climatique modifierait de façon importante les réseaux d'eau des villes de Cambridge, Kitchener et Waterloo. Ils ont conclu ce qui suit :

> *Le sous-réseau d'approvisionnement en eau sera davantage touché du côté approvisionnement que du côté consommation. L'utilisation quotidienne maximale annuelle augmentera de manière négligeable, par rapport au scénario climatique utilisé comme base de comparaison. L'effet est suffisamment faible pour que l'incertitude des prévisions relatives aux populations futures suffise à l'occulter. Une réduction du débit de la rivière Grand aura une incidence importante sur la mise en œuvre du programme d'alimentation artificielle Mannheim. Selon le scénario climatique qui a servi de base de comparaison, une nouvelle source d'eau ne sera pas requise avant 2024. Selon les scénarios du GISS et du GFDL, cependant, ce point sera atteint cinq à six ans plus tôt et, selon le scénario du CCC, il le sera onze ans plus tôt, soit en 2013. Le projet Mannheim sera également touché par les changements de la qualité de l'eau de la rivière Grand dus au réchauffement climatique...* (Robinson et Creese, 1993, 185). (Traduction libre)

Consommation en eau des villes

Dans l'étude de Cohen (1987a), des scénarios $2xCO_2$ basés sur les MCG du GISS et du GFDL ont été utilisés pour prévoir la consommation en eau des villes dans la région des Grands Lacs. Selon les modèles de régression utilisés, fondés sur l'évapotranspiration mensuelle possible pour les mois de mai à septembre, la consommation d'eau estivale augmenterait de 5,6 % dans le scénario GISS, et de 5,2 % dans le scénario GFDL. Si la consommation d'eau hivernale ne semble pas être touchée par le changement climatique, la consommation annuelle augmenterait par contre de 2,6 % dans le cas du scénario GISS, et de 2,4 % pour le scénario GFDL. Cohen (1987a) prévient que les projections n'incluent pas les événements extrêmes, comme des périodes de sécheresse estivales.

Consommation en eau des villes pour l'arrosage des pelouses

Lamothe et Périard (1989) ont mené une étude sur l'utilisation de l'eau des villes pour l'arrosage des pelouses des particuliers au Québec. L'arrosage des pelouses est un sujet de préoccupation depuis les années 70, compte tenu des grandes quantités d'eau consommées et des coûts en cause. On estime que la quantité d'eau utilisée pour l'arrosage pendant une heure est égale à celle consommée en une journée par une famille de cinq personnes (*idem*). L'arrosage des

pelouses dans la région de Québec coûterait quelque 2,5 millions de dollars (dollars de 1979) annuellement. Le changement climatique ajoute aux inquiétudes. Les auteurs ont suggéré que le réchauffement climatique augmentera la consommation d'eau pour l'entretien des pelouses de 20 à 30% . Afin de répondre à cette demande accrue, de nouvelles infrastructures coûteuses devront être mises en place. Ils maintiennent que, sans égard au changement climatique, il serait prudent de mettre en œuvre des mesures de conservation de l'eau dès maintenant. Les techniques de conservation de l'eau possibles incluent l'utilisation de compteurs, l'adoption de barèmes efficaces de tarification de l'eau, l'imposition de restrictions en matière d'arrosage des pelouses et l'utilisation de variétés de gazon tolérant la sécheresse.

Variabilité climatique et consommation en eau

Une étude, effectuée par Akuoko-Asibey *et al.* (1993) dans la ville de Calgary, a examiné les impacts de la variabilité climatique sur la consommation en eau. Les résultats de l'étude ont révélé ce qui suit :

- la consommation d'eau hebdomadaire par personne demeure relativement constante lorsque les températures hebdomadaires maximales moyennes sont inférieures à 15 °C;
- la consommation d'eau hebdomadaire par personne a tendance à augmenter lorsque les températures montent, en particulier lorsque les températures quotidiennes sont supérieures à 15 °C;
- la consommation d'eau hebdomadaire par personne diminue parallèlement aux précipitations sans toutefois baisser sous les 400 millions de litres, et ce, sans égard au régime pluvial naturel dans la ville de Calgary (*idem*).

Planification à long terme : approvisionnement en eau des villes et changement climatique

Peu de municipalités incorporent la notion de changement climatique à leur planification à long terme. La municipalité régionale de Waterloo a, dans son rapport sur une stratégie de planification à long terme de l'eau basée sur l'utilisation de la rivière Grand comme source d'approvisionnement (par Paragon Engineering, 1994), reconnu la nécessité de prendre en compte les variations naturelles, les variations résultant de l'activité humaine et le changement climatique. Pour évaluer les impacts possibles du changement climatique sur l'utilisation de la rivière Grand comme source d'approvisionnement, Paragon Engineering a procédé à une série de simulations du rendement de la rivière en fonction de valeurs réduites du débit. Des réductions de 5 %, 10 % et 20 % ont été appliquées à toutes les valeurs de débit de la rivière dans l'ensemble du réseau (*idem*). Les résultats sont résumés ci-dessous :

> *Comme on pouvait le prévoir, à mesure que le pourcentage de réduction augmente, la fiabilité d'atteinte des débits cibles et les débits minimaux diminuent. Un examen des résultats de simulation détaillés indique que la majorité des rendements insuffisants surviennent entre octobre et décembre, période au cours de laquelle les réservoirs connaissent des bas niveaux plus fréquents. Il serait possible d'améliorer la fiabilité d'atteinte des valeurs cibles dans des conditions de débit entrant réduit en abaissant le débit cible d'octobre au niveau de celui de novembre, et ce dernier au niveau de celui de décembre.*

> *Les résultats indiquent cependant que la fiabilité d'atteinte des débits cibles est relativement élevée même pour une réduction des débits de l'ordre de 20 %. Par exemple, une réduction de 5 % de l'ensemble des valeurs de débit de la rivière mènerait à des rendements insuffisants, à Doon, d'une durée moyenne d'un mois pour trois des trente-neuf années pour lesquelles on dispose de données. Une réduction des débits de l'ordre de 20 % mènerait à des rendements insuffisants d'une durée moyenne d'un mois pour neuf des années considérées. Il faut cependant reconnaître que ces valeurs sont des moyennes, de sorte que, certaines années, on connaîtra des pénuries d'une durée d'un mois ou plus alors que, d'autres années, les pénuries dureront seulement une ou deux semaines.*
>
> *Par rapport aux conditions existantes, pour lesquelles la fiabilité d'atteinte du débit à Doon est de 100 % et se traduit par l'extraction de 16 millions de gallons impériaux par jour, il est clair qu'il se produira des périodes de pénurie dans des conditions de changement climatique. Pour des quantités supérieures à 16 millions de gallons, comme il est décrit précédemment, il serait possible de laisser reposer ou alimenter les aquifères au début du printemps et en hiver de façon qu'ils puissent répondre à la demande accrue au cours des périodes de pénurie d'approvisionnement de la rivière Grand. Le risque de pénurie augmente néanmoins dans un scénario de changement climatique. Le nombre et la durée des pénuries augmenteraient, principalement à la fin de l'été et à l'automne, et la gravité des conditions de bas niveau augmenterait également (idem).* (Traduction libre)

Réservoirs

Burn et Simonovic (1996) ont évalué les impacts du changement climatique sur le réservoir Shellmouth, dans l'ouest du Manitoba. Le changement climatique mènera vraisemblablement à une fiabilité moindre du point de vue des usages récréatifs et de l'approvisionnement en eau, et à une fiabilité accrue pour ce qui est de la prévention des inondations. Ces résultats concordent avec les travaux de Klemes (*idem*). Leur étude a permis de déterminer que la disponibilité réduite de l'eau augmentera probablement la fréquence des pénuries d'eau et réduira de ce fait la fiabilité de l'approvisionnement. De la même manière, on prévoit que la baisse de capacité d'emmagasinage du réservoir due aux bas niveaux empêchera plus souvent de satisfaire les exigences pour les loisirs (*idem*). Des débits moindres pourraient faire diminuer le nombre d'inondations et, ainsi, accroître la fiabilité en matière de prévention des inondations. Les chercheurs ont suggéré qu'il pourrait y avoir des avantages à réduire la priorité élevée actuellement accordée à la prévention des inondations, et à privilégier davantage l'approvisionnement en eau et les activités récréatives, puisqu'on prévoit que les inondations seront moins fréquentes dans des conditions de changement climatique (*idem*, 476). Il va sans dire que cette conclusion diffère de celle des chercheurs qui croient que les événements extrêmes, comme les inondations, deviendront plus fréquents dans différents scénarios $2xCO_2$ .

### *Entreprises industrielles/commerciales*

Industrie

Les entreprises industrielles utilisent les ressources en eau pour a) les procédés de production et le rejet des effluents, et b) pour le transport. On peut citer, à titre d'exemples, les entreprises d'expédition du grain, de transformation des aliments, de fabrication de pâtes et papiers, de raffinage du pétrole, de produits chimiques organiques, d'extraction du minerai et d'affinage, de production de fer et d'acier, de fonderie, de galvanoplastie et de fabrication des plastiques (Hartmann, 1990b). Des niveaux d'eau moindres (en particulier dans les Grands Lacs) et un écoulement fluvial réduit auraient des incidences négatives sur les entreprises industrielles.

Commerce

Nombre d'entreprises commerciales, comme les marinas, hôtels, centres de villégiature et restaurants, doivent leur succès à leur emplacement le long du rivage ou à proximité d'un plan d'eau. Ce lien est particulièrement vrai dans le cas des Grands Lacs. Si les niveaux d'eau baissent, comme le suggèrent divers scénarios de changement climatique, ces commerces connaîtront des problèmes similaires à ceux des années 60 (Hartmann, 1990b), incluant un panorama moins attrayant, des installations de mise à quai inaccessibles, et des ouvrages de prise d'eau ou d'évacuation des eaux usées inutilisables (*idem*). Heureusement, certaines de ces entreprises pourront s'adapter en suivant le déplacement de la ligne de rivage. Mais, un bon nombre ne pourront cependant pas le faire aussi facilement (p. ex., infrastructure). Les autres entreprises susceptibles d'être touchées négativement par le changement climatique incluent celles dont les activités sont liées au ski, à la motoneige, à la pêche blanche et à la navigation de plaisance (p. ex., à cause des débits trop bas).

### *Conflits et concurrence liés à l'eau*

Les importantes diminutions de l'écoulement fluvial, du niveau des eaux souterraines et du niveau des lacs prévues par les scénarios de changement climatique risquent, si elles se matérialisent, d'engendrer de la concurrence et des conflits en ce qui a trait aux divers usages de l'eau (p. ex., entre la consommation et les autres usages), entre les utilisateurs en amont et en aval, entre les zones urbaines et rurales, entre les régions arides et semi-arides, et entre les diverses autorités gouvernementales dans le cas d'eaux relevant de plus d'une de ces instances. Souvent, l'allocation de l'eau pour des besoins critiques et immédiats comme l'approvisionnement en eau des villes et l'irrigation peut éclipser d'autres usages comme les usages biologiques des débits entrants (habitat du poisson, écosystèmes aquatiques), les loisirs et la navigation. La présente section examine certaines des questions liées à la quantité d'eau dans le bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent, la rivière Saskatchewan, les eaux frontalières des Prairies, le bassin du Mackenzie et les eaux souterraines en milieu rural. Des réserves d'eau variables et limitées exacerbent également les problèmes de qualité de l'eau, et l'accès à une eau de grande qualité pourrait être une cause de conflit.

Les plans de régularisation des lacs Supérieur et Ontario ont été conçus sur la base d'historiques d'approvisionnements en eau et se sont révélés peu robustes au cours des simulations de

conditions plus extrêmes. Lorsque l'on simulait des approvisionnements nets faibles, par exemple, les débits minimaux requis par les plans de régularisation étaient supérieurs aux approvisionnements en eau des Grands Lacs. Le niveau des lacs est passé sous les limites inférieures de régularisation des lacs (Lee *et al.*, 1994). Les plans de régularisation existants n'ont pas été conçus pour les approvisionnements nets faibles et les bas débits des chenaux interlacustres prévus par les scénarios de changement climatique (Hartmann, 1990b). Il faudrait réduire le débit de ces chenaux pour maintenir le niveau des lacs, alors que le maintien de leur débit en abaisserait le niveau. On doit en outre en arriver à un équilibre entre les intérêts en amont, comme la navigation de plaisance, les ressources écologiques (milieux humides, pêches), les propriétaires de chalet riverains et les marinas, et les intérêts riverains en aval, comme la production hydroélectrique, les installations portuaires, la Voie maritime du Saint-Laurent et les ressources écologiques (milieux humides, pêches). Le Traité sur les eaux limitrophes (1909) impose une hiérarchie des intérêts des Grands Lacs dont la protection ou l'avancement sont prioritaires; ces intérêts incluent : les usages domestiques et sanitaires, la navigation, l'énergie hydroélectrique et l'irrigation (*idem*). Il pourrait être nécessaire de modifier ces priorités pour tenir compte d'autres intérêts commerciaux, industriels, riverains, récréatifs et écologiques. La plupart des mesures publiques de gestion des ressources en eau dans les Grands Lacs ont été axées sur la gestion d'une surabondance d'approvisionnement. Les scénarios de changement climatique suggèrent qu'avec des baisses de niveau des lacs de l'ordre de 20 cm à 2 m et des diminutions du ruissellement annuel pouvant atteindre 50 %, le recours à un type de gestion dans des conditions de rareté de l'eau pourrait s'imposer (Mortsch et Quinn, 1996).

La sécheresse de 1988 a nui à l'industrie du transport maritime du Mississippi; des barges ont échoué en raison du bas débit du fleuve. En guise de solution, l'Illinois et d'autres États en aval ont proposé d'augmenter à la hauteur de Chicago la quantité d'eau dérivée du lac Michigan vers la rivière Illinois pour élever le niveau dans la voie maritime du Mississippi. Le débit de 3 200 $pi^3$/s aurait été porté à 10 000 $pi^3$/s pendant cent jours. Comme la Cour suprême des États-Unis avait fixé la quantité d'eau qu'il était possible de dériver, il fallait que le président déclare l'état d'urgence pour permettre la dérivation (Changnon, 1989). Les autres États des Grands Lacs et le Canada ont signifié leur opposition au projet, et le U.S. Army Corps of Engineers a refusé la dérivation. La dérivation de l'eau des Grands Lacs est une question de compétence intergouvernementale extrêmement sensible. Aux États-Unis, un précédent a été établi dans les années 80 alors que des controverses liées à l'eau dans les États du Wyoming, de l'Idaho, de l'Oregon et du Colorado ont rendu l'échange d'eau entre bassins légalement possible. La signature de la Charte des Grands Lacs en 1985 a constitué une réponse aux propositions de dérivation de l'eau des Grands Lacs vers les Grandes Plaines. Certains croient toutefois que le précédent, en ce qui a trait à l'échange d'eau entre bassins en cas de sécheresse, a plutôt été créé en 1952-1956 (Botts, 1981, Changnon, 1994). Le changement climatique mènera à des demandes de dérivation accrue de l'eau des Grands Lacs pour satisfaire aux besoins des municipalités, de la navigation, de la production hydroélectrique et de l'agriculture dans le bassin et à l'extérieur de ce dernier. Les besoins en eau de grandes villes comme New York et Philadelphie, par exemple, pourraient augmenter l'intérêt pour les questions de dérivation (Changnon, 1994).

La rivière Saskatchewan est une importante ressource fiable d'eau alpine de grande qualité pour la région semi-aride des Grandes Plaines, que les provinces des Prairies se partagent. Il existe des ententes officielles sur l'eau depuis 1948, mais les gouvernements fédéral et provinciaux ont

signé en 1969 l'Accord-cadre sur la répartition de l'eau des Prairies. Sa « principale disposition engage l'Alberta à permettre le passage en Saskatchewan de la moitié du débit naturel qui a sa source en Alberta ou traverse cette dernière. La Saskatchewan a pris un engagement similaire vis-à-vis du Manitoba... » (Traduction libre de Pearse *et al.*, 1985 *in* Wittrock et Wheaton, 1992). Les sécheresses des années 80 ont mis l'entente à l'épreuve; les divers gouvernements ont dû faire des choix difficiles pour respecter les engagements pris (Bjonback, 1991). L'agriculture d'irrigation et l'évaporation des réservoirs sont de très importants consommateurs de l'eau de surface dans les Prairies canadiennes (Bauder, 1991). Les scénarios de changement climatique qui vont dans le sens d'une diminution des eaux de ruissellement et d'une consommation d'eau accrue pourraient mener à des désaccords sur la répartition de l'eau. Dans le bassin de la rivière Saskatchewan Sud, le ruissellement alpin alimente quelque 500 000 ha de terres irriguées dans le sud de l'Alberta (la superficie totale des Grandes Plaines canadiennes est d'environ 650 000 ha). L'emplacement stratégique d'un grand utilisateur en amont, en plus de la matérialisation des scénarios de changement climatique prévoyant une diminution de l'humidité du sol et un ruissellement moindre dans les Rocheuses et les plaines, pourrait réduire de façon importante les débits qui entrent dans la province de la Saskatchewan; ce point pourrait avoir des répercussions majeures sur les responsabilités de l'Alberta en matière de satisfaction des besoins en eau de la Saskatchewan en vertu de l'accord (Bjonback, 1991, 168-169). Les usages en amont et en aval (irrigation, production hydroélectrique, loisirs, approvisionnement en eau des villes et des industries, dilution des eaux usées, exigences écologiques de débit entrant) pourraient être la cause de conflits croissants, et les provinces pourraient utiliser plus que leur part. Selon Pearse *et al.*, 1985 *in* Wittrock et Wheaton, 1992, l'Accord-cadre est fragile puisque n'importe laquelle des parties peut adopter unilatéralement une loi qui l'en exempterait. Le rôle d'un tel instrument dans le développement économique et la gestion environnementale futurs est critique, car de nombreuses rivières importantes des Prairies traversent les frontières provinciales.

L'eau de surface fait l'objet d'un partage entre les provinces des Prairies et les États du Montana et du Dakota du Nord (p. ex., les rivières Souris et Rouge, et les rivières St. Mary et Milk). L'eau de surface en Alberta, en Saskatchewan et au Manitoba fournit actuellement suffisamment d'eau pour répondre aux besoins actuels et à une partie des besoins futurs, mais l'usage de l'eau dans les affluents internationaux s'approche du point de répartition maximale (Bauder, 1991). Les années 80 ont été difficiles pour cette région. Le débit de la rivière Milk a été inférieur à la normale pendant neuf de ces dix années, et les autres affluents de la rivière Missouri ont présenté des débits inférieurs aux normales pendant six de ces dix années. La satisfaction des exigences internationales en matière d'irrigation et de répartition de l'eau s'est heurtée à des problèmes importants (Bjonback, 1991, 168). L'expérience des années 80 pourrait devenir la norme, si les faibles approvisionnements en eau prévus par certains des scénarios de changement climatique se réalisent.

L'hydrologie et la base de ressource en eau des provinces des Prairies et des Grandes Plaines sont fortement influencées par le climat des Rocheuses; une portion importante de l'approvisionnement en eau et de sa disponibilité est déterminée par la fonte des neiges et des glaces. Les États américains plus secs du Montana, du Wyoming, du Dakota du Nord et du Dakota du Sud, ainsi que certaines parties du Nebraska, dépendent pour leur part davantage de l'eau souterraine (Bjonback, 1991). Les bassins où la dépendance vis-à-vis de l'eau souterraine est plus accentuée ne sont pas aussi bien définis, et la relation entre les caractéristiques de la surface et les

ressources en eau sont relativement peu connues, mal documentées ou mal contrôlées; il sera plus difficile de déterminer les impacts du changement et de la variabilité climatiques, et d'y faire face (*idem*). Dans de nombreux États, la répartition de l'eau de surface est régie par des lois, ce qui n'est pas le cas de l'eau souterraine. L'aquifère Ogallala est utilisé de manière intensive pour l'irrigation par les industries de l'agriculture et de l'élevage. Les approvisionnements en eau pourraient être affectés gravement d'ici 2020; pour maintenir les industries, il faudra trouver de nouvelles sources ailleurs. Les scénarios de changement climatique exacerbent la situation. Les Grands Lacs ont été considérés comme une source d'eau possible (Ashworthy, 1987; Botts, 1981).

Dans la partie du bassin du Mackenzie située dans les Territoires du Nord-Ouest, l'eau et le fleuve sont un élément majeur du mode de vie de la région. Les scénarios de changement climatique suggèrent des modifications importantes des niveaux et des débits d'eau (Kerr, 1997). Les Territoires du Nord-Ouest sont situés en aval de la Colombie-Britannique, de la Saskatchewan, de l'Alberta et du Yukon, et les changements qui surviendront dans ces provinces et au Yukon auront une incidence sur la région. Les Territoires du Nord-Ouest s'inquiètent de ce que, sans la protection d'un accord avec les provinces en amont, des ouvrages de dérivation d'eau pourraient réduire les débits et avoir une incidence négative (Mortsch, 1997). L'Accord-cadre sur les eaux frontalières du bassin du fleuve Mackenzie constituera à cet égard un nouveau mécanisme en vue de la gestion intergouvernementale de l'eau du fleuve.

Dans le sud de l'Ontario, la sécheresse est un problème récurrent. Certaines parties de la province sont touchées presque chaque année. Pendant les périodes de sécheresse, il surgit de la concurrence et des conflits entre les utilisateurs ruraux de l'eau souterraine et de l'eau de surface. Les approvisionnements en eau souterraine sont particulièrement vulnérables (Kreutzwiser, 1996). L'utilisation des approvisionnements ruraux en eau dans les zones urbaines a été une source de conflit en Ontario (Hofmann, 1996; Leadlay, 1996). On prévoit que le changement climatique exacerbera les problèmes d'alimentation et de rabattement de la nappe souterraine, ainsi que d'approvisionnement. Les approvisionnements ruraux d'eau domestique sont eux aussi vulnérables (McLaren et Sudicky, 1993). Le changement climatique pourrait envenimer les conflits actuels; le problème fait ressortir la nécessité d'une gestion et d'une répartition appropriées de la ressource en eau, ainsi que d'une résolution satisfaisante des conflits.

### *Conclusions*

Le tableau 1.17 résume certains des principaux points sur lesquels nous manquons de données, en ce qui a trait au changement climatique et aux secteurs tributaires de l'eau. Pour une analyse plus détaillée des lacunes dans ces secteurs (c.-à-d. n'étant pas nécessairement spécifiques à l'eau), le lecteur est prié de se reporter au secteur approprié.

Timmerman et Grima (1988) ont suggéré que, même si le changement climatique risque d'influer de manière importante sur les structures sociales et économiques, la majeure partie des recherches ont porté sur les aspects biophysiques. Ils estimaient quant à eux que les études réalisées devraient s'inscrire dans un cadre de compréhension sociale et d'analyse économique, et qu'une information facile à interpréter devrait être fournie aux décideurs (publics et privés), pour qu'ils puissent faire les choix économiques les plus efficients.

Changnon (1987) a conclu que, puisque la recherche sur les impacts du changement climatique en est encore à ses débuts, nous ne disposons pas encore de réponses définitives. Les décideurs ont besoin de telles analyses des risques, des possibilités et des vulnérabilités pour planifier efficacement le changement climatique.

## CHANGEMENT ET VARIABILITÉ CLIMATIQUES : ADAPTATION

Les sections précédentes ont décrit les impacts du changement et de la variabilité climatiques sur le réseau hydrologique et les usages de l'eau. La présente section examine les mesures qu'il convient de prendre du point de vue de l'adaptation à ces impacts.

**Tableau 1.17 Résumé des lacunes/limites de la recherche**

| Domaine | Lacunes |
|---|---|
| Agriculture | • Études axées sur les impacts possibles, en supposant la non-adaptation des producteurs. Les résultats ont tendance à être prudents et à surestimer les impacts négatifs (Mendelsohn *et al.*, 1994, 1996).<br>• Plus de travaux requis sur les méthodes de conservation de l'eau, y compris une irrigation moindre et des pratiques accrues de rétention à la ferme (Lawford, 1990).<br>• Les politiques et la planification en agriculture ne tiennent pas compte du changement climatique (Stewart *et al.*, 1988). |
| Pêches | • Études axées sur les pêches dans les Grands Lacs et en Colombie-Britannique; peu d'études sur les pêches dans le Nord, les régions intérieures et les petits lacs.<br>• Études davantage basées sur le jugement des experts que sur des preuves empiriques.<br>• Absence de surveillance des conditions actuelles, sans mentionner les conditions futures. |
| Loisirs et tourisme | • Peu d'études spécifiquement consacrées aux loisirs aquatiques; études davantage basées sur le jugement des experts que sur des preuves empiriques.<br>• Le ski alpin en Ontario a été un des principaux points étudiés. |
| Hydroélectricité | • Études sur les Grands Lacs et le Québec seulement (Jackson, 1990); Singh, 1987; Sanderson, 1987).<br>• Peu d'études sur le sujet (p. ex., aucune étude sur la Colombie-Britannique). |
| Santé | • Recherches limitées sur la santé; très peu de travaux sur les liens avec les ressources en eau.<br>• Études davantage basées sur le jugement des experts que sur des preuves empiriques. |
| Navigation | • Recherches limitées surtout axées sur les Grands Lacs, à l'exception de certains travaux sur le Nord et les Maritimes.<br>• Études davantage basées sur le jugement des experts que sur des preuves empiriques (sauf les études sur les Grands Lacs). |
| Eau des villes | • Peu d'études sur l'eau des villes (Prairies).<br>• Les questions d'adaptation doivent être étudiées.<br>• Faible intérêt des villes à planifier en fonction du changement climatique (un seul exemple trouvé). |
| Réservoirs | • Peu d'études effectuées. |
| Entreprises Industrielles/ commerciales | • Aucune recherche effectuée. |

Dans le cadre du Projet du bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent, l'adaptation au changement et à la variabilité climatiques a donné lieu aux points suivants :

- un processus de changement (comportement, action, attitude, politique, prise de décisions); menant à
- une ou plusieurs actions (passives, réactives ou prévisionnelles); ayant
- un ou plusieurs résultats visés et une durée prévue.

L'adaptation aux impacts possibles du changement climatique est importante en raison de la portée de ces derniers, qui incluent des précipitations accrues, un niveau d'eau des lacs, un écoulement fluvial, une qualité de l'eau et un couvert de glace moindres, et davantage d'événements extrêmes.

Les stratégies d'adaptation simples et faciles à mettre en œuvre peuvent être considérées comme des mesures de type « sans-regrets ». Ces mesures jouissent d'une faveur croissante parce qu'elles règlent des problèmes environnementaux connus, en plus des problèmes liés au changement climatique. Elles demeurent précieuses d'un point de vue coût-avantages sans égard à l'ordre de grandeur du changement climatique. Une bonne partie de la présente section portera sur les options « sans regrets » et sur les stratégies d'adaptation de nature très générale. Dans le cas d'impacts importants, comme une baisse possible de l'écoulement fluvial de l'ordre de 50 %, des stratégies très spécifiques et spectaculaires devront être mises en œuvre. Il faudra consacrer davantage de recherches aux questions d'adaptation.

***Importance de l'adaptation***

Burton (1995, 7) a suggéré que l'adaptation au changement et à la variabilité climatiques était justifiée par les six raisons suivantes :

1. Il n'est pas possible d'éviter complètement le changement climatique. Une partie de ce qui est survenu est irréversible.
2. L'adaptation par anticipation (c.-à-d. par mesure de prudence) est plus efficace et moins coûteuse qu'une adaptation d'urgence, mise en œuvre à la dernière minute.
3. Le changement climatique pourrait être plus rapide et plus accentué que les estimations actuelles ne le laissent supposer. Les surprises désagréables ne doivent pas être exclues.
4. On peut tirer des avantages immédiats d'une meilleure adaptation à la variabilité climatique et aux événements atmosphériques extrêmes.
5. On peut tirer des avantages immédiats de l'élimination de politiques et de pratiques mésadaptées.
6. Le changement climatique apporte autant des possibilités que des menaces. Dans l'avenir, il faudra tirer des avantages du changement climatique.

Aspects économiques de l'adaptation

La mise en œuvre de stratégies d'adaptation liées à l'eau et au changement climatique est particulièrement cruciale en raison de l'importance de l'eau. L'adaptation présente également de vastes avantages économiques.

**Tableau 1.18 Coûts estimés de l'adaptation des ressources en eau au climat actuel au Canada et tendances liées au changement climatique**

| Secteur/Activité | Coût total (en millions $) | Pourcentage attribuable à l'adaptation climatique | Coûts de l'adaptation climatique (en millions $) | Tendance possible en cas de changement climatique |
|---|---|---|---|---|
| Drains en tuyaux, tranchées de drainage, égouts d'eau pluviale | 852,6 | 75 | 639,5 | augmentation |
| Réservoirs d'eau | 27,4 | 10 | 2,7 | augmentation |
| Barrages, retenues | 173,3 | 70 | 121,3 | augmentation |
| Lutte contre les inondations | 4,7 | 80 | 3,7 | augmentation |
| Total | 1 058,0 | | 767,2 | |

(Herbert et Burton, 1995; Mortsch, 1995)

Du point de vue économique, on estime que la contribution de l'eau à l'économie canadienne se situe entre 7,5 et 23 milliards de dollars par année (Environnement Canada, 1992). Comparativement à d'autres pays, le Canada a une abondance d'eau. Par exemple, il possède environ 9 % de la quantité totale d'eau de ruissellement dans le monde, pour seulement 1 % de la population mondiale (Bruce et Mitchell, 1995). Tout comme l'eau n'est pas répartie également dans le monde, elle n'est pas non plus répartie également au Canada. Cette répartition inégale a mené à l'utilisation de systèmes d'irrigation dans le sud de l'Alberta, à la construction de pipelines d'approvisionnement en eau entre London et le lac Huron, et entre Regina et la rivière Qu'Appelle (*idem*). Cette fausse perception d'abondance de l'eau a souvent mené à en faire un mauvais usage au Canada (Environnement Canada, 1992).

Le Canada dépense des milliards de dollars pour s'adapter au climat actuel. Comme l'indique le tableau 1.18, on prévoit que le changement climatique fera grimper le coût de l'adaptation des ressources en eau. Ces mesures incluent la construction et l'agrandissement de barrages, de tranchées de drainage et d'autres ouvrages de lutte contre les inondations ou la sécheresse.

Dans la présente synthèse, les différentes méthodes d'adaptation possibles sont classées comme suit :

- répartition des pertes;
- absorption des pertes;
- recherche;
- éducation (changement de comportement);
- modification des événements, prévention des effets, évitement des impacts (structurels et non structurels).

Après une analyse des catégories ci-dessus, nous passerons brièvement en revue différentes mesures d'adaptation spécifiques (p. ex., adaptation aux inondations, à la sécheresse et au changement en matière d'écoulement fluvial, d'eau souterraine, de niveaux d'eau des lacs, d'humidité du sol, de qualité de l'eau et de couverture de neige/glace) et critères d'évaluation possibles.

### *Répartition des pertes*

Dans les mesures d'adaptation de type « répartition des pertes », la société en général ou un groupe important de citoyens absorbent les coûts des impacts. Les mesures d'adaptation incluent :

- subventions et programmes d'aide gouvernementaux (p. ex., systèmes d'irrigation améliorés, réseaux d'aqueduc prolongés, programmes d'aide pour les pêches);
- assurance (p. ex., assurance contre les inondations et assurance-récolte); secours aux sinistrés (p. ex., administration gouvernementale ou dons d'autres groupes);
- partage des approvisionnements en eau (p. ex., entre villes).

L'assurance est la méthode qui bénéficie de la plus grande attention. Le lecteur est prié de se reporter au Chapitre 10 de l'ÉPC pour plus d'informations et de détails.

Les chercheurs se sont dits préoccupés par l'inadéquation possible de certaines mesures. Ainsi, des subventions gouvernementales pourraient être accordées (et le sont actuellement) pour la pose de tuyaux de drainage dans les champs. Certains ont suggéré que ces pratiques de drainage pourraient augmenter dans un scénario de changement climatique (p. ex., tempêtes, inondations plus intenses). Toutefois, le drainage réduit également les terres humides, qui sont actuellement menacées et pourraient l'être davantage par le changement climatique.

### *Absorption des pertes*

Dans l'adaptation de type « absorption des pertes », chaque citoyen est fondamentalement laissé à lui-même quant à la façon de faire face aux impacts. Par exemple, l'assurance contre les inondations n'est pas disponible dans certaines zones de plaines inondables. Les citoyens qui habitent dans ces zones doivent être prêts à en accepter les conséquences (p. ex., assumer les pertes). Ces citoyens pourraient être aidés par de meilleures méthodes de prévision des inondations, d'avertissement et autres, visant à réduire l'étendue des dommages, mais ils demeurent responsables de tous les coûts des dommages.

Il est important que les citoyens soient conscients des pertes possibles et fassent des choix informés lorsqu'ils s'installent dans des zones vulnérables. Cette information pourrait être jointe au titre de propriété.

### *Recherche*

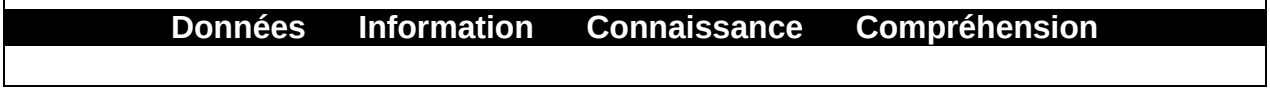
Lacunes des recherches sur l'eau au Canada

Il existe des lacunes dans la connaissance que nous avons actuellement de l'eau au Canada. Elles ne gênent pas seulement la gestion de l'eau dans les conditions actuelles, mais compliquent les tentatives d'adaptation aux impacts et aux scénarios de changement climatique prévus. De nombreuses stratégies d'adaptation permettent d'améliorer la gestion de l'eau tant dans les conditions actuelles que dans les conditions de changement climatique. Autrement dit, une meilleure gestion de l'eau aujourd'hui serait avantageuse dans les nouvelles conditions

climatiques. Certaines de ces stratégies sont dites de type « sans-regrets » parce qu'elles sont bénéfiques actuellement tout en favorisant l'adaptation au changement climatique. Elles constituent des solutions tant aux problèmes environnementaux actuels qu'aux problèmes futurs résultant du changement climatique.

Une gestion efficace de l'eau requiert impérativement que l'on dispose de données et d'information sur les sources, la quantité, la fiabilité et la qualité de l'eau, ainsi que d'une connaissance et d'une compréhension améliorée de ces questions; la recherche doit elle aussi être améliorée (figure 1.14) (Hofmann et Davidson, 1997; Mitchell et Shrubsole, 1994). Étant donné la taille du pays et la quantité d'eau sur son territoire, il s'agit là d'une tâche gigantesque (Gouvernement du Canada, 1992, 2).

Figure 1.14 Différents niveaux de recherche




Un des problèmes liés à la collecte d'informations est ce qu'il est convenu d'appeler le « syndrome de l'abondance de données et du manque d'information ». Dans ce « syndrome », l'accent est mis sur la collecte des données et une attention moindre est accordée à leur analyse, pourtant tout aussi importante (Mitchell et Shrubsole, 1994). En outre, les données sont dans de nombreux cas recueillies pour des projets spécifiques qui ont une portée restreinte et qui s'appliquent à une aire géographique limitée, ce qui en réduit l'utilité pour d'autres projets. De plus, il existe souvent des chevauchements dans les activités de collecte des données.

On déplore un manque d'information sur de nombreux aspects de la question de l'eau au Canada : eau souterraine, hydrologie des régions nordiques, régions froides, lacs de petite superficie, eau rurale et qualité de l'eau.

L'eau souterraine, en particulier, a été gravement négligée au Canada (Bruce et Mitchell, 1995; Hofmann, 1996). La compréhension que nous avons du comportement de l'eau souterraine et de nombreuses formes de pollution est limitée (*idem*). Par exemple, plus de 35 % des puits ruraux en Ontario sont pollués par des bactéries ou des nitrates, et Environnement Canada estime que de 5 à 10 % des 150 000 à 200 000 réservoirs souterrains fuient (Bruce et Mitchell, 1995). Ce manque de connaissance des questions relatives à l'eau souterraine au Canada complique la recherche sur le changement et la variabilité climatiques.

Wasny (1986) a conclu à l'existence de lacunes importantes, en particulier en ce qui a trait à l'eau des villes et à d'autres problèmes d'ordre socio-économique, parce que la recherche a principalement porté sur les processus physiques du cycle hydrologique. Ainsi, environ 80 % de l'ensemble des travaux de recherche financés en 1983 étaient axés sur le cycle hydrologique et la qualité de l'eau, tandis qu'à peu près 4 % ont porté sur les aspects économiques, sociaux, légaux et institutionnels (*idem*). Il n'est donc pas surprenant qu'il existe dans la littérature sur le changement climatique de nombreuses lacunes sur ces aspects, en particulier du point de vue de l'adaptation.

On a assisté à une tendance croissante à la spécialisation, tant du point de vue du sujet traité que de l'aire géographique, dans le secteur de la recherche sur l'eau (*idem*). Même si une spécialisation est nécessaire, le besoin de synthèse des savoirs fragmentaires et d'élaboration d'un tableau d'ensemble se fait de plus en plus sentir. Il importe en outre de reconnaître que la recherche est un moyen, et non une fin, pour amener un changement bénéfique dans la gestion de l'eau au Canada (*idem*).

Les sections *Hydrologie* et *Ressources en eau* ont dressé une liste des lacunes, dans les connaissances actuelles, sur lesquelles des recherches sont nécessaires. Ces aspects incluent (et sont similaires aux lacunes dans les connaissances sur les ressources en eau, sans égard au changement climatique) :

- les précipitations;
- l'évapotranspiration;
- le ruissellement;
- la glace de lac;
- le pergélisol;
- la qualité de l'eau;
- les régions nordiques;
- les lacs de petite superficie;
- les approvisionnements ruraux en eau;
- l'eau souterraine.

### *Éducation/comportement*

La Convention-cadre sur les changements climatiques (CCCC) soulignait la nécessité de l'éducation, de la participation et de l'accès à l'information de la population, en réponse à la variabilité et au changement climatiques (CPCC, 1994). Le Conseil du Programme climatologique canadien (CPCC, 1994) reconnaît que des progrès ont été accomplis du point de vue de l'éducation du public, mais admet que de nombreux citoyens sont mal informés quant à la recherche sur le changement climatique, et ont une compréhension erronée du problème. Par exemple, beaucoup croient que le changement climatique est le résultat de la pollution industrielle et qu'ils ne peuvent pas agir personnellement. Il est important que les citoyens reçoivent de l'information pertinente et exacte.

Il est de plus essentiel que la population participe à l'élaboration des stratégies d'adaptation (*idem*). Le niveau des individus n'est toutefois qu'un de ceux où l'éducation et l'engagement sont requis. Comme l'adaptation touchera tous les niveaux de la société, les niveaux individuel, organisationnel et politique, par exemple, un effort de communication sur l'importance du changement climatique pour l'homme devra être effectué à tous les niveaux (Smith et Lenhart, 1996).

Certains groupes clés devront être ciblés par les activités de communication :

- individus;
- politiciens;

- décideurs.
- autres chercheurs/scientifiques;
- industrie;
- secteurs touchés (p. ex., agriculture, foresterie, eau, navigation);
- régions touchées/vulnérables;

Le processus

Les perceptions erronées (voir ci-dessus) qui prévalent dans la population quant au changement et à la variabilité climatiques entachent également de nombreuses autres questions environnementales. Les processus de prise de décisions et de diffusion de l'information ont une incidence sur la perception de la population. Il est important que le processus utilisé (p. ex., programmes de participation de la population) permette une diffusion efficace de l'information. Cette diffusion est bidirectionnelle. Les décideurs et les chercheurs peuvent apprendre de la population, et cette dernière peut apprendre des décideurs et des chercheurs.

Par exemple, les citoyens ne croyaient pas être en mesure de contribuer efficacement à la résolution du problème de gestion des déchets jusqu'à l'introduction récente des programmes de collecte sélective, accompagnés de programmes intensifs d'éducation et de participation du public. De même, les programmes de conservation de l'eau, s'ils ne sont pas aussi fructueux de l'avis de certains, sont axés sur l'aide nécessaire des citoyens. Les erreurs de perception et de compréhension sont largement attribuables à la façon dont les décisions sont prises et au manque de participation du public ou de communication avec ce dernier. De plus en plus, on reconnaît les limitations du processus descendant, centralisé et technique traditionnel en ce qui a trait aux décisions touchant les questions environnementales (Armour, 1992; Child et Armour, 1995; Hofmann, 1996; Mitchell et Shrubsole, 1994). À la place, ces chercheurs estiment que les processus ascendants et décentralisés faisant appel à un niveau élevé de participation de la population sont plus efficaces.

Non seulement le public devrait-il être mieux informé sur le changement climatique et l'adaptation (p. ex., par l'entremise de programmes de participation), mais les décisions en matière d'adaptation au changement climatique (p. ex., nouveaux programmes de conservation de l'eau, nouvelle infrastructure) devraient également être prises en consultation avec la population. En ce qui a trait au processus de prise de décisions, Wondolleck (1985) a expliqué que les gestionnaires de l'environnement doivent comprendre que leur plus importante contribution à une question n'est pas la décision finale prise, mais le processus utilisé (qui a participé, l'étendue de cette participation, et l'information, les solutions de rechange et l'analyse utilisées, notamment). Deux facteurs sont souvent au cœur de nombreuses décisions : la légitimité du processus de prise de décisions et l'acceptation de la décision par le public (Armour, 1992). Armour (1992, 32) explique que les gens seront peu disposés à reconnaître les mérites d'une décision s'ils estiment avoir été traités injustement au cours du processus qui a mené à cette décision. Plutôt que de persuader le public, conclut Armour, il est plus efficace de structurer le processus de manière à parvenir à des décisions publiquement acceptables.

Participation du public

Étant donné l'importance accordée à ce processus, on ne se surprendra pas qu'il existe dans la littérature un large consensus selon lequel la participation du public est un élément essentiel du processus décisionnel en matière d'environnement (Mitchell, 1989a; Law et Hartig, 1993; Child et Armour, 1995; CORE, 1995). La participation du public procure de nombreux avantages, dont :

- une meilleure communication (qui mène à une sensibilisation et à une compréhension accrues des citoyens, et à l'acceptation des différentes initiatives);
- une réduction des conflits;
- l'incorporation des connaissances locales;
- une confiance accrue.

Du point de vue du changement et de la variabilité climatiques, la valorisation du processus et de la participation du public est importante pour diverses raisons. Ainsi, les programmes d'éducation seront plus fructueux si la population participe à leur conception et leur mise en œuvre. En outre, les décisions d'adaptation importantes (p. ex., la construction de barrages, l'imposition de restrictions quant à l'usage des terres) bénéficieraient d'un meilleur appui du public si ce dernier avait une meilleure compréhension du processus décisionnel et y participait davantage.

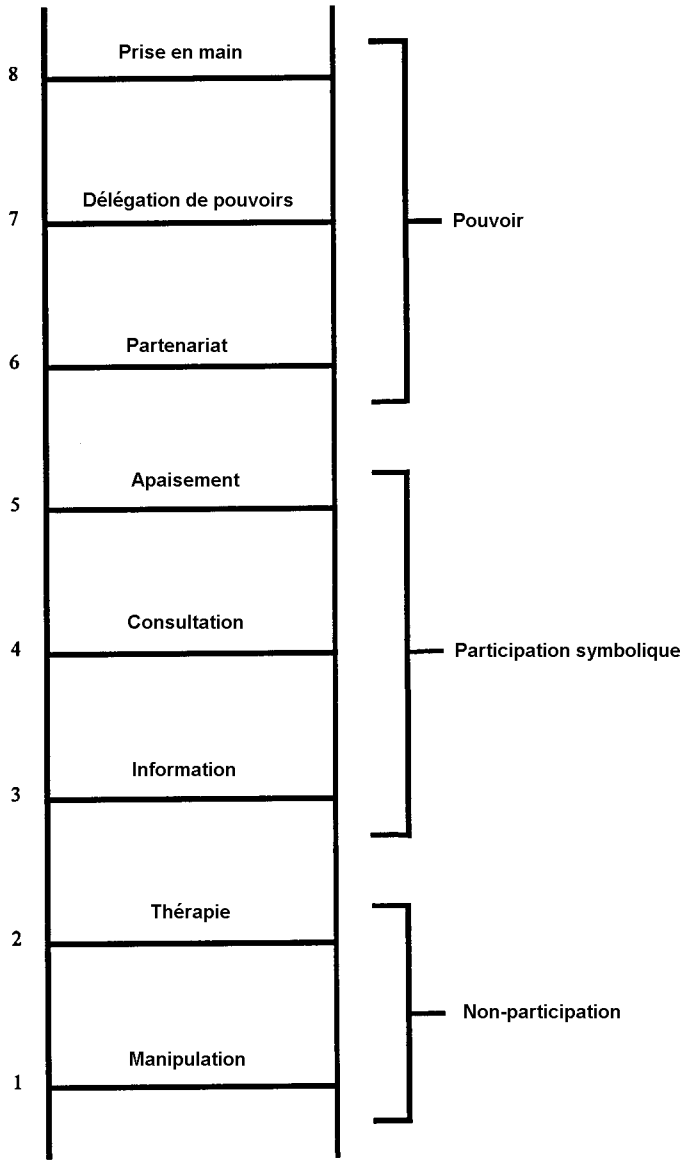
Vu l'importance d'une participation publique efficace, les gestionnaires explorent maintenant de nouvelles formes de participation et de partenariats, et délèguent souvent des pouvoirs aux citoyens. De nombreux progrès ont été accomplis en matière de participation des individus, qui, pour un certain temps se limitait à assister aux rencontres publiques. Récemment, des approches novatrices, comme les tables rondes, les partenariats et les ateliers de réflexion, ont été utilisées (Hofmann, 1996).

L'approche à utiliser dans le cadre de programmes publics dépend des buts et de l'étendue de la participation recherchés. Arnstein (1969) a créé une échelle de participation des citoyens à huit degrés (Figure 1.15). La philosophie sous-jacente est qu'à mesure que le pouvoir des citoyens augmente, leur participation devient plus réelle et moins symbolique. Les deux premiers échelons, 1) manipulation et 2) thérapie, sont considérés comme des formes non participatoires puisque l'objectif réel n'est pas la participation, mais consiste plutôt à guérir, convaincre ou éduquer le public. Les trois échelons suivants, soit 3) information, 4) consultation et 5) apaisement, sont un niveau de participation symbolique, où les participants peuvent entendre et être entendus… mais sans garantie que leurs vues seront prises en compte par les décideurs. C'est à l'échelon 6), partenariat, que les citoyens parviennent à un pouvoir véritable en ce qu'ils peuvent discuter et négocier avec les détenteurs du pouvoir (Arnstein, 1969, 217). Aux deux échelons du haut, soit 7) délégation de pouvoir et 8) prise en main par les citoyens, ces derniers détiennent la majeure partie du pouvoir de décision. Alors que les deux derniers échelons de participation peuvent ne pas être souhaitables, pour le moment, dans le cadre de programmes participatifs liés au changement climatique, la participation du public dans ce domaine en est à peine aux deux premiers échelons. Si les scénarios de changement climatique deviennent réalité,

la population exigera sans aucun doute, pour certaines décisions importantes, une participationet un pouvoir accrus en ce qui a trait à la façon de composer avec le changement.

Encore une fois, la « population » et les citoyens en cause dans ces processus varient. Il existe un certain nombre de publics différents, dont les citoyens, les secteurs touchés, les politiciens et les décideurs. Ces différents publics requièrent tous différentes méthodes de communication. Dans certains cas, le même individu peut faire partie de plusieurs publics différents.

Figure 1.15 Échelle de participation des citoyens d'Arnstein (Modifié d'Arnstein, 1969)



Comportement

L'adaptation au changement et à la variabilité climatiques en tant que processus comportemental n'est toutefois pas bien comprise ni appréciée (Smit, 1993). Quels types d'interventions d'adaptation, par exemple, seront vraisemblablement les plus acceptables aux yeux des adaptateurs potentiels, et pourquoi? Quels facteurs personnels et sociétaux influent sur l'adaptation, en particulier sur les changements de comportement plus durables en matière d'usage de l'eau? Une information plus exacte communiquée plus efficacement, sur la probabilité et les répercussions des extrêmes climatiques, améliorera-t-elle l'adaptation, ou les utilisateurs de l'eau sont-ils plus susceptibles d'être influencés par l'événement extrême le plus récent? Le sondage effectué par Kreutzwiser (1996) auprès d'utilisateurs ruraux, par exemple, suggère que les adaptateurs potentiels jugeront les mesures d'amélioration de l'approvisionnement plus acceptables que les mesures de réduction de la consommation d'eau. La fréquence perçue des épisodes de sécheresse est un des facteurs associés à l'efficacité des initiatives d'amélioration de l'approvisionnement et de la gestion de la consommation. Il est à noter que l'évaluation, par les répondants, de la possibilité d'épisodes de sécheresse futurs était influencée par leur plus récente expérience en matière de sécheresse ou de précipitations.

L'éducation et les changements de comportement du public vont de pair. Sans des programmes efficaces d'éducation (p. ex., programmes de participation du public), les changements de comportement ne se produiront pas. Un important changement de comportement consiste à réduire le gaspillage d'eau. Les adaptations de type comportemental incluent des mesures simples de conservation de l'eau comme fermer le robinet pendant qu'on se brosse les dents ou qu'on se savonne sous la douche.

***Modifier les événements, prévenir les effets, éviter les impacts***

Il existe deux catégories de stratégies d'adaptation qui permettent de modifier les événements, de prévenir les effets et d'éviter les répercussions, aux fins de la présente discussion :

1. les approches non structurelles;
2. les approches structurelles.

Approches non structurelles

Les approches non structurelles des problèmes de gestion de l'eau ont récemment fait l'objet d'une attention croissante. Elles incluent une évaluation de cette gestion et comprennent :

(i) les approches légales;
(ii) les approches institutionnelles;
(iii) les approches économiques (McDonald et Kay, 1988).

La présente discussion est organisée en fonction de ces trois approches.

L'accent croissant placé sur les approches non structurelles est dû à la perte de crédibilité, aux impacts environnementaux négatifs, à l'échec des approches technocentriques ou structurelles, et

à la constatation du fait que la définition et la mise en œuvre des politiques ont des incidences énormes sur les ressources en eau.

Problèmes légaux

Le titre légal de l'eau est un important problème pour les gestionnaires de l'eau. Partout au Canada, il existe des conflits sur le droit d'utilisation de l'eau ou le « titre légal » de l'eau. Chacune des provinces canadiennes possède sa législation en la matière et les conflits diffèrent d'une province à une autre. Fondamentalement, le titre légal de l'eau au Canada est basé sur des variantes de la législation en matière de propriété riveraine et (ou) de propriété antérieure. La législation sur la propriété riveraine stipule pour l'essentiel que les propriétaires riverains sont propriétaires des cours d'eau de surface qui traversent leur propriété sous réserve de certaines limitations d'« usage raisonnable » (p. ex., ils ne peuvent pas consommer toute l'eau) (Lucas, 1990). La législation en matière de propriété antérieure consiste fondamentalement à accorder le permis d'utilisation ou le titre légal de l'eau sur la base du premier arrivé, premier servi (*idem*).

Smit (1993) a suggéré que différents changements soient apportés au système légal actuel en ce qui a trait aux droits relatifs à l'eau au Canada, dans un but d'adaptation au changement climatique. L'élimination des droits de propriété des eaux riveraines et des droits de propriété antérieure est une des suggestions proposées. La réallocation des droits relatifs à l'eau, y compris la vente de ces droits ou le stockage de l'eau, a également été recommandée. Une autre suggestion consiste à modifier le fondement d'un droit relatif à l'eau, qui repose actuellement sur une quantité retirée pour un usage spécifique, par une quantité consommable pour cet usage spécifique (*idem*).

Mesures institutionnelles

Ces mesures incluent les structures et les politiques utilisées pour la gestion de l'eau, comme les agences établies en vue de la régie de l'eau aux niveaux international, national, provincial et local. Ces mesures institutionnelles ont fait face à de nombreux problèmes, dont :

- l'absence de collaboration entre agences (Mulamoottil *et al.,* 1996);
- le chevauchement des compétences et la concurrence entre ces dernières, comme les problèmes de zone limitrophe et de délimitation (Gilchrist, 1983; Mitchell et Shrubsole, 1994);
- le manque d'intégration (Kreutzwiser, 1991; Mitchell et Shrubsole, 1994);
- le financement à la baisse (Mulamoottil *et al.,* 1996; Mitchell et Shrubsole, 1994).

Si les prévisions de changement climatique se matérialisent, les problèmes institutionnels empêcheront de bien s'adapter aux impacts négatifs.

Tableau d'ensemble

Il existe un consensus dans la littérature sur la gestion de l'eau quant à la nécessité de considérer le tableau d'ensemble (Mitchell, 1984), c'est-à-dire d'examiner les relations entre l'eau et les

autres composants de l'environnement. La question du changement climatique est un des éléments de ce tableau d'ensemble.

D'autres composants de l'environnement (p. ex., usages industriels des terres) peuvent avoir des incidences négatives sur l'eau. Comme différents composants de l'environnement sont gérés par différents organismes gouvernementaux dont les responsabilités sont fragmentées et se recoupent, il est difficile de résoudre les problèmes à moins d'utiliser une approche intégrée (Mitchell, 1991). De nombreuses appellations servent à désigner ce type d'approche, dont celles de gestion intégrée de l'eau, d'approche basée sur les écosystèmes et de planification intégrée, notamment. Downs *et al.* (1991) ont relevé 36 appellations différentes renvoyant toutes au même principe : la nécessité de gérer dans une perspective d'ensemble, au lieu de gérer l'eau de façon isolée. L'unité de gestion privilégiée, dans le cadre de cette approche intégrée, est le bassin hydrologique ou bassin versant, en raison de sa nature intégrante (Kreutzwiser, 1991). Toutes ces approches partagent néanmoins un principe commun qui consiste à examiner le tableau d'ensemble et à en intégrer les différents éléments. Si ce concept bénéficie d'un certain soutien, sa mise en œuvre a toutefois été un échec relatif.

Planification par bassin et sous-bassin hydrographiques

La planification par bassin et sous-bassin hydrographiques est une importante mesure d'adaptation au changement et à la variabilité climatiques. Cette planification permet d'améliorer la gestion actuelle et de préparer l'avenir, y compris le changement climatique. Ce type de planification assure une approche davantage axée sur l'anticipation que sur la réaction, vis-à-vis du changement climatique. Les avantages de la planification par bassin et sous-bassin se feront sentir quel que soit l'ordre de grandeur du changement climatique.

Les bassins hydrographiques sont des unités de planification logiques, mais sont souvent morcelés par les limites politiques. Ce morcellement mène à une application incohérente des plans et à un manque d'orientation commune (Hardy *et al.*, 1994). La planification intégrée des sous-bassins hydrographiques est vue comme une façon de combler ces lacunes et d'autres.

Dans le passé, la différence entre les plans de bassin et les plans de sous-bassin était liée à la catégorie de cours d'eau. Actuellement, la différence est basée sur les détails. Les plans de bassin définissent les visions générales futures pour le bassin et les stratégies générales en vue de leur réalisation (*idem*). Les plans de sous-bassin fournissent des directives davantage liées aux emplacements, et plus de détails sur les problèmes environnementaux et les possibilités d'aménagement (*idem*).

Les deux types de plans sont toutefois d'importants documents guides du point de vue des propositions d'aménagement des terres, en particulier en périphérie des centres urbains. Les plans de sous-bassin sont considérés comme d'importants outils de planification qui coordonnent la croissance en fonction du milieu naturel, et procureront des avantages du point de vue des activités de planification, d'aménagement et d'entretien (Paragon Engineering, 1992). Dans le passé, les plans de gestion des eaux pluviales constituaient le principal outil de planification des eaux de ruissellement des villes, et la reconnaissance d'autres considérations environnementales était limitée. La planification des sous-bassins permet de disposer d'un outil plus global que les

plans de gestion des eaux pluviales, qui sont appliqués emplacement par emplacement, et ne tiennent pas compte des échelles plus grandes et des besoins d'intégration (*idem*). Au-delà des questions de ruissellement urbain, les plans de sous-bassin peuvent inclure des dispositions de maintien des corridors riverains, des zones d'importance environnementale et des projets de remise à l'état naturel des cours d'eau, également importants dans le contexte de l'adaptation au changement climatique.

Mise en œuvre du principe de prudence

En 1990, les participants à la Deuxième conférence mondiale sur le climat, tenue à Genève, convenaient de ce qui suit :

> *« Là où il existe une menace de dommages graves ou irréversibles, on ne doit pas invoquer l'absence de certitude scientifique pour justifier l'ajournement de mesures efficientes de prévention d'une telle dégradation de l'environnement » (Myers, 1993, 74).*

Ce point de vue est connu sous le nom de principe de prudence. L'acceptation de ce principe (p. ex., par les organismes gouvernementaux et le secteur privé au Canada) favorisera l'adoption de stratégies d'adaptation diverses, y compris celles de type « sans-regrets ».

Approches fondées sur l'anticipation et l'adaptation

Par le passé, la gestion de l'eau était dominée par une approche rationnelle, globale et technique, caractérisée par des buts et des processus rigides dans un contexte qui faisait une très large place aux experts et où la contribution du public était limitée (Berman, 1990). Cette approche tombe toutefois en défaveur au profit des approches fondées sur l'anticipation et l'adaptation (Riebsame, 1988). Celles-ci reconnaissent que l'incertitude, la surprise, la complexité et le changement sont des composants majeurs du processus de planification et de gestion, et que ce dernier doit être souple (Berman, 1990; Mitchell et Shrubsole, 1994). Elles reconnaissent également les limites de la technologie et la nécessité d'un processus de consultation (y compris l'acceptation du fait que les connaissances locales constituent de l'information bien fondée) (Mitchell et Shrubsole, 1994). Dans le cas où les impacts régionaux du changement climatique sont hautement incertains, il faudra disposer d'approches souples et adaptatives pour réagir aux divers impacts possibles, de manière que le réseau ait la robustesse et la résilience nécessaires afin de faire face au changement climatique (Smith et Lenhart, 1996). Le CPCC (1990) suggère que le réseau actuel des ressources en eau serait moins vulnérable au changement climatique s'il était plus robuste, souple et résilient.

Zonage et émission des permis de construction

La modification des normes de zonage des terres et d'émission des permis de construction permettrait diverses adaptations au changement climatique (Smit, 1993; Kreutzwiser, 1991). Par exemple, les codes du bâtiment pourraient décourager la construction de sous-sols, ce qui éviterait les problèmes associés à l'inondation des sous-sols. De la même manière, le zonage des terres permettrait d'interdire la construction d'habitations dans les zones inondables ou de

protéger les espaces verts. D'autres techniques de planification ou de zonage pourraient être les servitudes de conservation, l'achat des droits d'aménagement, le transfert de ces droits et l'acquisition de terres par les gouvernements (Wright, 1994).

Incorporation de la variabilité climatique actuelle et des changements futurs à la planification à long terme

Les planificateurs et les gestionnaires devraient incorporer le changement climatique à la planification à long terme de l'eau (p. ex., stratégies relatives à l'eau en vue de l'approvisionnement des villes) (Smith et Lenhart, 1996; Titus, 1990). Tout comme la population, le changement et la variabilité climatiques modifieront l'utilisation de l'eau. L'incorporation du changement et de la variabilité climatiques à la planification à long terme permettra aux générations futures de faire face aux changements plus facilement (Smith et Lenhart, 1996). La conservation d'une quantité accrue d'eau visant à soutenir les pêches et d'autres usages écologiques, et à constituer une réserve, serait une stratégie viable face à l'incertitude des approvisionnements futurs occasionnée par le changement climatique (Bjonback, 1991).

Inventaire des stratégies d'adaptation existantes

Actuellement, la société s'adapte aux changements qu'induisent dans les ressources en eau les conditions climatiques. Il conviendrait de faire un inventaire et de procéder à une analyse de ces mesures d'adaptation de manière à établir des stratégies possibles d'intervention face au changement et à la variabilité climatiques (Smith et Lenhart, 1996, 195).

Établissement d'un lien entre l'aide aux sinistrés et les programmes de réduction des risques

Les fonds d'aide aux sinistrés (p. ex., pour les impacts du changement climatique) pourraient être liés à la mise en œuvre de politiques de réduction des risques à long terme. Ces exigences pourraient se révéler un investissement précieux, surtout si le changement climatique entraîne une augmentation du nombre d'ouragans et de tempêtes (Smith et Lenhart, 1996, 195).

Planification d'urgence

L'élaboration de plans d'urgence à court terme permettrait une adaptation aux événements extrêmes liés à l'eau (p. ex., pénuries ou excès). Le coût d'élaboration de plans d'urgence est relativement faible par rapport aux avantages possibles (Smith et Lenhart, 1996). Cette stratégie est considérée comme une approche de type « sans-regrets » parce qu'elle serait avantageuse du point de vue de la variabilité climatique actuelle, sans égard au changement climatique.

Utilisation des données hydrologiques et climatiques futures

Actuellement, lorsque les concepteurs planifient et conçoivent de nouveaux aménagements hydrologiques, ils utilisent des données hydrologiques et climatologiques historiques. L'utilisation de ces données postule une certaine continuité, mais les modifications anticipées dans le cadre du changement climatique rendent cette hypothèse irréaliste (Williams, 1989). Les

concepteurs d'infrastructures nouvelles devraient utiliser des projections hydrologiques et climatologiques, de façon à assurer l'adéquation de l'infrastructure aux besoins futurs.

Problèmes économiques

Les coûts énormes, pour les villes, de remplacement ou prolongement d'une infrastructure vieillissante d'approvisionnement et de traitement constituent peut-être le plus important problème économique du secteur de l'eau. Actuellement, le tiers des eaux usées du Canada ne font encore l'objet d'aucun traitement (Environnement Canada, 1992). Si la baisse des écoulements fluviaux prévue par les scénarios de changement climatique se matérialise, les quantités importantes d'eaux non traitées risquent de poser un problème plus aigu. En outre, le changement climatique pourrait nécessiter le recours à des techniques de traitement plus poussées (p. ex., tertiaires et autres) dans les installations de traitement existantes. Deux grandes raisons ont été avancées pour expliquer les difficultés financières auxquelles se heurte l'approvisionnement en eau des villes :

- les investissements d'infrastructure ont été inférieurs aux niveaux requis (Fortin et Mitchell, 1990). En Ontario, par exemple, les sommes investies au cours des années 80 ont été inférieures de moitié, environ, à ce qu'elles auraient dû être (*idem*);
- les consommateurs n'assument pas le plein prix des services, de sorte qu'ils sont peu enclins à conserver l'eau (Fortin et Mitchell, 1990; Millerd, 1984; Tate, 1984).

Divers changements ont été recommandés en réponse aux impératifs de renouvellement et d'expansion de l'infrastructure, dont l'introduction de pratiques de gestion de la consommation et de conservation de l'eau, ainsi que la correction du problème actuel de sous-évaluation de l'eau. Ces changements aideront à redresser la situation actuelle, mais seraient également utiles du point de vue de l'adaptation aux impacts du changement climatique.

Gestion de la consommation

Au Canada, l'approche privilégiée en matière d'approvisionnement en eau en a traditionnellement été une de gestion des approvisionnements. C'est-à-dire que l'eau était manipulée, au moyen de méthodes structurelles, de manière que les besoins des utilisateurs d'eau canadiens soient satisfaits (Tate, 1990). Cette approche mène à adopter un point de vue structurel, à croire que l'eau est une ressource illimitée, ce qui conduit à une sous-évaluation et à un système qui la gaspille au lieu d'être efficient (Tate, 1984). Étant donné les problèmes financiers actuels des agences d'approvisionnement en eau, les besoins croissants et les sources moindres, cette approche de gestion des approvisionnements est désormais délaissée (Mitchell et Shrubsole, 1994). De plus, elle risque d'exacerber certains des impacts prévus du changement climatique (p. ex., quantités d'eau moindres).

La gestion de la consommation requiert une modification de la consommation en eau (y compris la consommation totale et la consommation de pointe). Une variété de méthodes peuvent être utilisées à cette fin, mais la plus prometteuse semble être le recours à des échelles tarifaires appropriées (Fortin et Mitchell, 1990; Rivers et Tate, 1990; Tate, 1990). De nombreuses études montrent qu'une hausse des prix de l'eau mènera à une baisse de la consommation (Harris, 1991;

**Tableau 1.19 Prix moyens de l'eau dans différents pays, 1986**

| Pays | Coût (cents/1 000 L) |
|---|---|
| Canada | 25 |
| États-Unis | 53 |
| France | 75 |
| Royaume-Uni | 50 |
| Suède | 50 |
| Australie | 165 |
| Allemagne | 99 |
| Italie | 17 |

Tate, 1990

Fortin et Mitchell, 1990; Rivers et Tate, 1990; Tate, 1990). Si la gestion des approvisionnements accommode l'infrastructure aux besoins des consommateurs, la gestion de la consommation s'efforce de réduire ces besoins au moyen de mesures de tarification et de conservation de l'eau. Comme on peut le voir au tableau 1.19, les Canadiens paient leur eau très bon marché.

Tate et Lacelle (1992) ont déterminé qu'il existait cinq principaux types de tarification de l'eau au Canada : 1) tarification fixe, 2) tarification unitaire constante, 3) tarification régionale décroissante, 4) tarification régionale croissante et 5) tarification complexe. Ils ont constaté que la tarification fixe (qui inclut une facturation minimale et des frais additionnels peu élevés basés sur la consommation) est la méthode la plus utilisée au Canada, et que la plupart des méthodes en place incluent des mesures d'incitation financières visant à favoriser la conservation de l'eau, à éviter le gaspillage ou à réduire les coûts de fourniture de l'eau.

Habituellement, les méthodes les plus avantageuses sont celles qui facturent en fonction du volume utilisé (Fortin et Mitchell, 1990; Tate et Lacelle, 1992). Ce processus de tarification suppose également que la consommation d'eau est mesurée.

Valeur de l'eau

Au concept de gestion de la consommation est liée la notion que l'eau est actuellement sous-évaluée et sous-tarifée. À l'heure actuelle, seul le coût du service est facturé; il n'y a pas de frais pour l'eau elle-même. Certains ont suggéré que l'eau est une ressource au même titre que toute autre et devrait être traitée comme telle (Gray, 1983). L'eau devrait donc être considérée comme une ressource dotée de caractéristiques économiques (Gray, 1984). Les recherches effectuées ont montré que la facturation de la ressource en eau elle-même s'assortirait de nombreux avantages (Hofmann, 1994, Mitchell, 1984). La sous-évaluation ou non-évaluation actuelle de l'eau mène à penser que l'eau est un bien gratuit, et, ainsi, à de l'exploitation, du gaspillage et de l'abus. Mitchell (1984) a cependant fait remarquer que l'attribution d'une valeur à l'eau soulève de nombreux problèmes, dont des problèmes éthiques et politiques.

Du point de vue du changement climatique, la reconnaissance de la valeur de l'eau devrait favoriser l'adaptation aux impacts négatifs possibles. C'est-à-dire que l'eau ferait l'objet d'un abus moindre, ce qui aiderait l'adaptation à des quantités moindres d'eau.

### Conservation de l'eau

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la conservation de l'eau requiert la mise en œuvre d'approches tant structurelles que non structurelles. Si les quantités d'eau moindres prévues par les scénarios de changement climatique deviennent réalité, la conservation de l'eau pourrait s'avérer une importante mesure d'adaptation. On trouvera ci-dessous quelques exemples d'approches non structurelles de conservation de l'eau :

- restrictions appliquées à l'usage de l'eau;
- structures tarifaires, politiques de tarification, mesures d'incitation sous la forme de rabais et de dégrèvements, autres sanctions (amendes);
- éducation du public, transfert d'information et formation;
- réglementation (législation, codes, normes et règlements municipaux) (Environnement Canada, 1992);
- interdiction d'arrosage des pelouses (Smit, 1993);
- interdiction des fontaines décoratives et autres usages similaires de l'eau (Smit, 1993).

### Approches structurelles

Les stratégies mentionnées ci-dessous sont susceptibles de favoriser l'adaptation à une diminution des quantités d'eau dans des conditions de changement climatique.

### Réduction de la pollution

La pollution de l'eau a le même effet qu'une réduction des approvisionnements en eau. La réduction de la quantité de polluants introduits dans les approvisionnements en eau augmente les approvisionnements disponibles pour la consommation par les humains et d'autres organismes. De plus, certains ont suggéré que le changement climatique risquait de réduire le ruissellement et les niveaux d'eau, ce qui augmenterait les concentrations des polluants de l'eau; il est donc important de réduire la pollution pour que la qualité de l'eau ne se dégrade pas davantage. Une pollution moindre est avantageuse, qu'il y ait ou non changement climatique (Smith et Lenhart, 1996, 197).

### Infrastructure d'approvisionnement en eau des villes

Si le changement climatique mène, comme on le prévoit, à une augmentation de la consommation d'eau, des pressions accrues s'exerceront sur l'approvisionnement en eau des villes. Comme le coût d'une nouvelle infrastructure est élevé et que l'eau est rare dans certaines régions, il pourrait être nécessaire d'apporter certaines améliorations aux infrastructures municipales. Une de ces améliorations vise la réduction des pertes d'eau dues aux fuites. Actuellement, ces pertes représentent de 10 à 30 % de l'eau contenue dans un réseau d'approvisionnement municipal (Environnement Canada, 1992). De manière générale, on estime qu'un programme de détection et de réparation des fuites est rentable lorsque les pertes dépassent une proportion de 10 à 15 % (*idem*). C'est-à-dire que chaque dollar consacré à des programmes de détection et de réparation des fuites permet d'en économiser trois (*idem*).

Rajustements dans la construction de l'infrastructure

Lors de la planification de nouvelles infrastructures de ressources en eau ou de l'expansion d'une infrastructure existante, il conviendrait d'apporter différents rajustements visant à accommoder le changement et la variabilité climatiques, comme une augmentation de la taille et de la capacité des barrages, chenaux et pipelines, ou de leur aptitude à faire face à la variabilité. Ces rajustements pourraient se révéler moins coûteux qu'un accroissement de la capacité dans le futur (par suite du changement climatique) (Smit, 1993; Smith et Lenhart, 1996).

Échanges d'eau entre bassins

Smith et Lenhart (1996) ont suggéré que les échanges d'eau entre bassins sont susceptibles de permettre une utilisation plus efficiente de l'eau tant dans les conditions climatiques actuelles qu'en cas de changement climatique, et que leur mise en œuvre est souvent plus facile que le plein recours aux mesures commerciales de répartition de l'eau. Les échanges d'eau entre bassins peuvent également constituer une stratégie à court terme face aux sécheresses et autres pénuries d'eau (*idem*). Smit (1993) a cependant constaté que de nombreux coûts sont associés à ces échanges, dont des coûts économiques, environnementaux, politiques et sociaux.

Il existe de nombreux cas d'échanges d'eau entre bassins (p. ex., le réseau du Columbia). Dans les Grands Lacs, la Charte des Grands Lacs limite les dérivations et les interdit même dans certains cas. Les mégaprojets captivent cependant souvent l'attention. Le projet de plus triste mémoire a peut-être été celui de la North American Water and Power Alliance (NAWAPA) (McDonald et Kay, 1988). Ce projet proposait le transfert de quelque 136 à 308 $km^3$ d'eau principalement en provenance des cours d'eau Columbia, Kootenay, Fraser, Yukon, Laird, Peace et Skeena au Canada, et Copper, Susitna et Tanana en Alaska (*idem*). Presque 20 % du ruissellement total aurait été transféré de ces cours d'eau vers les régions arides du centre du Canada, du sud-ouest des États-Unis et du nord du Mexique (*idem*). Le projet proposait en outre la construction de 240 réservoirs, 112 systèmes d'irrigation et 17 voies navigables (*idem*). Les plans avaient été mal reçus au Canada, du fait que le Canada aurait été le principal donneur d'eau et les États-Unis, le principal bénéficiaire.

Prévention des inondations

Différents scénarios de changement climatique prévoient une fréquence accrue des inondations. Des ouvrages peuvent être réalisés pour réduire les effets des inondations. Par exemple :

- exhaussement des rives au moyen de remblai maintenu en place par un ouvrage de retenue (si la zone n'est pas très étendue) (Smit, 1993);
- surélévation de l'infrastructure des marinas et des ports (p. ex., estacades, quais, voies de circulation) (*idem*);
- surélévation des bâtiments menacés (*idem*);
- construction de digues et autres ouvrages de protection contre les inondations.

On peut également protéger contre les inondations les différents éléments des installations de traitement des eaux usées, comme les réservoirs, conteneurs, incinérateurs et autres ouvrages. Quelques exemples de mesures de protection des ouvrages et autres éléments d'installations de traitement des eaux usées :

- aménagement de pentes (création de pentes de 2 à 5 degrés pour le ruissellement) (*idem*);
- mise en place de clôtures (autour des installations pour arrêter la dérive des conteneurs et réduire les dommages causés par les débris de crue) (*idem*);
- amélioration de la solidité structurale des conteneurs (*idem*);
- élévation des conteneurs et/ou installations au-dessus du niveau de crue (au moyen de remblai, à la condition qu'il ne s'érode pas, et de piliers/murs) (*idem*).

Nouveaux barrages, réservoirs et digues

Une autre stratégie d'adaptation au changement climatique consisterait à aménager de nouvelles infrastructures comme des barrages, réservoirs de retenue et digues. Ces ouvrages contribueraient à maintenir les niveaux d'eau et à lutter contre les inondations et les sécheresses. Smith et Lenhart (1996) ont suggéré qu'on interdise l'aménagement à d'autres fins des sites possibles de barrages, par exemple, ou que leur aménagement n'en soit permis qu'à condition qu'ils puissent être convertis en barrages au besoin.

Conservation de l'eau : approches structurelles

Les stratégies de conservation de l'eau incluent tant des approches structurelles que des approches non structurelles. Certaines des approches structurelles possibles sont présentées ci-dessous :

- utilisation de dispositifs d'économie de l'eau (p. ex., chasses d'eau et pommes de douche à faible débit);
- aménagement paysager résistant à la sécheresse (p. ex., utilisation de roches et de plantes ou objets ne nécessitant pas d'arrosage);
- utilisation de compteurs d'eau;
- amélioration des systèmes d'irrigation (p. ex., réduction des fuites), arrosage en cas de besoin seulement (p. ex., non commandé par minuterie);
- installations de recyclage de l'eau;
- réutilisation des eaux usées;
- dispositifs de régulation du débit;
- réduction de la pression dans les réseaux de distribution;
- technologie efficiente d'arrosage/irrigation;
- détection et réparation des fuites;
- élimination des égouts combinés d'eaux usées et pluviales pour réduire la charge des usines de traitement (Environnement Canada, 1992; Lenhart et Smith, 1996).

Conception des chenaux naturels

Les fleuves, rivières et autres chenaux naturels sont des éléments du cycle hydrologique dont la taille, l'emplacement et la capacité sont déterminés par des facteurs comme la géologie, le climat et la végétation (Tate, 1994). Les humains ont altéré ces chenaux naturels pour diverses raisons, y compris la lutte contre les inondations et la commodité (p. ex., ces chenaux peuvent « nuire » aux routes ou à la construction de bâtiments).

On a récemment découvert que le maintien des chenaux dans leur état naturel procurait toutefois de nombreux avantages, dont la viabilité à long terme, la biodiversité et la qualité de l'eau. Au moment de l'inondation du Mississippi survenue en 1993, on a constaté que les ouvrages de protection et les changements de vocation des terres dans les bassins du Haut-Mississippi et de la rivière Missouri exacerbaient les inondations (*idem*). Le tracé de ces chenaux les adapte naturellement aux inondations. On assiste en conséquence à une tendance à une remise au moins partielle des chenaux naturels à l'état sauvage (p. ex., en laissant se former des méandres).

Les caractéristiques d'un chenal sain, fonctionnel et qui a recouvré son état naturel incluent notamment :

- variété de débits, et transport et emmagasinage efficaces d'une variété de charges solides;
- rapports largeur/profondeur relativement faibles;
- bonne végétation; rives dynamiques mais stables;
- substrat à grains beaucoup plus grossiers que les rives, et faibles quantités de matières à grains fins dans les interstices des substrats des rapides;
- tracé et géométrie des méandres appropriés à la catégorie de cours d'eau;
- pente du cours d'eau inférieure à celle de la vallée;
- hydrogramme montrant une réaction à de fortes précipitations soudaines (MNR, 1994).

Les chenaux naturels auraient une capacité accrue d'absorption des variations de volume prévues par les scénarios de changement climatique, et aideraient à maintenir une température de l'eau basse (p. ex., ombrage).

***Mesures d'adaptation spécifiques***

La discussion qui précède a porté sur des mesures d'adaptation très générales et examiné peu de mesures spécifiques. Le tableau 1.20 présente un résumé de mesures d'adaptation spécifiques pour plusieurs composants du cycle hydrologique ou événements hydrologiques possibles. Pour avoir plus de détails sur les mesures d'adaptation spécifiques aux secteurs touchés (p. ex., agriculture, foresterie, pêches), le lecteur est prié de se reporter aux chapitres correspondants de l'Étude pan-canadienne.

## Table 1.20 Mesures d'adaptation spécifiques pour des changements à apporter au réseau hydrologique

| Impacts sur | Changement d'usage (emplacement, vocation) | Réduction des pertes (prévention, modification des effets) | Acceptation des pertes (partage, absorption) |
|---|---|---|---|
| Inondation | - restreindre l'aménagement des plaines inondables<br>- changer les modalités d'exploitation pour augmenter la retenue des eaux de crue | - construire/moderniser les réservoirs de retenue des eaux de crue, digues, chenalisation des cours d'eau<br>- drains, tranchées, égout d'eaux pluviales améliorés<br>- réévaluer la sécurité des barrages<br>- protection contre les inondations | - meilleures techniques de prévision et d'avertissement<br>- préparer des plans d'évacuation<br>- assurance contre les inondations, aide aux sinistrés<br>- plan d'aide aux sinistrés et d'intervention d'urgence |
| Sécheresse | - réduire les besoins en eau<br>- abandonner/étendre les terres agricoles | - augmenter la quantité d'eau emmagasinée dans les réservoirs<br>- changer les pratiques agricoles pour augmenter l'humidité du sol<br>- étendre l'irrigation<br>- agrandir les réservoirs de stockage de l'eau des villes | - plans d'urgence pour la répartition de l'eau pendant les pénuries<br>- partage régional des approvisionnements en eau |
| Écoulement fluvial | - réduire/augmenter l'usage selon les changements du rendement/débit fiable<br>- réduire/augmenter la production hydroélectrique<br>- augmenter l'efficience régionale des réseaux d'approvisionnement en eau au moyen d'une meilleure coordination<br>- réduire les fuites<br>- adopter des mesures de tarification de l'eau et des mesures commerciales de répartition des approvisionnements disponibles | - augmenter le débit/rendement fiable en augmentant la capacité des réservoirs<br>- exploiter de nouvelles sources d'eau (p. ex. eau souterraine, échanges entre bassins) | - partage des sources d'eau au moyen d'interconnexions et d'une gestion coordonnée<br>- acceptation d'une fiabilité plus faible pour augmenter l'approvisionnement |
| Eau souterraine | - réduire/augmenter l'usage selon les changements du rendement équilibré<br>- augmenter le nombre ou la profondeur des puits pour profiter des possibilités d'alimentation sur une large superficie | - exploiter de nouvelles sources d'eau (eau de surface) | - instituer une gestion des retraits en eau souterraine |
| Niveaux des lacs | - restreindre l'aménagement des rives<br>-réduire/augmenter les usages récréatifs et le transport selon les changements de niveau | - draguer les ports; surélever les ouvrages de défense, les berges<br>- ouvrages de régulation<br>- échanges entre bassins pour maintenir les niveaux | - assurance contre les inondations, aide aux sinistrés |
| Humidité du sol | - abandonner/augmenter les terres agricoles<br>- augmenter la superficie des forêts par plantation<br>- changer les systèmes de culture/travail du sol<br>- gérer l'habitat de milieux humides pour réduire les pertes/dégradation par d'autres causes | - étendre l'irrigation<br>- milieux humides artificiels | - subventionner l'agriculture<br>- assurance-récolte, mesures de soutien du revenu des agriculteurs |
| Qualité de l'eau | - augmenter/restreindre l'usage des plans d'eau touchés<br>- augmenter/restreindre les pêches<br>- réorienter les pêches vers les espèces qui bénéficient du changement<br>- changer la vocation des terres pour lutter contre l'érosion<br>- réduire les déversements localisés et non localisés | - augmenter/réduire le niveau de traitement de l'eau<br>- aérer les lacs et cours d'eau<br>- augmenter l'écoulement fluvial pendant les périodes de bas niveau<br>- installer des dispositifs d'aération et/ou d'autres dispositifs de mélange | - subventionner les pêches |
| Neige et glace | - diminuer/augmenter les usages récréatifs et le transport selon le comportement du couvert de glace<br>-augmenter/restreindre la production hydroélectrique selon le comportement du couvert de glace | - augmenter/diminuer les investissements en brise-glaces pour maintenir les voies navigables<br>-modifier les ouvrages de prise d'eau pour éviter l'accumulation des glaces | |
| | | | (Mortsch, 1995; Nuttle, 1993b) |

### *Évaluation des options en matière d'adaptation*

De nombreuses options s'offrent aux décideurs, en matière d'adaptation au changement et à la variabilité climatiques. Ces différentes options doivent cependant être évaluées. Les critères qui suivent peuvent servir de base en vue de l'évaluation des options en matière d'adaptation :

- souplesse;
- opportunité;
- faisabilité technique;
- équité;
- réalisme politique;
- urgence;
- compatibilité;
- coût (Goklany, 1992; Mortsch, 1996; Titus, 1990).

Les options d'adaptation peuvent également être classées en options d'anticipation ou de réaction. Si les mesures d'anticipation sont généralement préférables, des impacts imprévus mèneraient de manière générale à une adaptation de réaction.

### *Résumé*

Du point de vue des ressources en eau, les Canadiens dépensent actuellement des milliards de dollars pour s'adapter au climat actuel. Par exemple, des interdictions d'arrosage des pelouses sont en vigueur dans nombre de collectivités, et des barrages, digues et autres ouvrages coûteux sont mis en place pour maintenir/réduire les débits d'eau. Il convient cependant d'apporter une attention particulière à la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux modifications que pourraient entraîner le changement climatique et la variabilité actuelle du climat.

Les stratégies d'adaptation au changement climatique sont nombreuses et incluent notamment : partage des pertes, absorption des pertes, recherche, éducation, modification des événements, prévention des effets et évitement des impacts. Chacune de ces catégories comporte une variété d'options.

Les options les plus prometteuses sont cependant les stratégies de type « sans-regrets ». Ces stratégies font appel à des changements ou politiques qui favoriseraient l'adaptation au changement climatique, tout autant qu'elles contribuent à l'adaptation au climat actuel et à sa variabilité. Ce sont par exemple les stratégies de conservation de l'eau (tarification de l'eau, réduction de la consommation, etc.), et l'adoption de pratiques plus intégrées de gestion de la ressource en eau.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes pour la révision et leurs conseils: Raymond Assel (Great Lakes Environmental Research Laboratory, NOAA), Grace Koshida (SEA, Environnement Canada) et Marie Sanderson (Water Network, Université de Waterloo).

## RÉFÉRENCES

Adams, R., Fleming, R. Chang, C., McCarl, B. et Rosenzweig, C. (1995). Reassessment of the Economic Effects of Global Climate Change on U.S. Agriculture, *Climatic Change*, 30**:**147-167.

Akuoko-Asibey, A., Nkemdirim, L. et Draper, D. (1993). The Impacts of Climatic Variables on Seasonal Water Consumption in Calgary, Alberta, *Revue canadienne des ressources en eau*, 18(2):107-116.

Alexander, E. Jr., Alexander, S. et Lively, R. (1987). Recharge of the Mt. Simon/Hinckley aquifer; responses to climate change and water use, *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 68(44):1270.

Anderson, J., Shiau, S. et Harvey, D. (1991). « Preliminary investigation of trend/patterns in surface water characteristics and climate variations », dans G. Kite et K. Harvey (dir.), *Using hydrometric data to detect and monitor climatic change*, Proc. of NHRI Workshop, Institut national de recherches en hydrologie, Saskatoon (Sask.), p. 189-201.

Anderson, W., Robertson, D. et Magnuson, J. (1996). Evidence of recent warming and El-Nino-related variations in ice breakup of Wisconsin Lakes, *Limnology and Oceanography*, 41(5):815-821

Andres, D. (1994). « Peace River ice regime: An interim report », dans *Mackenzie Basin Impact Study (MBIS) Report #2*, S.J. Cohen (dir.), Proc. of 6th Biennial AES/DIAND Meeting on Northern Climate and Mid Study Workshop of MBIS, Yellowknife (T.N.-O.), 10-14 avril, Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 237-253.

Armour, A. (1992). The Cooperative Process: Facility Siting the Democratic Way, *Plan Canada*, mars, p. 29-31.

Arnstein, S. (1969). Ladder of Citizen Participation, *AIP Journal*, juillet, p. 216-224.

Ashfield, D., Phinney, R., Belore, H. et Goodison, B. (1991). « Criteria for identifying streamflow stations applicable to climate change studies », dans G. Kite et K. Harvey (dir.), *Using hydrometric data to detect and monitor climatic change*, Proc. of NHRI Workshop, Institut national de recherche en hydrologie, Saskatoon (Sask.), p. 165-180.

Ashworth, W. (1987). *The late, Great Lakes: An environmental history*, Wayne State University Press, Detroit (Mich.).

Assel, R. (1991). Implications of Carbon Dioxide Global Warming on Great Lakes Ice Cover, *Climatic Change*, 18(4):377-396.

Assel, R., Quinn, F., Leshkevich, G. et Bolsenga, S. (1983). *Great Lakes Ice Atlas*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Great Lakes Environmental Research Laboratory, Ann Arbor (Mich.), 115 p.

Assel, R., Janowiak, J. Young, S. et Boyce, D. (1996). Winter 1994 weather and ice conditions for the Laurentian Great Lakes, *Bulletin of the American Met. Society*, 77:77-88.

Bardecki, M. (1991). Wetlands and climate change: a speculative review, *Revue canadienne des ressources en eau*, 16:9-22.

Barry, R. (1990). Changes in mountain climate and glacio-hydrological responses, *Mt. Res. Develop.*, 10:161-170.

Barry, R. (1992). Mountain climatology and past and potential future climatic changes in mountain regions: a review, *Mt. Res. Develop.*, 12:71-86.

Barry, R. et Maslanik, J. (1992). « Monitoring lake freeze-up and breakup as a climatic index », dans *SnowWatch '92: Detection Strategies for Snow and Ice*, Barry, R., Goodison, B. et LeDrew, E. (dir.), U.S. Department of Congress, Washington (D.C.), p. 66-76.

Bauder, J. (1991). « Working group report on water resources », dans G. Wall (dir.), *Symposium on the impacts of climatic change and variability on the Great Plains*, Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 161-165.

Bergeron, L. (1995). *Les niveaux extrêmes d'eau dans le Saint-Laurent : ses conséquences économiques et l'influence des facteurs climatiques*. Rapport présenté à Environnement Canada, Services scientifiques, Direction de l'environnement atmosphérique, région du Québec, 70 p.

Berman, P. (1980). « Thinking about Programmed and Adaptive Implementation: Matching Strategies to Situations », dans *Why Policies Succeed or Fail*, H. Ingram et D. Mann (dir.), Sage, Beverly Hills (Ca.), p. 205-227.

Bjonback, D. (1991). « Climate and transboundary water management issues », dans G. Wall (dir.), *Symposium on the impacts of climatic change and variability on the Great Plains*, Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 167-169.

Blumberg, A. et DiToro, D. (1990). Effects of climate warming on dissolved oxygen concentrations in Lake Erie, *Trans. Am. Fish. Society*, 119:210-223.

Boer, G. J., Mcfarlane, N. et Lazare, M. (1992). Greenhouse gas-induced climate change simulated with the CCC second-generation general circulation model, *J. Climatology*, 5:1045-1077.

Botts, L. (1981). The west may reach for Great Lakes water, *Great Lakes Communicator*, 11:6-7.

Boyce, F., Hamblin, P., Harvey, D., McCrimmon, C. et Schertzer, W. (1992). *Deep Lake Water Cooling Study 2A, Impact of heat load on Lake Ontario : Assessment of current response and future impacts of climate change (warming)*, INRE Contribution No. 92-202, Burlington (Ont.).

Boyce, F.M., P.F. Hamblin, L.D. Harvey, W.M. Schertzer et C.R. McCrimmon (1993). Response of the thermal structure of Lake Ontario to deep cooling water withdrawals and to global warming, *Journal of Great Lakes Research*, 19(3):603-616.

Brklacich, M. (1990). « Climatic Warming and Potential Demands for Irrigation Water in Southwest Ontario », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 269-274.

Brklacich, M., Curran, P., Brunt, D. et NcNabb, D. (1997). « $CO_2$-Induced Climate Change and Agricultural Potential in the Mackenzie Basin Case », dans *Mackenzie Basin Impact Study (MBIS) Final Report*, S. Cohen (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 242-246.

Brown, R., Huges, M. et Robinson, D. (1994). Characterizing the long term variability of snow cover extent over the interior of North America, *Annals of Glaciology*, 21:45-50.

Brown, R. et Kupsch, W. (1974). *Permafrost Terminology*, Tech. Memo. No. 111, Assoc. Com. Geotech. Res., CNRC, Ottawa (Ont.), 62 p.

Bruce, J. et Mitchell, B. (1995). *Broadening Perspectives on Water Issues*, Canadian Global Change Program Incidental Report Series, No. IR95-1, Société royale du Canada, Ottawa (Ont.), 38 p.

Brugman, M.M., P. Raistrick et A. Pietroniro (1997). « Chapter 6 - Glacier related impacts of doubling atmospheric carbon dioxide concentrations on British Columbia and Yukon », dans *Responding to global climate change in British Columbia and Yukon, Vol. I, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, E. Taylor et B. Taylor (dir.), British Colombia Ministry of Environment, Lands and Parks et Environnement Canada, Vancouver (C.-B.), p. 6-1 à 6-9.

Buddemeier, R. et Oberdorfer, J. (1990). « Climate change and island groundwater resources », dans J. Pernetta et P. Hughes (dir.), *Implications of Expected Climate Changes in the South Pacific Region; an Overview*, UNEP Regional Seas Reports and Studies, Genève (Suisse), p. 56-67.

Burn, D. (1994). Hydrologic effects of climate change in west-central Canada, *J. Hydrology*, 160:53-70.

Burn, D. et Simonovic, S. (1996). Sensitivity of Reservoir Operation Performance to Climatic Change, *Water Resources Management*, 10: 463-478.

Burton, I. (1996). « The growth of adaptation capacity: practice and policy », dans *Adapting to Climate Change: an international perspective*, J.B. Smith, N. Bhatti, G.V. Menzhulin, R. Benioff, M. Campos, B. Jallow, F. Rijsberman, M.I. Budyko et R.K. Dixon (dir.), Springer, New York (N.Y.), p. 55-67.

Byrne, J., Barendregt, R. et Schaffer, D. (1989). Assessing Potential Climate Change Impacts on Water Supply and Demand in Southern Alberta, *Revue canadienne des ressources en eau,* 14: 5-15.

CCPB/CPCC - Conseil du Programme climatologique canadien (1990). *Climate Change Adaptation Strategies Workshop*, ministère des Approvisionnement et Services, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ont.), 18 p.

CCPB/CPCC - Conseil du Programme climatologique canadien (1994). *Adaptation in Canada's National Action Program on Climate Change*, submitted to the Climate Change Task Group of the National Air Issues Coordinating Committee, 25 p.

Changnon, S. A. (1987). An Assessment of Climate Change, Water Resources, and Policy Research, *Water International*, 12:69-76.

Changnon, S. A. (1989). The drought, barges, and diversion, *Bulletin of the American Meteorological Society,* 70:1092-1104.

Changnon, S. A. (1993). Changes in climate and levels of Lake Michigan: shoreline impacts at Chicago, *Climatic Change*, 23: 213-230.

Changnon, S. A., (dir.) (1994). *The Lake Michigan diversion at Chicago and urban drought: Past, present, and future regional impacts and responses to global climate change*, Report to the Great Lakes Environmental Research Laboratory, NOAA, CCR-36, 223 p. et appendice.

Child, M. et Armour, A. (1995). Integrated Water Resource Planning in Canada: Theoretical Considerations and Observations from Practice, *Revue canadienne des ressources en eau*, 20(2):115-126.

Cieslak, J. et Duffy, C., (1994). The effect of climatic variations on a salt water-fresh water interface, *EOS*, Transactions, American Geophysical Union, 75(16):176.

Clair, T., Beltaos, S., Brimley, W. et Diamond, A. (1997). « Ecosystem Science and Water Resources, Climate Change Sensitivities of Atlantic Canada's Hydrological and Ecological Systems », dans R.W. Shaw (dir.), *Climate change and Climate Variability in Atlantic Canada*, procès-verbal d'atelier, Halifax (N.-É.), 3-6 déc. 1996, p. 67-82.

Cohen, S. (1986). Impacts of $CO_2$-Induced Climatic Change on Water Resources in the Great Lakes Basin, *Climatic Change*, 8:135-153.

Cohen, S. (1987a). Projected Increases in Municipal Water Use in the Great Lakes Due to $CO_2$-Induced Climatic Change, *Water Resources Bulletin*, 23(1):91-102.

Cohen, S. (1987b). « Sensitivity of water resources in the Great Lakes Region to changes in temperature, precipitation, humidity and wind speed », dans S. Soloman, M. Beran et W. Hogg

(dir.), *Proc. Influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*, AISH Publ. No. 168, Vancouver (C.-B.), août 1987, p. 489-499.
Cohen, S. (1991). Possible Impacts of Climatic Warming Scenarios on Water Resources in the Saskatchewan River Sub-Basin, Canada, *Climatic Change*, 19: 291-317.

Cohen, S. J., Welsh, L. E. et Louie, P. Y. T. (1989). *Possible impacts of climate warming scenarios on water resources in the Saskatchewan River sub-basin*, Canadian Climate Centre, Report No. 89-9, Atmospheric Environment Service, National Hydrology Research Centre, Saskatoon (Sask.), pages div.

Cole, J., Oakes, D., Slade, S. et Clark, K. (1994). Potential impacts of climatic change and of sea-level rise on the yields of aquifer, river and reservoir sources, *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, 8(6):591-606.

Commission on Resources and the Environment (CORE) (1995). *Public participation*, The Provincial Land Use Strategy, Vol. 3, British Columbia, Commission on Resources and the Environment, Victoria (C.-B.).

Cooper, D., Wilkinson, W. et Arnell, N. (1995). The effects of climate changes on aquifer storage and river baseflow, *Hydrological Sciences Journal*, 40(5):615-631.

Coulson, H. (1997). « Chapter 5 - The impacts of climate change on river and stream flow in British Columbia and Southern Yukon », dans *Responding to global climate change in British Columbia and Yukon, Vol. I, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, E. Taylor et B. Taylor (dir.), British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks et Environnement Canada, Vancouver (C.-B.), p. 5-1 à 5-11.

Croley II, T. (1990). Laurentian Great lakes double-$CO_2$ climate change hydrology impacts, *Climatic Change*, 17:27-47.

Croley II, T. (1992). « CCC GCM 2x$CO_2$ Hydrological impacts on the Great Lakes », dans *Climate, climate change, water level forecasting and frequency analysis*, Supporting Documents, Vol. 1 Water supply scenarios, Task Group 2, Working Committee 3 IJC, Levels Reference Study, Phase II.

Croley, T. E. II, Quinn, F., Kunkel, K. et Changnon, S. (1996). *Climate Transposition Effects on the Great Lakes Hydrological Cycle*, NOAA Technical Memorandum ERL GLERL-89, Great Lakes Environmental Research Laboratory, Ann Arbor (Mich.), 100 p.

Crowe, A. (1993). The application of a coupled water-balance-salinity model to evaluate the sensitivity of a lake dominated by groundwater to climatic variability, *Journal of Hydrology*, 141(1-4):33-73.

Danard, M. et Murty, T. (1988). Some recent trends in precipitation in Western Canada and their possible link to rising carbon dioxide, *Atmosphere-Ocean*, 24:52-72.

Davies, J. et Schertzer, W. (1974). *Canadian radiation measurements and surface radiation balance estimates for Lake Ontario during IFYGL*, Final Report, IFYGL Project Nos. 71EB and 80EB. Dept. of Geography, Université McMaster, Hamilton (Ont.), 77 p.

Dorset Research Centre (1994). *Meteorologic Database: Dorset Research Centre*, ministère de l'Environnement et de l'Énergie de l'Ontario.

Downs, P., Gregory, K. et Brookes, A. (1991). How Integrated is River Basin Management?, *Environmental Management*, 15(3): 299-309.

Dudek, D. (1989). « Potential Climate Change Effects on Irrigated Agriculture in California », dans *Coping with Climate Change*, J. Topping Jr. (dir.), Washington (D.C.), The Climate Institute, p. 479-483.

Duncan, K. (1986). « Anthropogenic Greenhouse Gas-induced Warming: Suitability of Temperatures for the Development of Vivax and Falciparum Malaria in the Toronto Region of Ontario », dans L. Mortsch et B. Mills (dir.), *Great Lakes – St. Lawrence Basin Project Progress Report #1, Adapting to the impacts of climate change and variability*, Environnement Canada, Burlington (Ont.), p. 112-118.

Eilers, J. M., Brakke, D. F. et Landers, D. H. (1988). Chemical and physical characteristics of lakes in the Upper Midwest, United States, *Environmental Science and Technology*, 22:164-172.

Environnement Canada (1990). *Water – No Time to Waste – A Consumer's Guide to Water Conservation*, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.).

Environnement Canada (1992). *Water Conservation - Every Drop Counts*, Freshwater Series, A6, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 12 p.

Environnement Canada (1993a). *Groundwater: Nature's Hidden Treasure*, Water Fact Sheet 5, ministre de l'Environnement, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.), 12 p.

Environnement Canada (1993b). *A Primer on Fresh Water - The Environmental Citizenship Series*, Approvisionnnements et Services Canada, Ottawa (Ont.), 74 p.

Environnement Canada (1994*). HYDAT: Surface water and sediment data, water survey of Canada* (CDROM Version 4.92), Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Ottawa (Ont.).

Environnement Canada (1995*). L'état du climat au Canada : la surveillance de la variabilité et du changement climatiques*, Rapport sur l'état de l'environnement, n° 95-1, ministère des Travaux publics et des Services gouvernementaux, Ottawa (Ont.), 52 p.

Fisheries and Environment Canada (1978). *National Hydrologic Atlas*, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.), 34 feuillets de cartes.

Flint, A., Flint, L. et Hevesi, J. (1993). The influence of long term climate change on net infiltration at Yucca Mountain, Nevada. High Level Radioactive Waste Management, *Proceedings of the International Conference*, 4:152-159.

Fortin, M. et B. Mitchell (1990). *Water and Wastewater Charges: The User Pay Principle.* Ecologistics Ltd., Waterloo (Ont.), 55 p.

Freeman, C., Lock, M. et Reynolds, B. (1993). Fluxes of $CO_2$, $CH_4$ and $N_2O$ from a Welsh peatland following simulation of water table draw-down; potential feedback to climatic change, *Biogeochemistry*, 19(1):51-60.

Freeze, R. et Cherry, J. (1979). *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs ( N.J.), 604 p.

Gabriel, A. et Kreutzwiser, R. (1993). Drought hazard in Ontario: a review of impacts, 1960-1989, and management implications, *Revue canadienne des ressources en eau*, 18:117-132.

Gan, T. (1991). « Finding trends in air temperature and precipitation for Canada and North-eastern United States », dans *Using hydrometric data to detect and monitor climatic change*, G. Kite et K. Harvey (dir.), procès-verbal de l'atelier de l'INRH, Institut national de recherche en hydrologie, Saskatoon (Sask.), p. 57-78.

Goklany, I. (1992). *Adaptation and Climate Change*, une communication présentée à l'American Association for the Advancement of Science, Chicago, 6-11 févr. 1992, Department of the Interior, Washington ( D.C.), 32 p.

Goos, T. (1989). L*es effets du climat et du changement climatique sur l'économie de l'Alberta, Sommaire du changement climatique SCC 89-05*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.).

Goos, T. et G. Wall (1994). Résumé du colloque relatif aux effets du changement climatique sur la gestion des ressources du nord, *Sommaire du changement climatique SCC 94-02,* Environnement Canada, Ottawa (Ont.).

Gouvernement du Canada (1992). *Country Paper for Canada: International Conference on Water and the Environment*, Environnement Canada, Hull (Qué.), pages div.

Gray, J. (1983). Water: A Resource Like Any Other, *Canadian Water Resources Journal*, 8(4):35-41.

Grimm, N., A. Chacon, C. Dahm, S. Hostetler, O. Lind, P. Starkweather et W. Wurtsbaugh (1997). Sensitivity of aquatic ecosystems to climate and anthropogenic changes: The Basin and Range, American Southwest, and Mexico, *Hydrological Processes*, 11:1023-1042.

Gu, R. et Stefan, H. (1990). Year-round temperature simulation of cold climate lakes, *Cold Region Sciences and Technology*, 18:147-160.

Haas, J. et Marta, T. J. (1988). *Assessing the effect of climate change on the operation of a water-supply reservoir*, document inédit, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 6 p.

Hammer, U. T. (1990). The effects of climate change on the salinity, water levels and biota of Canadian Prairie saline lakes, *International Association of Theoretical and Applied Limnology*, 24:321-326.

Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Ston, I. Fung, R. Ruedy et J. Lerner (1984). « Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanism », dans *Climate Processes and Climate Sensitivity*, J. E. Hansen et T. Takahashi (dir.), Maurice Ewing Series 5, American Geophysical Union, Washington (D.C.), p. 130-163.

Hansen, J., G. Russell, D. Rind, P. Stone, A. Lacis, S. Lebedeff, R. Rudey et L. Travis (1983). Efficient three-dimensional global models for climate studies: Models I and II, *Monthly Weather Review*, 111: 609-662.

Hanson, H., Hanson, C. et Yoo, B. (1992). Recent Great Lakes ice trends, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(5):577-84.

Hardy, M., Chisholm, S., Crance, C., Dooling, P., Cheung, L. et Mulamoottil, G. (1994). The Status of Subwatershed Planning in Ontario, *Revue canadienne des ressources en eau*, 19(3):201-211.

Hartmann, H. (1990a). « Climate Change Impacts on Great Lakes Levels and Flows: Energy and Transportation Implications », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 239-246.

Hartmann, H. C. (1990b). Climate change impacts on Laurentian Great Lakes levels, *Climatic Change*, 17: 49-67.

Herbert, D. et Burton, I. (1995). *Estimated Costs of Adaptation to Canada's Current Climate and Trends under Climate Change*, rapport inédit, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 19 p.

Herr, R. (1978). *Hydrological Atlas of Canada*, planche 29, Groundwater Observation Wells, Cat. No. En 37-26/1978 ISBN 0-660-01591-9, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.).

Hinzman, L. et Kane, D. (1992). Potential response of an arctic watershed during a period of global warming, *Journal of Geophysical Research*, 97(D3): 2811-2820.

Hofmann, N. (1996). *Still Dripping: The Issue of Municipal Ground Water Extraction from Wilmot Township, Ontario*, thèse de maîtrise inédite, School of Urban and Regional Planning, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 182 p.

Hofmann, N. (1994). *The Role of Local Communities and the Province in the MOEE Permit to Take Water Program*, travail inédit d'études de premier cycle, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 99 p.

Hofmann, N. et Davidson, G. (1997). The RESPECT Model: Moving towards effective decision-making, *Plan Canada*, 37(3), p. 29-32.

Hokett, S., Smith, S. et Cochran, G. (1990). Field investigation of the effect of climate change on recharge at a field site near Yucca Mountain, *Proceedings of the Geological Society of America 1990 Annual Meeting*, Geological Society of America, 53 p.

Houtman, N. (1994). Résumé du colloque : *Une réaction régionale au changement climatique planétaire : la Nouvelle-Angleterre et l'est du Canada, Sommaire du changement climatique SCC 94-03*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 15 p.

Howitt, R., et M'Marete, M. (1990). « The value of groundwater in adapting to drought; lessons from 1976-1977 », dans J. De Vries (dir.), *Coping with Water Scarcity; the Role of Ground Water*, Vol. 72, California Water Resources Center, University of California, Riverside (Ca.), p. 45-54.

IBI Group (1990). Les répercussions du changement climatique à long terme sur les transports au Canada, *Sommaire du changement climatique SCC 90-02*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 8 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1990*). Climate Change - The IPCC Impacts Assessment*, McG. Tegart, W.J., Sheldon, G.W. et Griffiths, D.C. (dir.), Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), 365 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1996). *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, R.T. Watson, M.C. Zinyowera et R.H. Moss (dir.), Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), 879 p.

Isaac, G. A. et Stuart, R. A. (1992). Temperature-precipitation relationships for Canadian stations, *J. Climate*, 5:822-830.

Jackson, C.I. (1992). Répercussions du réchauffement climatique sur la politique du gouvernement canadien, *Sommaire du changement climatique 92-01*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 17 p.

Jackson, C.I. (1990). *Global Warming Implications for Canadian Policy*, préparé pour le Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, par l'Institut de recherches en politiques publiques.

Jury, W. et Gruber, J. (1989). Stochastic analysis of the influence of soil and climatic variability on the estimate of pesticide groundwater pollution potential, *Water Resources Research*, 25(12):2465-2474.

Katz, R. et Brown, B. (1992). Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages, *Climatic Change*, 21: 289-302.

Kerr, J. A. (1997). « Future Water Levels and Flows for Great Slave and Great Bear Lakes, Mackenzie River and Mackenzie Delta », dans *Mackenzie Basin Impact Study (MBIS) - Final Report*, S. J. Cohen (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 73- 91.

Kerr, J. et N. Loewen (1995). *Mackenzie Basin in NWT: effects of alternative future inflows on water levels and flows, including Great Slave and Great Bear Lakes*, Environnement Canada, Yellowknife, présenté à la réunion annuelle de la section d'hydrologie de la Canadian Geophysical Union et du International GEWEX Workshop on Cold Season/Region Hydrometeorology, Banff (Alb.), 22-26 mai 1995.

Kite, G. et Harvey. K. (dir.) (1992). Procès-verbal de l'atelier n$^{o}$ 8 de l'INRH, *Using Hydrometric Data to Detect and Monitor Climate Change*, Environnement Canada, INRH, Saskatoon (Sask.), 247 p.

Klemes, V. (1985). *Sensitivity of water resource systems to climate variations*, World Climate Program Report, WCP-8, World Meteorological Organization, 500 p.

Koshida, G. (1992). *About Drought in Canada*, CLI-1-92, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 41 p.

Koshida, G., Mills, B., Mortsch, L. et McGillivray, D. (1993). *Climate Sensitivity, Variability and Adaptation Issues in the Great Lakes-St. Lawrence Basin: A Reference Document*, Climate Adaptation Branch Bulletin 93-06, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 59 p.

Kovalevskii, V. et Maksimova, N. (1989). Predictive estimation of natural groundwater resources in the near future, *Vodnye Resursy*, 15(2), p. 133-139.

Kreutzwiser, R. (1991). « Water Resource Management: Canadian Perspectives and the Great Lakes Water Levels Issue », dans B. Mitchell (dir.), *Resource Management and Development*. Oxford University Press, Don Mills (Ont.), p. 153-179.

Kreutzwiser, R. (1996). *Climate Variability, Climate Change and Rural Water Supplies in the Great Lakes-St. Lawrence Basin*, rapport présenté au Groupe de recherche sur l'adaptation environnementale, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 32 p.

Kuchment, L. (1989). *Evaluation and prediction of possible man-induced changes in the hydrological cycle, New Directions for Surface Water Modeling*, IAHS Publication No. 198.

Kukkonen, I. Cermak, V. et Safanda, J. (1994). « Subsurface temperature-depth profiles, anomalies due to climatic ground surface temperature changes or groundwater flow effects », *Global and Planetary Change*, 9(3-4):221-232.

Kwong, J. et Gan, T. (1994). Northward Migration of Permafrost Along the Mackenzie Highway and Climatic Warming, *Climatic Change*, 26: 399-419.

Lam, D. et Schertzer, W. (1987). Lake Erie thermocline model results : Comparison with 1967-1982 data and relation to anoxic occurrences, *Journal of Great Lakes Research*, 13(4):757-769.

Lam, D., Schertzer, W. et Fraser, A. (1987a). A post-audit analysis of the NWRI nine-box water quality model for Lake Erie, *Journal of Great Lakes Research*, 13(4):782-800.

Lam, D., Schertzer, W. et Fraser, A. (1987b). Oxygen depletion in Lake Erie: Modeling the physical, chemical and biological interactions, 1972 and 1979, *Journal of Great Lakes Research*, 13(4):770-781.

Lambert, S. (1995). The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strength, *J. Climate*, 8:1447-1452.

Lamothe et Périard, consultants (1989). *Les répercussions d'un changement climatique sur les besoins en eau des municipalités et sur l'industrie du golf au Québec, Sommaire du changement climatique SCC 89-04*, SEA, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 6 p.

Law, N. et Hartig, J. (1993). Public Participation in Great Lakes Remedial Action Plans, *Plan Canada*, mars, p. 31-35.

Lawford, R. (1990). « Climate Change and Water Supply and Demand in Western Canada », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 193-199.

Lawford, R. (1992). « Hydrological indicators of climatic change: issue or opportunity? », dans G. Kite et K. Harvey (dir.), procès-verbal de l'atelier n° 8 de l'INRH, *Using Hydrometric Data to Detect and Monitor Climate Change*, Environnement Canada, INRH, Saskatoon (Sask.), p. 9-20.

Leavesley, G. H. (1994). Modeling the effects of climate change on water resources - a review, *Climatic Change*, 28:159-177.

Leadlay, H. (1996). *An Evaluation of Ontario Rural Water Supply Allocation Policy and Practice*, thèse de maîtrise inédite, Département de Géographie, Université de Guelph, Guelph (Ont.), 123 p.

Lee, D.H., Quinn, F.H., Sparks, D. et Rassam, J.C. (1994). Modification of Great Lakes regulation plans for simulation of maximum Lake Ontario outflows, *Journal of Great Lakes Research*, 20(3):569-582.

Lee, D., Moulton, R. et Hibner, B. (1996). *Climate change impacts on western Lake Erie, Detroit River, and Lake St. Clair water levels*, rapport préparé pour le Great Lakes-St. Lawrence Basin Project, 44 p.

Levels Reference Study Board (1993). *Great Lakes St-Lawrence River Basin, Appendix C, Report of Working Committee 3: Existing regulation, system-wide regulation, climate change and crisis conditions*, février 1993, tableau 16.

Lewis, J. (1989). Climatic Change and its Effects on Water Resources for Canada: A Review, *Revue canadienne des ressources en eau*, 14:34-55

Lucas, A. R. (1990). *Security of Title in Canadian Water Rights*. Faculty of Law, Canadian Institute of Resources Law, Université de Calgary, Calgary (Alb.), pages div.

Magnuson, J., Meisner, J. et Hill, D. (1990). Potential Changes in the Thermal Habitat of Great Lakes Fish After Global Climate Warming, *Trans. Am. Fish. Soc.*, 119:254-264.

Magnuson, J., Assel, R., Bowser, C., Dillon, P., Eaton, J., Evans, H., Fee, E., Hall, R., Mortsch, L., Quinn, F., Schindler, D. et Webster, K. (1997). Potential Effects of Climate Changes on Aquatic Systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region, *Hydrological Processes*, 11: 825-872.

Manabe, S. et Stouffer, R.J. (1980). Sensitivity of a Global Climate Model to an Increase of $CO_2$ Concentration in the Atmosphere, *J. Geophysical Res.*, 85:5529-5554.

Manabe, S. et Wetherald, R. T. (1987). Large-scale changes in soil wetness induced by an increase in carbon dioxide, *J. Atmos. Sci.* 44:1211-1235.

Marchand, D., Sanderson, M., Howe, D. et Alpaugh, C. (1988). Climatic Change and Great Lakes Levels: The Impact on Shipping, *Climatic Change*, 12:107-133.

Marsh, P. et Hey, M. (1989). The flooding hydrology of Mackenzie Delta lakes near Inuvik, N.W.T., Canada, *Arctic*, 42: 41-49.

Marsh, P. et Lesack, L. F. W. (1997). Climate change and the hydrologic regime of lakes in the Mackenzie Delta, *Limnology and Oceanography*, 41:849-856.

Marsh, P. et Schmidt, T. (1993). Influence of a Beaufort Sea Storm Surge on Channel Levels in the Mackenzie Delta, *Arctic*, 46, 35-41.

Martec Limited (1987). *Effets d'une hausse d'un mètre du niveau moyen de la mer à Saint-Jean, N.-B., et au passage inférieur du Saint-Jean. Sommaire du changement climatique SCC 87-04*, Centre climatologique canadien, Downsview (Ont.), 8 p.

Martinello, L. et Wall, G. (1993). « Implications of climate change for Luther Marsh », dans *The impact of climate change on water in the Grand River basin, Ontario*, M. Sanderson (dir.), Dept. of Geography Publication Series, No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 105-136.

McAdams, T., Brooks, K. et Verry, E. (1993). « Modeling water table response to climate change in a northern Minnesota peatland », dans *Management of Irrigation and Drainage Systems: Integrated Perspectives*, R. Allen (dir.), American Society of Civil Engineers, New York (N.Y.), p. 358-365.

McBean, G., Slaymaker, O., Northcote, T., LeBlond, P. et T. Parsons (1992). *Étude de modèles de prévision des variations climatiques et de leurs incidences sur l'hydrologie, les courants côtiers et les pêches de la Colombie-Britannique*, *Sommaire du changement climatique SCC 92-02*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 15 p.

McDonald, A. et Kay, D. (1988). *Water resources: issues and strategies.* Longman Scientific and Technical, Essex (Angleterre), 284 p.

McFarlane, N. A., G. J. Boer, J.-P. Blanchet et M. Lazare (1992). The Canadian Climate Centre second-generation general circulation model and its equilibrium climate, *J. Clim*., 5:1013-1044.

McLaren, R. et Sudicky, E. (1993). « The Impact of Climate Change on Groundwater », dans *The Impact of Climate Change on Water in the Grand River Basin, Ontario,* M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 53-67.

Meisner, J. (1990). « The Role of Groundwater in the Effect of Climatic Warming on Stream Habitat of Brook Trout », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 209-215.

Meisner, J., Goodier, J., Regier, H., Shuter, B. et Christie, W. (1987). An Assessment of the Effects of Climate Warming on Great Lakes Basin Fishes, *Journal of Great Lakes Research*, 37: 340-352.

Meisner, J., Rosenfeld, J. et Regier, H. (1988). The role of ground water in the impact of climate warming on stream salmonids, *Fisheries* (Bethesda), 13(3):2-8.

Mekis, E. et Hogg, W. (1997, sous presse). Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation time series, *10th conference on Applied Climatology*, 20-24 octobre 1997, Reno (Nev.).

Mendelsohn, R., Nordhaus, W. et Shaw, D. (1994). The Impacts of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis, *American Economic Review*, 84:753-771.

Mendelsohn, R., Nordhaus, W. et Shaw, D. (1996). Climate Impacts on Aggregate Farm Value: Accounting for Adaptation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 80:55-66.

Meyer G., Masliev, I. et Somlyody, L. (1994). *Impact of Climate Change on Global Sensitivity of Lake Stratification*, IIASA Working Paper, WP-94-28, 56 p.

Michel, F. et van Everdingen, R. (1994). Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic change, *Permafrost and Periglacial Processes*, 5(3):191-195.

Mimikou, M., Kouvopoulos, Y., Cadavias, G. et Vayianos, N. (1991). Regional hydrological effects of climate change, *Journal of Hydrology*, 123(1/2): 119-146.

Ministry of Natural Resources (MNR) (1994). *Natural Channel Systems: An Approach to Management and Design*, avant-projet, ministère des Ressources naturelles de l'Ontario, Toronto (Ont.), 103 p.

Minns, C. et Moore, J. (1992). Predicting the Impact of Climate Change on the Spatial Pattern of Freshwater Fish Yield Capability in Eastern Canadian Lakes, *Climatic Change*, 22(4):305-326.

Mitchell, B. (1984). The Value of Water as a Commodity, *Canadian Water Resources Journal*, 9(2):30-39.

Mitchell, B. (1989a). *Geography and Resource Analysis, 2e éd.*, Longman Scientific and Technical, Essex (Angleterre), 386 p.

Mitchell, B. (1989b). Who is concerned with the "Big Picture"?, *Canadian Water Resources Journal*, 14(4):1-2.

Mitchell, B. (1991). *Integrated Water Management: International Experiences and Perspectives*, Belhaven Press, Essex (Angleterre), 225 p.

Mitchell, B. et Shrubsole, D. (1994). *Canadian Water Management Vision for Sustainability*, Canadian Water Resources Association, Cambridge (Ont.), 326 p.

Moore, M., Pace, M., Mather, J., Murdoch, P., Howarth, R., Folt, C., Chen, Y., Hemond, H., Flebbe, P. et Driscoll, C. (1997). Potential effects of climate change on freshwater ecosystems of the New England/Midatlantic Region, *Hydrological Processes*, 11: 925-948.

Moore, T. R. et Knowles, R. (1989). The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils, *Can. J. Soil Sci.*, 67: 77-81.

Morin, G. et Couillard, D. (1990). Predicting River Temperatures with a Hydrological Model. *Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol. 10, Surface and Groundwater Flow Phenomena*, Gulf Publishing Company, Houston (Tex.).

Morin, G. et M. Slivitzky (1992). Impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie, *Revue des Sciences de l'eau*, 5, p. 179-195.

Mortsch, L. (1990). « Climatic Change and Variability: the effects of an altered water regime on Great Lakes coastal wetlands », dans *Climate Change Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 217-224.

Mortsch, L. (dir.) (1995). *Climate Change Impacts: An Ontario Perspective*, préparé pour la Ontario Round Table on Environment and Economy: Transportation and Climate Change Collaborative, Environnement Canada, Burlington (Ont.), 76 p.

Mortsch, L. D. (1996). « Lessons Learned from Past Climate Impact Assessment Research », dans *Ecosystem Effects of Atmospheric Change*, procès-verbal d'une réunion à Pointe-Claire (Qué.), Working Group on the Ecosystem Effects of Ultraviolet Radiation and the Working Group on Climate Change and Variability, Memorandum of Understanding on Science and Technology for Sustainable Development in the Natural Resources Sector, Gouvernement du Canada, Canada, p. 53-64.

Mortsch, L. (1997). Round Table #1: Interjurisdictional Water Management, dans *Mackenzie Basin Impact Study (MBIS) - Final Report*, S.J. Cohen (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 46-49.

Mortsch, L. et F. Quinn (1996). Climate change scenarios for Great Lakes Basin ecosystem studies, *Limnology and Oceanography*, 41(5):903-911.

Mulamoottil, G., Hofmann, N., Marshall, J. Paley, M. et Smith, S. (1996). The Evolution of Stormwater Management in the Grand River Watershed, *Canadian Water Resources Journal*, 20(4):249-258.

Mulholland, P., G. Best, C. Coutant, G. Hornberger, J. Meyer, P. Robinson, J. Stenberg, R. Turner, F. Vera-Herrera et R. Wetzel (1997). Effects of climate change on freshwater ecosystems of the southeastern United States and the Gulf coast of Mexico, *Hydrological Processes*, 11:949-970.

Murthy, C. et Schertzer, W. (1994). Physical Limnology and Water Quality Modeling of North American Great Lakes. Part I. Physical Limnology, *Water Poll. Res. J. Canada*, 29(2/3):157-184.

Myers, N. (1993). Biodiversity and the Precautionary Principle, *Ambio*, 22(2-3):74-79.

National Wetlands Working Group/Groupe de travail national sur les terres humides (1988). *Wetlands of Canada. Ecological Land Classification Series, No. 24*, Directions du développement durable, Environnement Canada, Ottawa (Ont.) et Polyscience Publications Inc., Montréal (Qué.), 452 p.

Ng, H. et Marsalek, J. (1992). Sensitivity of Streamflow Simulation to Changes in Climatic Inputs, *Nordic Hydrology*, 23(4): 257-272

Nkemdirim, L. et Purves, H. (1994). Comparison of Recorded Temperature and Precipitation in the Oldman Basin with Scenarios Projected in General Circulation Models, *Canadian Water Resources Journal*, 19(2):157-164.

Noda, A. et Tokioka, T. (1989). The effect of doubling of the $CO_2$ concentration on convective and non-convective precipitation in a general circulation model coupled with a simple mixed later ocean, *J. Met. Soc. Japan*, 67:1055-67.

Nuttle, W. (1993a). *Adaptation au changement climatique et variablilité des ressources en eau du Canada, Sommaire du changement climatique 93-02*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 18 p.

Nuttle, W. (1993b). *Adaptation to Climate Change and Variability in Canadian Water Resources*, Rawson Academy of Aquatic Science, Occasional Paper No. 7, Ottawa (Ont.), 53 p.

Panagoulia, D. et Dimou, G. (1995). « Groundwater-streamflow interactions under changing climate conditions », dans *Man's Influence on Freshwater Ecosystems and Water Use*, G. Petts (dir.), International Association of Hydrological Sciences Press, Wallingford (G.-B.), p. 191-196.

Paragon Engineering (1992). *Benefits of Subwatershed Planning*, présenté au ministère des Ressources naturelles de l'Ontario, Section de la politique sur l'eau.

Paragon Engineering (1994). *Long Term Water Strategy: Grand River Supply Option*, prepared for the Regional Municipality of Waterloo, Paragon Engineering, Kitchener, Ontario and the Regional Municipality of Waterloo, Kitchener (Ont.), 46 p.

Patterson, J. et Hamblin, P. (1988). Thermal simulation of a lake with winter ice cover, *Limnology and Oceanography*, 33: 323-338.

Peck, A., et Allison, G. (1988). « Groundwater and salinity response to climate change, Greenhouse », dans *Planning for Climate Change*, G. Pearman (dir.), CSIRO Division of Atmospheric Research, Victoria (Australie), p. 238-251.

Peterson, D. et Keller, A. (1990). « Irrigation », dans *Climate Change and U. S. Water Resources*, P. Waggoner (dir.), John Wiley and Sons, New York (N.Y.), p. 269-306.

Phillips, C. (1991). « Climate change and reservoir and water management in the West », dans *Symposium on the impacts of climatic change and variability on the Great Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 161-165.

Phillips, D. (1990). *Les Climats du Canada*, ministère des Approvisionnements et Services, Ottawa (Ont.), 176 p.

Poiani, K. et Johnson, W. (1991). Global warming and prairie wetlands: potential consequences for waterfowl habitat, *Bioscience*, 41: 611-618.

Poiani, K. et Johnson, W. (1993a). Potential effects of climate change on a semi-permanent Prairie wetland, *Climatic Change*, 24: 213-232.

Poiani, K. et Johnson, W. (1993b). A spatial simulation model of hydrology and vegetation dynamics in semi-permanent prairie wetlands, *Ecological Applications*, 3: 279-293.

Poiani, K., Johnson, W., Swanson, G. A. et Winter, T. C. (1996). Climate change and northern prairie wetlands: Simulations of long-term dynamics, *Limnology and Oceanography*, 41: 871-881.

Prowse, T. (1996). « Climate Change Effects on Permafrost, Freshwater, Ice, and Glaciers », dans *Ecosystem Effects of Atmospheric Change*, procès-verbal d'une réunion tenue à Pointe-Claire (Qué.), Working Group on the Ecosystem Effects of Ultraviolet Radiation and the Working Group on Climate Change and Variability, Memorandum of Understanding on Science and Technology for Sustainable Development in the Natural Resources Sector, Gouvernement du Canada, Canada, p. 105-136.

Rannie, W. R. (1983). Break-up and freeze-up of the Red River at Winnepeg, Manitoba, Canada, in the 19th century and some climatic implications, *Climatic Change*, 5:283-296.

Regier, H. et Meisner, J. (1990). Anticipated Effects of Climate Change on Freshwater Fishes and Their Habitat, *Fisheries*, 15(6):10-15.

Rhodes, S. L. et Wiley, K. B. (1993). Great Lakes toxic sediments and climate change: Implications for environmental remediation, *Global Environmental Change*, 3(3):292-305.

Richards, T. (1964). The Meteorological Aspects of Ice Cover on the Great Lakes, *Monthly Weather Review*, 92:297-302.

Riebsame, W. (1988). Adjusting Water Resources Management to Climate Change, *Climatic Change*, 13: 69-97.

Ripley, E. (1987). « Climate Change and the Hydrological Cycle », dans *Canadian Aquatic Resources*, M. Healey et R. Wallace (dir.*), Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences 215*, ministère des Pêches et Océans, Ottawa (Ont.), p. 137-178.

Rissling, L. (1996). « The Causes and Impacts of 1980's High and Low Water Levels on the Tourism and Recreation Sector of Lakes Huron and Erie », dans L. Mortsch et B. Mills (dir.), *Great Lakes – St. Lawrence Basin Project Progress Report #1: Adapting to the impacts of climate change and variability*, Environnement Canada, Burlington (Ont.), p. 94-97.

Rivers, R. et Tate, D. (1990). « Water Demand Management: A Policy Response to Climate Change », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 187-191.

Rizzo, B. (1990). « The ecosystems of Canada in 2050: A scenario of change », dans *State of the Environment Reporting*, Environment Canada Newsletter, 5:4-5.

Rizzo, B. et Wiken, E. (1992). Assessing the sensitivity of Canada's ecosystems to climatic change, *Climatic Change*, 21:37-55.

Robertson, D., Ragotzkie, R. et Magnuson, J. (1992). Lake ice records used to detect historical and future climate change. *Climatic Change*, 21: 407-427.

Robinson, J. et Creese, E. (1993). « Climate Change and the Municipal Water systems of Cambridge, Kitchener and Waterloo », dans *The Impact of Climate Change on Water in the Grand River Basin, Ontario*, M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 159-188.

Robinson, P., Davies, J. et Nunez, M. (1972). *Longwave Radiation Exchanges over Lake Ontario*, Fourth Report, P.O. HO.81276, Gouvernement du Canada.

Rodgers, G. (1965). « The thermal bar in the Laurentian Great Lakes », dans *Proceedings of the 8th Conf. Great Lakes Research*, University of Michigan, Great Lakes Res. Div. Publ. No. 13, p. 358-363.

Rodgers, G. (1987). Time of onset of full thermal stratification in Lake Ontario in relation to lake temperatures in winter, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 44:2225-2229.

Rogers, P. (1994). Assessing the Socioeconomic Consequences of Climate Change on Water Resources, *Climatic Change*, 28:179-208

Rosenberg, N. et Katz, L. (1991). « Climate Variability and Great Plains Agriculture », dans *Symposium on the Impacts of Climatic Change and Variability on the Great Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 55-64.

Roulet, N., Moore, T., Bubier, J. et Lafleur, P. (1992). Northern fens, methane flux and climatic change, *Tellus*, 44B:100-105.

Rouse, W., Douglas, M., Hecky, R., Hershey, A., Kling, G., Lesack, L., Marsh, P., McDonald, M., Nicholson, B., Roulet, N. et Smol, J.(1997). Effects of climate change on the fresh waters of Arctic and subarctic North America, *Hydrological Processes*, 11: 873-902.

Sanderson, M. (1987). *Répercussions d'un changement de climat sur la navigation et la production d'électricité dans les Grands Lacs. Sommaire du changement climatique SCC 87-03*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 20 p.

Sanderson, M. (dir.) (1996). *Report on the Workshop on Water Quantity Management in Ontario*, Water Network and Canadian Water Resources Association, Niagara Falls (Ont.), 20-21 novembre 1996, 58 p.

Sanderson, M. et Smith, J. V. (1990). « Climate Change and Water Balance of the Grand River Basin », *Proceedings 43rd Conference*, Canadian Water Resources Association, Penticton (C.-B.), p. 234-261.

Sanderson, M. et Smith, J. (1993). « The Present and 2x$CO_2$ Climate and Water Balance in the Basin », dans *The Impact of Climate Change on Water in the Grand River Basin, Ontario*, M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 3-24.

Sandstrom, K. (1995). Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania, *Nordic Hydrology*, 26(4/5):313-330.

Saulesleja, A. (1989). « Possible impacts of climate change in Eastern Canada », dans *Proc. of a workshop on Climate Change and Water Resources*, R. G. Lawford et T. J. Marta (dir.), Technical Workshop Series No. 9, National Hydrology Research Centre, Saskatoon (Sask.), p. 21-22.

Schertzer, W. (1981). « Net radiation over Lake Ontario », chap. 8, dans Aubert, E. et Richards, T. (dir.), *Energy Balance, IFYGL - The International Field Year for the Great Lakes*, NOAA/GLERL, Ann Arbor (Mich.), p. 241-246.

Schertzer, W.M. (1987). Heat balance and heat storage estimates for Lake Erie, 1967 to 1982, *Journal of Great Lakes Research*, 13(4):454-467.

Schertzer, W. (1997a). « Freshwater Lakes », chap. 6, dans W.G. Bailey, T.R. Oke et W.R. Rouse (dir.), *Surface Climates of Canada*, McGill-Queens University Press, Montréal et Kingston, p. 124-148.

Schertzer, W.M. (1998a, comm. pers.). Surface temperature, vertical temperature profiles and heat storage of Lake Erie (1966-1996).

Schertzer, W.M. (1998b, comm. pers.). Surface temperature, vertical temperature profiles and heat storage of Lake Ontario (1966-1996).

Schertzer, W. et Croley II, T. (1997a, sous presse). « Climate change impact on hydrology and lake thermal structure », dans S.S.Y. Wang (dir.), *Environmental and Coastal Hydraulics: Theme B – Protecting the Aquatic Habitat, Proc. XXVII IAHR Congress*, San Francisco, 10-15 août 1997, p. 919-924.

Schertzer, W. et Croley II, T. (dir.) (1997b, sous presse). « Climate and Lake Responses », chap. 2, dans D.C.L. Lam (dir.), *Climate and Lake Hydrodynamics*, ASCE Monograph Series, American Society of Civil Engineers (ASCE).

Schertzer, W. et Lam, D. (1991). « Modelling Lake Erie Water Quality - A Case Study », chap. 2, dans Henderson-Sellers, B. et French, R. (dir.*), Water Quality Modeling, Volume IV - Decision Support Techniques for Lakes and Reservoirs*, CRC Press, Boca Raton (Fla.), p. 27-68.

Schertzer, W. et Lam, D. (1997, comm. pers.). Preliminary estimates nutrient loading to Lake Erie Central basin 1950-1996 under current and climate changed conditions.

Schertzer, W. et Murthy, C. (1994). Physical limnology and water quality modeling of North American Great Lakes. Part II. Water quality modeling, *Water Pollution Research Journal Canada*, 29 (2/3): 157-184.

Schertzer, W. et Sawchuk, A. (1990). Thermal Structure of the lower Great Lakes in a warm year: Implications for the occurrence of hypolimnion anoxia, *Transactions of the American Fisheries Society*, 119(2): 195-209.

Schertzer, W., Saylor, J., Boyce, F., Robertson, D. et Rosa, F. (1987). Seasonal thermal cycle of Lake Erie, *Journal of Great Lakes Research*, 13(4):468-486.

Schindler, D. (1997). Widespread effects of climatic warming on freshwater ecosystems in North America, *Hydrologic Processes*, 11: 1004-1017.

Schindler, D., Bayley, S., Parker, B., Beaty, K., Cruikshank, D., Fee, E., Schindler, E. et Stainton, M. (1996). The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, *Limnology and Oceanography*, 41(5):1004-1017.

Schindler, D.W., Beaty, K.G., Fee, E.J., Cruikshank, D.R., DeBruyn, E.R., Findlay, D.L., Linsey, G.A., Shearer, J.A., Stainton, M.P. et Turner, M.A. (1990). Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest, *Science*, 250: 967-969.

Schlesinger, M. et Z. Zhao (1988). *Seasonal Climate changes induced by doubled $CO_2$ as simulated by the OSU Atmospheric GCM/Mixed-Layer Ocean Model*, Oregon State University Climate Research Institute Report, Corvallis (Oreg.).

Shady, A. (dir.) (1989). *Irrigation, Drainage, and Flood Control in Canada*, Agence canadienne de développement international, Ottawa (Ont.).

Sharma, M. (1989). Impact of climate change on groundwater recharge, *Conference on Climate and Water*, Valtion Painatuskeskus, Helsinki (Finlande), 1:511-520.

Singh, B. (1987). « The impacts of $CO_2$-induced climate change on hydro-electric generation potential in the James Bay Territory of Quebec », dans *Proc. Influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*, Soloman, S. I., M. Beran et W. Hogg (dir.), IAHS Publ. No. 168, Vancouver (C.-B.), août 1987, p. 403-418.

Singh, B. (1988). *Les répercussions d'un changement climatique sur les ressources naturelles du Québec, Sommaire du changement climatique SSC 88-08*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 11 p.

Singh, B. et Stewart, R. (1991). Potential impacts of $CO_2$-induced climate change using the GISS scenario on agriculture in Quebec, Canada, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 35:327-347.

Sinokrot, B., Stefan, H., McCormick, J. et Eaton, J. (1995). Modeling of climate change effects on stream temperatures and fish habitats below dams and near groundwater inputs, *Climatic Change*, 30(2):181-200.

Skinner, W. (1992). « Lake ice conditions as a cryospheric indicator for detecting climate change variability in Canada », dans *SnowWatch '92: Detection Strategies for Snow and Ice*, Barry, R., Goodison, B. et LeDrew, E. (dir.), U.S. Department of Congress, Washington (D.C.), p. 204-240.

Slivitzky, M., (1993). « Water management: Water supply and demand the St. Lawrence River », dans *Proc. of the Great Lakes - St. Lawrence Basin Project Workshop on Adapting to the impacts of climate change and variability*, Mortsch, L., G. Koshida et D. Tavares (dir.), Québec (Qué.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 32 -34.

Slivitzky, M. et Morin, G. (1996). Impacts of climatic changes on the hydrological regime: The Moisie river case revisited, *CMOS Bulletin*, 24(4):77-81.

Smit, B. (1989b). « Likely Impacts of Climate Change on Canadian Agriculture », dans *Coping with Climate Change*, J. Topping, Jr. (dir.), Washington (D.C.), The Climate Institute, p. 197-202.

Smit, B. (dir.) (1993). *Adaptation to Climatic Variability and Change*, Report of a Task Force on Climate Adaptation, Occasional Paper No. 19, Department of Geography, Université de Guelph, Guelph (Ont.), 53 p.

Smith, J. et Lenhart, S. (1996). Climate Change Adaptation Policy Options, *Climate Research*, 6:193-201.

Smith, J. et McBean, E. (1993). « The Impact of Climate Change on Surface Water Resources », dans M. Sanderson (dir.), *The Impact of Climate Change on Water in the Grand River Basin, Ontario*, Department of Geography, Publications Series No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 25-52.

Soulis, E., Solomon, S., Lee, M. et Kouwen, N. (1994). « Changes to the distribution of monthly and annual runoff in the Mackenzie Basin using a modified square grid approach », dans Cohen, S.J. (dir.), *Mckenzie Basin impact Study, Interim Report #2, Proc. Of 6th Biennial AES/DIAND Meeting on Northern Climate and Mid Study Workshop of MBIS*, Yellowknife (T.N.-O.), 10-14 avril 1994, Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 197-209.

Soveri, J. et Ahlberg, T. (1989). Multiannual variations of groundwater level in Finland during the years 1962-1989, *Conference on Climate and Water*, Valtion Painatuskeskus, Helsinki (Finlande), 1:501-510.

Statistics Canada (1994). *Human Activity and the Environment 1994*, National Accounts and Environment Division, Statistics Canada, Ottawa (Ont.), 300 p.

Stewart, R., K. Jones et E. Wheaton (1988). « Estimating Effects of Climatic Variability and Change on Prairie Agriculture in Canada », dans *The Impact of Climate Variability and Change on the Canadian Prairies: Symposium / Workshop Proceedings*, B. Magill et F. Geddes (dir.). Alberta Department of the Environment, Edmonton (Alb.), p. 129-144.

Tate, D. (1984). Canadian Water Management: A One Armed Giant, *Revue canadienne des ressources en eau*, 9(3):1-16.

Tate, D. (1990). *Water Demand Management in Canada: A State-of-the-Art Review*, Social Science Series No. 23, Inland Waters Directorate, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 52 p.

Tate, D. (1994). The Economic Benefits of Restoring Natural Stream Channels and Watersheds, dans *'Natural' Channel Design: Perspectives and Practice*, Shrubsole, D. (dir.*)*, based on the 1st International Conference on Guidelines for Natural Channel Systems, Niagara Falls (Ont.), p. 207-215.

Tate, D. et Lacelle, D. (1992). *Municipal Water Rates in Canada, 1989: Current Practices and Prices*, Social Science Series No. 30, Water and Habitat Conservation Branch, Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 22 p.

Thomsen, R. (1990). Effect of climate variability and change in groundwater in Europe, *Nordic Hydrology*, 21(3): 185-194.

Timmerman, P. et A. Grima (1988). *Les perspectives économiques liées aux répercussions de la variabilité et du changement climatique : rapport sommaire*, *Sommaire du changement climatique SCC 88-04*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 7 p.

Timofeyeva, M. (1994). « Possible effects of climatic changes on low flows of Estonian rivers », dans *Groundwater: Drought, Pollution and Management*, C. Reeve et J. Watts (dir.), A.A. Balkema, Rotterdam (Pays-Bas), p. 131-143.

Titus, J. (1990). Strategies for Adapting to the Greenhouse Effect, *APA Journal*, été, p. 311-323.

Vaccaro, J. (1992). Sensitivity of ground water recharge estimates to climate variability and change, Columbia Plateau, Washington, *Journal of Geophysical Research*, 97(D3):2821-2833.

Vandierendonck, M. (1996). *Report to the Ontario Ministry of Natural Resources on Water Use in Ontario*, The Water Network, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.).

van der Kamp, G. et Maathuis, H. (1992). « Groundwater levels and climatic change », dans *Using Hydrometric Data to Detect and Monitor Climatic Change*, G.W. Kite et K.D. Harvey (dir.), National Hydrology Research Institute, Saskatoon (Sask.), p. 143-147.

van der Valk, A. G. et Davis, C. B. (1978). « Primary production of prairie glacial marshes », dans *Freshwater wetlands: ecological processes and management potential*, R. E. Good, D. F. Whigham et R. L. Simpson (dir.), Academic Press, New York (N.Y.), p. 21-37.

Varvus, S., Wynne, R. et Foley, J. (1996). Measuring the sensitivity of southern Wisconsin lake ice to climate variations and lake depth using a numerical model, *Limnology and Oceanography*, 41(5):822-831.

Vitousek, P. (1994). Beyond global warming: ecology and global change, *Ecology*, 75:1861-1876.

Walker, R. (1996). *Assessment of Climate Change Impacts in the Bay of Quinte, Ontario*, préparé par Beak Consultants Limited, Brampton Ontario, pour l'Environmental Adaptation Research Group, Atmospheric and Environment Service, Environnement Canada, Burlington (Ont.), p. 1-1 à 7.

Wall, G. (1990). « Socio-Economic Implications of Climate Change: Canadian Climate Impacts Program Study Results », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 69-78.

Wall, G. et M. Sanderson (dir.) (1990). *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 342 p.

Walsh, J.E. (1995). Long-term Observations for Monitoring of the Cryosphere, *Climatic Change*, 31(2-4):369-394.

Wasny, G. (1986). Household Water Expenditures in Major Metropolitan Centres in Canada: 1969-1982, *Canadian Water Resources Journal*, 11(4):33-45.

Webster, K., Newell, A., Baker, L. et Brezonik, P. (1990). Climatically induced rapid acidification of a softwater seepage lake, *Nature*, 347(6291): 374.

Werkheiser, W. et Ayers, M. (1993). « Effects on coastal aquifers », dans M. Ayers, D. Wolock, G. McCabe, L. Hay et G. Tasker (dir.), *Sensitivity of Water Resources in the Delaware River Basin to Climate Variability and Change*, U. S. Geological Survey Open-File Report, p. 53-54.

Whetton, P., Fowler, A., Haylock, M. et Pittock, A. (1993). Implications of climate change due to the enhanced greenhouse effect on floods and droughts in Australia, *Climatic Change*, 25:289-317.

Wiens, L. (1991). « Annual flow trends in prairie grassland basins », dans G. Kite et K. Harvey (dir.), *Using hydrometric data to detect and monitor climatic change*, Proc. of NHRI Workshop, National Hydrology Research Inst., Saskatoon (Sask.), p. 219-224.

Wilkinson, W. et Cooper, D. (1993). The response of idealized aquifer/river systems to climate change, *Hydrological Sciences Journal*, 38(5):379-390.

Williams, G. (1970). A note on the break-up of lakes and rivers as indicators of climate change, *Atmosphere*, 8:23-24.

Williams, G. (1971). Predicting the Date of Lake Ice Breakup, *Water Resources Research*, 7(2): 323-333.

Williams, G., R. Fautley, K. Jones, R. Stewart et E. Wheaton. (1988). « Estimating Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada », dans *The Impact of Climatic Variations on Agriculture*, M. Parry, T. Carter et N. Konijn (dir.*), Volume 1: Assessments in Cool Temperate and Cold Regions*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Pays-Bas), p. 219-379.

Williams, M., Losleben, M., Caine, N. et Greenland, D. (1997). Changes in climate and hydrochemical responses in a high-elevation catchment in the Rocky Mountains, USA, *Limnology and Oceanography*, 41(5):939-946.

Wittrock, V. et Wheaton, E. (1992). « Chapter 4: Saskatchewan water resources and global warming », dans *Saskatchewan in a warmer world:* P*reparing for the future*, Saskatchewan Research Council, SRC Publication No. E-2900-17-E-92, Saskatoon (Sask.), p. 73-92.

Wondolleck, J. (1985). The Importance of Process in Resolving Environmental Disputes, *Environmental Impact Assess. Review*, 5:341-356.

Wong, W.C. (1994). *Climate change and severe storms in North America*, rapport préparé en vertu d'un contrat avec le Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 47 p.

Woo, M. (1992). Impacts of climate variability and change on Canadian wetlands, *Canadian Water Resources Journal*, 17: 63-69.

Woo, M. K., Lewkowicz, A. G. et Rouse, W.R. (1992). Response of the Canadian permafrost environment to climatic change, *Physical Geography*, 13: 287-317.

Wright, J. (1994). Designing and Applying Conservation Easements, *APA Journal*, été, p. 380-388.

Wynne, R.H., Magnuson, J. J., Clayton, M. K., Lillesand, T. M. et Rodman, D. C. (1996). Determinants of temporal coherence in the satellite derived 1987-1994 ice breakup dates of lakes on the Laurentian Shield, *Limnology and Oceanography*, 41(5): 832-838.

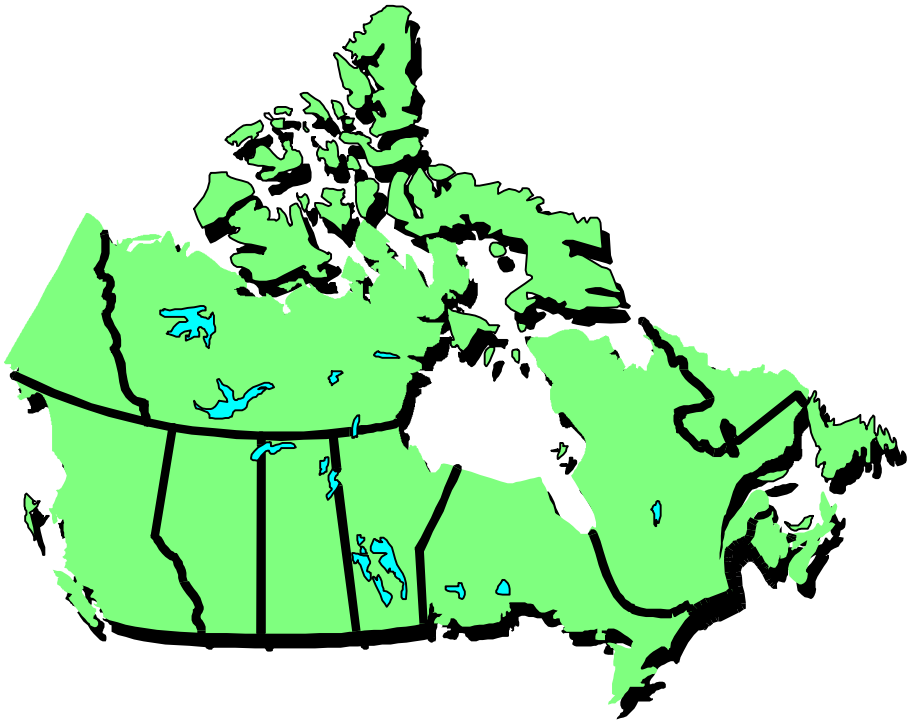
Zaltsberg, E. (1990). Potential Changes in Mean Annual Runoff from a Small Watershed in Manitoba due to Possible Climatic Changes, *Canadian Water Resources Journal*, 15(4):333-344.

Zoltai, S. (1988). « Wetland environments and classification », dans *National Wetland Working Group, Wetlands of Canada, Ecological Land Classification Series No. 24*, Montréal, Environnement Canada et Polyscience Publications Inc., p. 2-26.

# CHAPITRE DEUX

# IMPACTS DU CHANGEMENT ET DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUES SUR LES ÉCOSYSTÈMES NON AMÉNAGÉS, LA BIODIVERSITÉ ET LES ESPÈCES SAUVAGES

*John C. Anderson[1] , Ian Craine[2] , Anthony W. Diamond[3] et Roger Hansell[2]*



1. Bureau de l'évaluation et des indicateurs, Direction de l'évaluation, de la surveillance et des indicateurs, Environnement Canada, Ottawa (Ont.) K1A 0H3, téléphone : (819) 994-0460, courriel : john.c.anderson@ec.gc.ca
2. Département de Zoologie, Université de Toronto, 25 Harbour Street, Toronto (Ont.) M5S 3G5, courriel : rich@zoo.utoronto.ca
3. Atlantic Cooperative Wildlife Ecology Research Network, Université du Nouveau-Brunswick, C.P. 45111, Fredericton (N.-B.) E3B 6E1, courriel : diamond@unb.ca

## RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS EN MATIÈRE DE RECHERCHES FUTURES

**Le climat de la Terre change, et les scientifiques s'entendent pour dire que les activités humaines y sont pour quelque chose.**

Au cours du dernier siècle, la température moyenne annuelle de l'air s'est accrue d'environ 1,1 °C au Canada. Il existe toutefois des variations régionales : les températures dans certaines régions de l'ouest ont monté de 1,5 °C ou plus; comparativement, leur variation a été faible dans le Canada atlantique, et on a observé des baisses dans l'est de l'Arctique. Les études ont aussi montré que des changements dans la fréquence et/ou l'intensité des épisodes climatiques extrêmes et des événements extrêmes liés aux conditions météorologiques se sont produits au cours du dernier siècle. De tels événements, qui surviennent à des périodes sensibles de l'année, peuvent avoir des impacts écologiques plus importants à l'échelle locale et régionale que les changements prévus à partir des tendances climatiques à long terme.

**De petites variations du climat, comme une variation de un ou deux degrés de la température annuelle moyenne, peuvent avoir d'importantes répercussions sur les caractéristiques et les processus des écosystèmes non aménagés.**

- Il y aura, dans certaines régions du Canada, dégradation d'habitats dulçaquicoles des salmonidés et d'autres espèces aquatiques importantes. De 1970 à 1990, dans la région des lacs expérimentaux, près de Kenora, dans le nord-ouest de l'Ontario, la température de l'air s'est élevée d'environ 1,6 °C et les précipitations ont diminué. La durée de la saison où les lacs sont libres de glace s'est allongée de deux semaines, les lacs devenant plus chauds, et il y a eu accroissement de la profondeur des thermoclines. L'arrêt du recrutement chez le touladi dans un des lacs pourrait être attribuable à la réduction de la couche d'eau froide au fond de ce lac. On prévoit que le réchauffement de la planète aurait des répercussions sur l'habitat propice de l'omble de fontaine, de sorte que l'aire de reproduction de cette espèce se trouverait grandement réduite en raison du réchauffement des eaux souterraines.

- Le climat étant devenu plus sec, il y a eu réacidification des lacs dans les bassins riches en soufre du bouclier précambrien. Les eaux du lac Swan, près de Sudbury, en Ontario, ont vu leur pH passer de 4 en 1977, à 5,8 en 1985, en raison de la réduction des émissions des fonderies locales. Les années 1986 et 1987 ont été extrêmement sèches, ce qui a entraîné une réduction de la superficie du lac et une oxydation des composés soufrés réduits dans la zone riveraine exposée et ailleurs dans le bassin hydrographique. L'année suivante (1988) a été très humide, et l'acide sulfurique nouvellement formé a été entraîné dans le lac, ce qui a fait chuter le pH à 4,5.

- L'apparition d'un climat plus chaud et plus sec accroîtra considérablement le nombre d'incendies de forêt et de brousse et la superficie des secteurs incendiés, ce qui aura des conséquences sur les espèces sauvages. De grandes régions du Canada ont connu dans les années 80 des épisodes chauds et secs. Tandis que la superficie annuelle moyenne incendiée au Canada a été d'environ un million d'hectares dans les années 70, elle a atteint 5,0 et 5,5 millions d'hectares en 1981 et 1982, respectivement. Dans les régions où l'habitat forestier est

déjà partiellement fragmenté et comporte des îlots reliés par des corridors, les incendies peuvent briser ces liens, entraînant ainsi une fragmentation encore plus grande qui rompra les voies migratoires.

- Les changements dans le couvert nival et l'humidité du sol modifieront de façon importante la végétation arctique de la toundra. Près de Churchill, au Manitoba, à un endroit où l'installation de barrières à neige en a accru l'accumulation, on a observé des changements rapides dans la composition de la communauté végétale sur une période de 14 ans. Toutes les espèces qui préféraient l'absence de neige et des conditions très sèches ont disparu, tandis que des espèces plus tolérantes aux conditions humides se sont établies.

- L'élévation de la température de l'air devrait favoriser la croissance des végétaux. Des données satellitaires ont montré qu'il y a eu accroissement global de l'activité photosynthétique terrestre de 1981 à 1991. Au Canada, les accroissements les plus importants ont été observés dans une large bande s'étendant en direction sud-est du Yukon et de la Colombie-Britannique jusqu'aux Grands Lacs, puis en direction nord-est jusqu'au Labrador.

- Le changement climatique pourrait avoir pour conséquence une invasion d'espèces méridionales au Canada, ce qui aurait des impacts négatifs sur la biodiversité. Selon une étude sur la répartition globale du damier d'Edith, un papillon, l'aire de répartition de cette espèce se déplace vers le nord jusqu'en Colombie-Britannique; ses populations méridionales disparaissent et de nouvelles populations apparaissent à la limite nord de son aire.

- On pense que les baisses de température de l'eau de mer depuis le milieu des années 80 sont en partie responsables de la diminution de la taille selon l'âge de la morue dans la partie nord-est de la plate-forme Scotian et au large de Terre-Neuve. Les différences dans la température des eaux de fond peuvent expliquer 90% de la variance du taux de croissance de divers stocks de morues dans l'Atlantique Nord.

- Certaines colonies d'oiseaux de mer nicheurs sont menacées par l'élévation du niveau de la mer. Plus de 405 000 couples nicheurs d'oiseaux marins de 8 espèces, dont environ 400 000 couples de guillemots marmettes et les fous de Bassan de la deuxième colonie en importance de cette espèce au Canada, ne pourront plus se reproduire sur la seule île Funk au large de Terre-Neuve. Dans le cas du guillemot marmette, cela représente près de 70 % de la population du nord-est de l'Amérique du Nord.

- L'ours blanc pourrait disparaître, ne pouvant plus s'alimenter, si l'océan Arctique devient saisonnièrement libre de glace durant une trop longue période. La disparition des algues épontiques briserait la chaîne alimentaire constituée des segments algues-zooplancton et crustacés-poissons-phoques-ours blancs; et, ce qui est peut-être plus important, l'absence de glace ferait en sorte que les ours blancs ne pourraient plus chasser les phoques.

**Les écosystèmes, la biodiversité et les espèces sauvages sont tributaires du climat de diverses façons, ce qui fait qu'ils peuvent être affectés par la variabilité et le changement climatiques**. Par exemple :

- Le lien entre le climat et la répartition de la végétation en grandes zones est bien établi. La limite septentrionale des arbres est largement déterminée par des contraintes énergétiques, comme la basse température de l'air.

- Les précipitations annuelles sont communément responsables de 90 % de la variance de la production primaire dans les prairies, tandis que la température est la variable la plus déterminante du processus de décomposition.

- L'aire de répartition hivernale de la plupart des oiseaux chanteurs d'Amérique du Nord est déterminée pour la plus grande part par la distribution de l'habitat; cela considéré, la limite septentrionale de l'aire hivernale de nombreuses espèces coïncide avec les isothermes de janvier, ce qui supposent des besoins énergétiques quotidiens d'environ 2,4 fois le taux métabolique de base.

- On sait que les périodes de migration des animaux sont étroitement corrélées avec les conditions météorologiques. Par exemple, les oies des neiges quittent leurs quartiers d'hiver quand les températures s'élèvent au-dessus de 18 °C.

- La qualité actuelle de la plupart des écosystèmes du Canada comme habitats pour les espèces sauvages est autant fonction de la gestion de ces habitats par les humains (particulièrement dans le cadre de l'agriculture, des activités forestières et des pêches) que des caractéristiques naturelles de ces écosystèmes. Ainsi, les changements dans les utilisations humaines des terres et des eaux peuvent avoir autant d'influence sur la quantité et la qualité des habitats des espèces sauvages que les changements induits directement par le changement climatique.

**On a formulé plusieurs recommandations relativement aux recherches futures :**

- Les activités de surveillance et de recherche multidisciplinaires à long terme concernant les conditions et les tendances écologiques fondamentales, comme celles menées dans la région des lacs expérimentaux dans le nord-ouest de l'Ontario, sont rares au Canada, et même ailleurs dans le monde. C'est pourquoi notre connaissance de nombre de processus écologiques critiques et de comportements des écosystèmes est limitée. Les travaux de surveillance et de recherche en cours doivent être poursuivis, et on doit en entreprendre à l'échelle des écosystèmes, là où l'on n'a pas encore commencé à le faire.

- Dans le cas des océans, on doit s'efforcer de mieux comprendre les changements dans les paramètres physiques de base comme la température de l'eau, la salinité et les courants. On doit aussi recueillir davantage d'informations sur les cycles vitaux des espèces pour pouvoir mieux prévoir les impacts du changement et de la variabilité climatiques sur les poissons et autres organismes marins.

- Les interactions végétaux-herbivores et entre d'autres niveaux trophiques doivent être étudiées davantage. On sait que les insectes réagissent aux concentrations de nutriments dans les végétaux et aux niveaux des défenses chimiques de ces derniers. La plupart des études ont

montré l'existence de changements dans les ratios carbone/azote liés à l'augmentation des concentrations de $CO_2$. On doit donc s'attendre à des changements dans le comportement des insectes.

- Les recherches doivent considérer non seulement les effets écophysiologiques directs des changements dans les variables climatiques, mais aussi toute modification de ces effets causée par des processus de rétroaction édaphiques et par des interactions biologiques entre divers organismes. Bon nombre d'études concernant les impacts du changement climatique sur les écosystèmes sont limitées du fait qu'elles ne prennent pas en considération certaines de ces importantes interrelations.

- Le manque de données sur la structure de la diversité dans les populations sauvages en bonne santé, particulièrement chez les espèces qui ne sont pas exploitées commercialement, est une contrainte importante. Nous devons connaître la biodiversité existant dans nos écosystèmes avant de pouvoir évaluer les impacts que peut avoir sur elle le changement climatique.

- Bien qu'on trouve beaucoup d'informations sur les effets des *conditions météorologiques* - particulièrement des événements extrêmes - dans la littérature scientifique, on n'a pas encore tenté de rassembler ces informations disparates pour produire une évaluation des effets globaux du *climat* sur les espèces sauvages en vue de l'élaboration d'une stratégie de recherche. Si le climat détermine de façon importante bon nombre de populations, alors il est clair que les biologistes de la faune et de la flore doivent mieux connaître ses effets, ne serait-ce que pour améliorer les modèles de population actuels.

## CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PRÉSENT CHAPITRE

Ce chapitre s'inscrit dans le volume national des questions sectorielles de l'Étude pan-canadienne. On peut s'attendre à des recoupements avec plusieurs autres chapitres de ce volume (p. ex., Agriculture, Pêches, Foresterie, Ressources en eau et Milieux humides), avec certains chapitres du volume sur les questions intersectorielles (p. ex., Altération des paysages), et avec divers chapitres ou sections de chacun des volumes régionaux.

Le chapitre poursuit trois objectifs de base :

1. L'objectif principal est d'évaluer, à partir d'un examen de la littérature scientifique existante, les impacts de la variabilité et du changement climatiques sur les écosystèmes non aménagés, la biodiversité et les espèces sauvages au Canada. La tâche étant trop lourde, nous n'avons pas pu réaliser un examen complet de la littérature dans le temps dont nous disposions. Nous avons donc procédé par études de cas. La première section du chapitre porte sur les écosystèmes, la deuxième sur la biodiversité et la troisième sur les espèces sauvages; cet ordre permet une progression vers des aspects de plus en plus spécifiques.

2. Le second objectif est de présenter brièvement les réponses adaptatives potentielles des humains aux changements dans les écosystèmes, la biodiversité et les espèces sauvages causés par la variabilité et le changement climatiques.

3. Le troisième objectif est de repérer les lacunes importantes dans les connaissances ainsi que les besoins en matière de recherche. Ces lacunes et besoins se sont avérés nombreux et souvent de toute première importance. Dans la prochaine étape de l'Étude pan-canadienne, on s'efforcera de trouver des solutions à certaines de ces lacunes.

## IMPACTS SUR LES ÉCOSYSTÈMES NON AMÉNAGÉS

### *Introduction*

Le climat de la Terre change. Au cours du dernier siècle, la température annuelle moyenne de l'air s'est accrue d'environ 0,3 à 0,6 °C à l'échelle de la planète (GIEC, 1996a) et d'environ 1,1 °C au Canada (Environnement Canada, 1995). On a aussi observé des changements dans d'autres éléments climatiques clés, comme les précipitations (i*dem*). Il est important d'avoir à l'esprit que le changement climatique récent n'a pas été uniforme au Canada. Par exemple, tandis que les températures dans certaines parties de l'ouest continental ont monté de 1,5 °C ou plus au cours du dernier siècle, on a observé des changements comparativement peu importants au Canada atlantique; on a même enregistré des baisses dans certaines parties de l'est de l'Arctique au cours des 50 dernières années (*idem*). Ce qui est peut-être plus important quant aux biotes, des changements dans la fréquence et/ou l'intensité des événements extrêmes pourraient s'être produits au cours du siècle passé (Katz et Brown, 1992). Les analyses des enregistrements chronologiques dérivés de sources de données indirectes comme les anneaux de croissance des arbres, les carottes de glace et les sédiments de fond des lacs et des océans ont montré clairement l'existence de changements climatiques passés et de changements écologiques connexes. Il y a environ 1 000 ans, l'hémisphère Nord était d'environ 0,5 à 1 °C plus chaud que durant le Petit âge glaciaire subséquent, qui s'est étendu approximativement de l'an 1400 à la fin du XIX$^{e}$ siècle. Cette hausse apparemment peu importante de la température moyenne durant la période médiévale a été suffisante pour permettre aux Vikings de pratiquer l'agriculture dans le sud du Groenland. Il y a environ 4 000 à 8 000 ans, la température moyenne du globe pouvait atteindre 1 °C de plus qu'aujourd'hui. Durant la glaciation du Wisconsin du dernier âge glaciaire, alors que la température moyenne de l'air à l'échelle du globe n'était que d'environ 5 °C inférieure à celle d'aujourd'hui, une bonne partie du Canada était couverte de glace, qui a pu atteindre à certains endroits une épaisseur de trois kilomètres (Bird, 1967).

La première section examine la littérature scientifique traitant des conséquences de la variabilité et du changement climatiques pour les écosystèmes « non aménagés » (c'est-à-dire les écosystèmes qui demeurent dans un état relativement naturel, contrairement aux écosystèmes développés ou exploités à des fins agricoles ou forestières) du Canada. L'interrelation entre le climat et les écosystèmes est illustrée par le fait que la température de l'air et les précipitations déterminent en grande partie la localisation générale et l'étendue des biomes terrestres (Box, 1981; Holdridge, 1947; Woodward, 1987). On a utilisé les relations entre le climat et le biote pour élaborer des scénarios de changement écologique potentiel fondé sur le changement climatique. Par exemple, on a modélisé les changements dans la distribution des provinces écoclimatiques (grands paysages dans lesquels il y a uniformité dans la réponse écologique au climat) du Canada au moyen du scénario de changement climatique à doublement du $CO_2$ du GISS (Goddard Institute for Spatial Studies) de 1981 (Rizzo et Wiken, 1989). On a projeté des réductions substantielles des

superficies des provinces écoclimatiques arctique, subarctique et boréale, tandis que les provinces tempérées fraîches et prairiales, plus au sud, connaîtraient des expansions notables. On doit souligner que cette étude avait pour objectif d'évaluer la sensibilité des écosystèmes du Canada au changement climatique. Les résultats indiquent que la composition des communautés écologiques ne devrait pas rester la même, à moins qu'elles le fassent à l'intérieur de frontières différentes. Les espèces réagissent au changement de façon plus individuelle. Tandis que certaines continuent de survivre dans une région donnée, d'autres peuvent disparaître, et non pas nécessairement en même temps. De plus, l'aptitude des espèces à gagner de nouvelles régions est très variable, en raison de capacités de dispersion variables, par exemple. Ainsi, il est plus probable que le changement prendra la forme d'une série d'invasions et de pertes qui feront apparaître des communautés entièrement nouvelles, comme cela semble s'être produit au cours des 10 000 dernières années (Davis *et al*., 1986; Webb et Bartlein, 1992) (voir aussi la section sur la biodiversité [ Paléoécologie: climats passés et réponses des écosystèmes] et la section sur les espèces sauvages [Impacts de la variabilité et du changement climatiques sur les espèces sauvages]du présent chapitre).

Au cours de la dernière décennie, on a réalisé de nombreuses études sur les répercussions du *changement climatique futur* pour les écosystèmes du Canada ou leurs composantes. Bien que le présent examen expose certains des résultats généraux de ces études, il met l'accent sur les études qui traitent de la manière dont les *changements climatiques récents* peuvent déjà causer des changements écologiques au Canada. La plupart de ces études traitent d'un seul biome terrestre (forêt, prairie, toundra) ou d'un seul système aquatique (système dulçaquicole ou marin), mais quelques-unes touchent à plusieurs biomes. La section se termine avec un bref examen des stratégies humaines d'adaptation et une présentation des lacunes importantes dans les connaissances.

### *Impacts du changement climatique sur les écosystèmes canadiens*

Toundra arctique

Parmi tous les écosystèmes du Canada, ceux de l'Arctique pourraient être les plus altérés, étant donné que c'est aux hautes latitudes que le réchauffement devrait être le plus marqué (Maxwell et Barrie, 1989; Roots, 1989) et que les conditions environnementales y sont proches des limites pour les organismes vivants (Danks, 1992). Les plantes de l'Arctique se sont adaptées à des conditions difficiles : basses températures, rayonnement solaire réduit et courte saison de croissance. En outre, la productivité de la toundra est souvent principalement limitée par l'eau et les nutriments. Le stress hydrique peut ne pas être très important dans les communautés humides du Bas-Arctique, mais il le devient dans les régions sèches, plus répandues dans le Haut-Arctique.

Chapin *et al*. (1992a) ont fait le bilan des effets possibles d'un accroissement des concentrations de $CO_2$ et du réchauffement climatique sur la toundra arctique (particulièrement dans le Bas-Arctique). Ces auteurs pensent que les possibilités d'accroissement de la photosynthèse et de la croissance liées à l'accroissement des concentrations de $CO_2$ et de la température seront limitées par un manque de nutriments. Il pourrait toutefois y avoir accroissement de la disponibilité des nutriments si la température du sol monte. Il y aurait alors intensification de la

décomposition, non seulement directement, mais aussi indirectement, par accroissement de la profondeur du dégel saisonnier, du drainage et de l'aération. Tout accroissement résultant de la disponibilité des nutriments entraînerait une accélération de la croissance végétale. Dans l'éventualité d'un réchauffement climatique, la saison de croissance s'allongerait probablement, à moins que les chutes de neige ne s'accroissent au point d'entraîner un allongement correspondant de la période de fonte. La nébulosité et les précipitations pourraient augmenter, mais cette augmentation est moins certaine que celle de la température de l'air dont l'élévation favoriserait l'évapotranspiration, ce qui aurait des conséquences variables selon l'humidité disponible aux divers sites.

Les changements de l'humidité du sol résultant du changement climatique pourraient être particulièrement cruciaux pour les écosystèmes de toundra de l'Arctique, particulièrement ceux qui sont actuellement très secs (lande sèche) ou très humides (p. ex., toundra humide parsemée de buttes de gazon). On en a pour preuve une expérience qui a porté sur les conséquences d'un accroissement de l'accumulation de neige pour la végétation de la toundra (Scott et Rouse, 1995). Près de Churchill, au Manitoba, on a installé une clôture à neige double sur la toundra de lande sèche à lichens durant l'été de 1978, clôture qui piégeait la neige balayée. L'anneau intérieur avait 8 mètres de diamètre, et l'anneau extérieur, 13 mètres. L'épaisseur et la densité de la neige ont été surveillées durant l'hiver 1978-1979, et on a pris des mesures de l'humidité et de la température du sol l'été suivant tant à l'intérieur qu'au-delà des clôtures. On a réalisé un relevé de la végétation en août 1981 à l'intérieur des clôtures à neige et à un site témoin à environ 50 mètres à l'est. Les clôtures de 1,3 mètre de haut piégeaient la neige au point que la clôture intérieure était habituellement enfouie, la neige passant par-dessus pour couvrir la toundra du côté sud vers lequel soufflait le vent. Pour comparaison, la profondeur maximale de la neige durant l'hiver 1978-1979 sur la toundra adjacente au-delà de la zone d'influence des clôtures n'était en moyenne que de 0,05 mètre. Durant l'hiver, les températures du sol étaient considérablement plus élevées sous l'épaisse couche de neige à l'intérieur de l'enclos que dans la toundra des alentours. Durant l'été, le sol dans l'enclos était beaucoup plus humide et un peu plus frais. Durant la période de l'étude, qui s'est terminée en 1992, les températures de l'air et les précipitations moyennes à Churchill étaient semblables aux moyennes à long terme. Un nouveau relevé de la végétation réalisé en 1992 a montré que toutes les espèces qui préfèrent l'absence de neige et des conditions très sèches (p. ex., les lichens *Cladina stellaris*, *Cetraria nivalis* et *C. cucullata* et le rhododendron de Laponie, un arbuste) avaient disparu, tandis que les espèces tolérant mieux les conditions humides (p. ex., la busserole alpine et l'airelle des marécages) se sont établies. On en conclut donc que l'augmentation des chutes de neige hivernales aurait un effet marqué sur les communautés végétales, et que des étés plus humides accéléreraient probablement les changements dans la végétation.

Si le changement climatique dans le Bas-Arctique a pour principaux effets un réchauffement et un assèchement des sols ainsi qu'une multiplication des incendies, la végétation changera probablement pour renfermer davantage d'arbustes et moins de *Sphaignes*, et à long terme davantage d'arbres. Dans le Haut-Arctique, on devrait s'attendre à l'apparition d'un couvert végétal plus étendu et à une invasion de petits arbustes (dans la mesure où les conditions du sol le permettent, évidemment). Ce changement dans le couvert végétal induirait une réponse différente au changement climatique, rendant les prévisions du changement écologique à long terme encore

plus difficiles. Par exemple, la nouvelle végétation pourrait répondre davantage à l'accroissement du $CO_2$ atmosphérique et de la température de l'air. Elle produirait aussi plus d'ombre au sol, ce qui freinerait le réchauffement du sol. Des changements dans le couvert végétal modifieraient la communauté d'herbivores, les herbivores dominants étant remplacés dans certaines régions. Certains processus de rétroaction pourraient modifier le climat. Les changements dans le taux de décomposition et la productivité modifieront le flux de $CO_2$ vers l'atmosphère. La toundra arctique a été un puits net de dioxyde de carbone dans les temps géologiques passés et récents, mais elle pourrait devenir une source nette. Certaines données nous portent à croire que c'est déjà le cas dans le versant nord de l'Alaska (Oechel *et al.*, 1993). Des changements dans les émissions de méthane sont aussi possibles. Le réchauffement de sols humides faiblement drainés pourrait accroître les émissions, tandis que l'assèchement des sols pourrait avoir l'effet contraire (Chapin *et al.*, 1992a).

Écosystèmes alpins non arctiques

Un accroissement d'altitude de 500 m correspond à une baisse approximative de 3 °C de la température de l'air en raison du gradient adiabatique (MacArthur, 1972). Le réchauffement climatique en terrain montagneux devrait favoriser une migration des espèces vers le haut des pentes, dans la mesure où il n'y a pas de facteurs défavorables, comme une accumulation de neige accrue en hiver ou de mauvaises conditions édaphiques. Dans le sud des Rocheuses canadiennes, les limites des arbres semblent avoir été plus hautes du XIV$^{e}$ au XVII$^{e}$ siècles qu'aujourd'hui, et étaient peut-être aussi plus hautes il y a environ 1 000 ans en raison de conditions climatiques plus favorables (Luckman, 1994). Ces dernières années, des accroissements dans le recrutement de semis d'arbres à la limite des arbres ou au-dessus ont été observés dans plusieurs pays, dont le Canada (Graumlich, 1994). Par exemple, Kearney (1982) a repéré deux périodes récentes (du milieu des années 40 au milieu des années 50, et de la fin des années 60 au début des années 70) d'établissement majeur de semis à la limite forestière à trois sites du parc national Jasper, en Alberta. Une analyse des données climatiques a révélé l'existence d'un lien significatif entre les températures minimums estivales supérieures à la moyenne et l'établissement de semis. Kearney a indiqué que la relation réelle était probablement plus complexe en ceci qu'elle ferait intervenir des facteurs additionnels comme la longueur de la période sans neige et les conditions thermiques au moment de la germination.

Les espèces ont moins d'espace à coloniser aux altitudes supérieures, et les espèces endémiques des sommets pourraient disparaître. On sait qu'il s'est produit des extinctions causées par les déplacements des zones de végétation vers le haut de 1 000 à 1 500 m depuis le dernier maximum glaciaire en Amérique Centrale et en Amérique du Sud (Flenley, 1979, cité dans GIEC, 1996b).

Forêts

Les forêts sont un élément clé dans le bilan du carbone. À l'échelle de la planète, elles renferment environ 80 % de tout le carbone organique terrestre qui se trouve au-dessus du sol, et environ 40 % de celui qui se trouve dans le sol (Dixon *et al.*, 1994). La grande longévité de la plupart des arbres fait que les forêts répondent lentement au changement climatique. La migration des arbres nécessite le déplacement des semences vers de nouveaux lieux, l'établissement des semis, la

croissance des individus jusqu'à la maturité sexuelle (ce qui peut prendre des décennies), et la production de nouvelles semences. Pour qu'il y ait migration, ce cycle doit se répéter. De nombreux autres facteurs peuvent entraver la migration, comme l'absence des pollinisateurs nécessaires, des conditions climatiques défavorables pour la production de semences ou l'établissement des semis, et l'interférence de forts compétiteurs. Même si tout se passe bien, bon nombre d'espèces peuvent ne pas arriver à migrer au même rythme que le changement climatique. Avec un réchauffement de 0,1 à 0,35 °C/décennie, par exemple, les espèces devraient migrer vers le pôle à une vitesse de 1,5 à 5,5 km/an (ou, dans les régions montagneuses, à une vitesse de 1,5 à 5,5 m/an vers les sommets). Les estimations des taux de migration naturelle des arbres sont bien inférieures, allant de 40 à 500 m/an (Solomon *et al.*, 1984). Les incendies de forêt sont un facteur qu'on ne doit pas négliger quand on considère le taux de réponse des forêts au changement climatique. Ils peuvent jouer un rôle clé en détruisant la végétation qui n'est plus adaptée aux nouvelles conditions climatiques, ce qui permet l'invasion d'espèces mieux adaptées (Wein et Hogg, 1990). L'apparition de conditions plus chaudes et plus sèches augmenterait la fréquence et l'étendue des incendies. À partir des scénarios de changement climatique impliquant un doublement du $CO_2$, on a estimé, par exemple, qu'il y aurait doublement de la superficie de forêt brûlée chaque année dans le bassin du Mackenzie, au Canada (Kadonaga, 1997).

Forêt boréale

Les forêts boréales pourraient être les plus affectées de toutes les forêts du monde, en raison du grand changement de température attendu sous les hautes latitudes. En plus d'être tributaire des conditions édaphiques, la limite septentrionale des arbres est largement déterminée par des facteurs d'ordre énergétique, comme la température de l'air et le rayonnement net (Bryson, 1966; Hare et Ritchie, 1972; Koppen, 1936), et on dispose de données paléoécologiques abondantes montrant qu'il y a eu déplacements de la limite des arbres en fonction du climat depuis la dernière glaciation (Macdonald *et al.*, 1993; Payette *et al.*, 1989a; Ritchie et Hare, 1971). Dans l'éventualité d'un réchauffement du climat, il est probable qu'on assiste à des déplacements de la limite des arbres vers le nord et vers les sommets des montagnes et/ou à des accroissements du taux de croissance des arbres. La limite septentrionale de l'aire de répartition de l'épinette blanche peut être utilisée comme indicateur de la position de la limite des arbres étant donné que les deux coïncident habituellement (Danks, 1992). D'Arrigo et Jacoby (1993) ont observé que des semis d'épinette blanche apparaissent plus au nord et à des altitudes plus élevées dans l'ouest du Canada et en Alaska, ce qui laisse penser que cette espèce, et donc la limite des arbres, est en train de migrer.

Bien que les changements dans la température de l'air aient des effets importants sur la forêt boréale septentrionale, les changements dans le bilan hydrique pourraient être le facteur climatique le plus critique pour la forêt boréale méridionale. Hogg (1994) a entrepris une étude sur les relations entre le climat et la végétation dans les régions boréales et la forêt-parc des provinces des Prairies (Alberta, Saskatchewan et Manitoba). Il a pris en considération certains paramètres climatiques, soit des paramètres thermiques (p. ex., température annuelle moyenne, température moyenne de juillet, degrés-jours de croissance) et l'humidité (les indices d'humidité mensuels). Pour la limite méridionale de la forêt boréale, la plus forte relation était avec un indice d'humidité calculé en soustrayant l'évapotranspiration potentielle des précipitations. Ainsi, il semble que le

manque d'humidité seul, ou des fréquences d'incendies supérieures découlant du climat aride, ont été le facteur limitant la croissance des conifères à la limite méridionale de la forêt boréale.

En fait, les répercussions des incendies doivent être considérées non seulement dans la partie méridionale de la forêt boréale, mais dans toute la zone boréale, les incendies régissant la succession végétale dans la forêt boréale (Hall, 1995). Les épisodes chauds et secs qui ont caractérisé les années 80 dans de grandes parties du Canada ont contribué à un accroissement marqué du nombre d'incendies et de la superficie brûlée[1]. Tandis que la moyenne mobile sur 10 ans de la superficie brûlée au Canada a été d'environ un million d'hectares dans les années 70, elle a atteint 5,0 et 5,5 millions d'hectares en 1981 et 1982, respectivement[2] (Wein *et al*, 1994). Dans la région des lacs expérimentaux, près de Kenora, dans le nord-ouest de l'Ontario, il n'y a eu aucun incendie majeur durant plus de cent ans, avant le début des activités de surveillance et de recherche environnementales autour de 1970. Puis, en moins d'une décennie, de longues sécheresses ont entraîné des incendies qui ont brûlé d'importants secteurs de la région en 1974 et 1980 (Schindler *et al.*, 1996a). Par ailleurs, certaines données montrent qu'il y a réduction de la fréquence des incendies de forêt dans au moins une partie du sud de la zone boréale du Québec (Bergeron et Archambault, 1993). Des séries chronologiques sur les incendies et les anneaux de croissance couvrant 300 ans, recueillies dans la région du lac Duparquet (environ 30 km au nord-ouest de Noranda), témoignent de cette réduction, qui aurait débuté il y a environ 100 ans. Cette réduction s'expliquerait par une raréfaction des sécheresses attribuable à des changements dans la circulation atmosphérique, migration du front polaire vers le nord favorisant le développement plus fréquent de masses d'air chaudes et humides (*idem*).

Prairies

Les variables climatiques liées au bilan hydrique et à la disponibilité de l'eau sont de la plus grande importance pour la détermination de la distribution (Stephenson, 1990, cité dans GIEC, 1996b) et de la production (Sala *et al.*, 1988, cité dans GIEC, 1996b) des prairies. Ainsi, la quantité et le moment de survenue des précipitations sont cruciaux. Les précipitations annuelles sont communément responsables de 90 % de la variance de la production primaire dans les prairies (*idem*), tandis que la température est la variable qui détermine le plus la décomposition (Burke *et al.*, 1989, cité dans GIEC, 1996b). Les incendies et les herbivores sont parmi les facteurs qui causent la réjuvénilisation des prairies en enlevant de la biomasse aérienne et en favorisant le flux de nutriments.

[1] On doit aussi considérer des facteurs autres que le climat quand on examine les tendances des statistiques sur les incendies de forêt. Pour qu'il y ait incendie, il faut non seulement des conditions météorologiques appropriées, mais aussi du combustible et une source d'inflammation. Dans au moins certaines régions, les activités de lutte contre les incendies dans les dernières décennies peuvent avoir eu pour effet une accumulation de quantités de combustible exceptionnellement élevées. L'accroissement de la population humaine combiné à une accessibilité et une utilisation accrues de la forêt ont augmenté les probabilités d'incendie.

[2] Il s'agit de statistiques nationales. La zone de forêt boréale est si étendue au Canada que la probabilité que la région entière connaisse une forte incidence d'incendies liés aux conditions météorologiques dans la même année est faible. Par exemple, il y a eu relativement peu d'incendies en 1981 et 1982 dans une large bande du centre du Québec (Payette *et al.*, 1989b).

## Milieux humides

### Dulçaquicoles

Le changement climatique influera sur les milieux humides le plus notablement par l'induction de changements dans leurs régimes hydrologiques. Il pourra s'agir de changements dans l'apport en eau (les précipitations) ou de pertes d'eau (p. ex., par évapotranspiration). Sous les hautes latitudes, il pourrait aussi y avoir des changements hydrologiques causés par la dégradation du pergélisol. Il existe divers types de milieux humides (les bogs, les fens, les marécages et les marais), et les conditions hydrologiques de ces types varient considérablement de l'un à l'autre. Ainsi, bien qu'il soit possible d'établir certains des impacts du changement climatique sur un type particulier de milieu humide, il est difficile de généraliser pour l'ensemble. Par exemple, Poiani et Johnson (1993) ont modélisé les effets d'un changement climatique potentiel sur l'hydrologie et la végétation de milieux humides des prairies semi-permanents dans le Dakota du Nord. Ce type de milieu humide peut connaître successivement différents types de couvert, selon les conditions d'humidité. Ils ont utilisé la projection de changement climatique GISS85 et dix autres simulations de sensibilité comportant des changements de température de +2 et +4 °C, et des changements dans les précipitations allant de -20 à +20 %. Avec le scénario GISS et neuf des dix simulations de sensibilité, le couvert du milieu humide, au départ constitué à peu près à parts égales d'une végétation émergente et d'eau libre, devenait un bassin fermé sans eau libre. Les milieux humides des prairies dans les grandes plaines du nord constituent la plus importante aire de reproduction pour la sauvagine en Amérique du Nord, et des études ont montré que ces milieux humides sont le plus favorables à la reproduction de la sauvagine quand ils comportent à peu près autant d'eau libre que de végétation émergente (*idem*). Ainsi, les résultats du scénario GISS et des simulations de sensibilité utilisés dans cette étude sont de mauvais augure pour ce qui est de la qualité de l'habitat de la sauvagine dans les Prairies.

Par suite d'un abaissement de la nappe phréatique, un milieu humide qui était d'abord un puits de $CO_2$ peut devenir une source de ce gaz. Par exemple, les bogs sont typiquement couverts de tourbe qui s'accumule et est formée à partir de la biomasse partiellement dégradée qui se trouve dans le milieu anaérobie gorgé d'eau de ces milieux humides. L'abaissement de la nappe phréatique arrêtera la formation de tourbe, et favorisera aussi une décomposition aérobie rapide de la tourbe présente, ce qui entraînera la libération de $CO_2$. Le méthane piégé dans la tourbe gorgée d'eau serait aussi libéré dans l'atmosphère, ce qui ajouterait à l'émission de gaz à effet de serre (Brown, sous presse).

### Côtiers

En moyenne autour du globe, le niveau de la mer s'est élevé d'environ 10 à 25 cm au cours du dernier siècle, et une bonne part de cette élévation pourrait être due au réchauffement climatique (GIEC, 1996a). Certaines côtes canadiennes, notamment les rives des baies d'Hudson et James, continuent de se relever par suite de la réduction du couvert de glace de l'ère glaciaire (relèvement isostatique); cependant, d'autres côtes, comme celles de la Colombie-Britannique, du Yukon et d'une bonne partie du Canada atlantique, s'affaissent. Dans les zones d'affaissement, le maintien des milieux humides côtiers dépendra de leur capacité de s'étendre vers l'intérieur

suffisamment rapidement pour compenser les pertes dues à l'inondation. L'existence de barrières anthropiques à une telle expansion, en plus de certaines contraintes naturelles, sont préoccupantes. En Colombie-Britannique, par exemple, il faudrait enlever des digues le long de la Squamish, de la Nanaimo et du Fraser pour empêcher la perte de milieux humides (Beckmann *et al.*, 1997).

Au nombre des conséquences qu'aurait l'élévation du niveau de la mer pour la flore des milieux humides touchés, on pourrait compter des changements dans la distribution spatiale des espèces végétales, une prolifération des espèces halophiles aux dépens des espèces dulçaquicoles, et une réduction nette de la diversité des espèces au bord antérieur des milieux humides (Latham *et al.*, 1991). Ces effets se répercuteront sur bon nombre d'oiseaux et d'autres animaux qui, dans les milieux humides, ont besoin d'une végétation spécifique (voir la section sur la faune du présent chapitre pour plus d'informations).

Lacs et rivières

La majorité des lacs et rivières du Canada sont couverts de glace durant l'hiver. Au nombre des effets écologiques de la couverture glacielle des lacs, on compte l'atténuation du rayonnement solaire, la réduction de la turbulence et du mélange des eaux et une déplétion de l'oxygène qui peut entraîner la mort de poissons. Depuis environ 1960, la saison d'englacement des lacs est moins longue à plusieurs endroits en raison de l'élévation des températures hivernales et printanières dans de nombreuses régions du pays (Environnement Canada, 1995). En Nouvelle-Écosse, cependant, où il y a eu un certain refroidissement des hivers dans les dernières décennies, la saison durant laquelle les rivières sont couvertes de glace s'est allongée d'environ trois semaines, du moins dans certaines régions depuis les années 50 (Clair *et al*, 1997).

Les recherches menées depuis environ 1970 dans la région des lacs expérimentaux ont permis d'obtenir des informations importantes sur la réponse des lacs et des rivières au réchauffement climatique (Schindler *et al.*, 1996a; Schindler *et al.*, 1990). De 1970 à 1990, les températures de l'air ont monté d'environ 1,6 °C et les précipitations ont diminué. Des incendies de forêt ont brûlé des parties des bassins de recherche en 1974 et 1980, comme on l'a mentionné plus haut. À partir de ces événements, on a pu obtenir une bonne compréhension de certains des changements observés dans les écosystèmes aquatiques. Par exemple, avec la hausse des températures, la saison où les lacs étaient libres de glace s'est allongée d'environ deux semaines et, durant cette saison, les lacs sont devenus plus chauds et les thermoclines plus profondes. Le ruissellement a chuté de plus de 50 %, et certains cours d'eau auparavant permanents sont devenus éphémères. La réduction du ruissellement a réduit l'apport de nombreux constituants chimiques dans les lacs. Par exemple, le transport de silice dissoute et de carbone organique dissous de la terre ferme vers l'eau a chuté de plus de 50 %. Le transport d'azote et de phosphore a aussi chuté globalement, bien que des hausses aient eu lieu durant quelques années après les incendies. La réduction des apports de nombreuses substances et l'allongement des temps de résidence de l'eau ont rendu les lacs plus clairs. L'alcalinité de l'eau des lacs s'est accrue, vu l'augmentation du rapport entre les cations basiques et les anions des bases fortes. On a observé un léger accroissement de la biomasse de phytoplancton et de la biodiversité, mais la production primaire n'a pas varié. Les températures de l'eau plus élevées et les thermoclines plus basses constituent une menace pour

certaines espèces comme le touladi, qui vit en eau froide. L'arrêt du recrutement chez le touladi dans un des lacs pourrait avoir été lié à un tel changement dans son habitat. En somme, on pense que ces événements donnent une idée de la manière dont le changement climatique peut agir sur les lacs et les bassins versants boréaux au cours du prochain siècle (Schindler *et al.*, 1990).

Dans le Bouclier précambrien du centre de l'Ontario, les recherches montrent que la sécheresse peut entraîner une remobilisation de l'acide dans l'eau des lacs. Près de Sudbury, en Ontario, de nombreux lacs qui avaient été acidifiés par le dépôt atmosphérique d'émissions industrielles de $SO_2$ ont commencé à montrer des signes d'amélioration au début des années 80 en raison de la réduction des émissions des fonderies locales. Les mesures prises dans un de ces lacs, le lac Swan, ont montré que le pH avait chuté à seulement 3,97 en 1977, pour ensuite connaître une hausse considérable jusqu'à 5,8 en 1985 (Yan *et al.*, 1996). Les années 1986 et 1987 ont été extrêmement sèches, entraînant une réduction de 18 % de la surface du lac, ce qui a fait que de vastes secteurs riverains ont été exposés à l'air. Il s'en est suivi une oxydation des composés sulfurés réduits dans la zone exposée et ailleurs dans le bassin hydrographique. L'année suivante, 1988, a été extrêmement humide, et le sulfate a été entraîné dans le lac, dont le pH a chuté à 4,5. Ce n'était pas un cas isolé; on a en effet observé des situations similaires dans divers autres lacs de la région (Dillon et LaZerte, 1992; McNicol et Mallory, 1994). Comme les scénarios de changement climatique prévoient que les sols devraient tendre à être moins humides dans l'intérieur du continent, le changement climatique pourrait avoir notamment pour conséquence une réacidification des lacs dans les bassins riches en soufre du Bouclier précambrien.

Tandis qu'on recueille dans le sud du Canada des données climatologiques depuis généralement un siècle ou plus, on ne les recueille dans l'archipel Arctique du Canada que depuis seulement 50 ans; on doit donc pour cette dernière région explorer les sources de données indirectes pour étudier le changement climatique. Dans le cadre d'une étude, on a analysé les diatomées dans des échantillons de carottes de sédiments prélevés dans trois étangs du cap Herschel, dans le centre-est de l'île d'Ellesmere, étant donné que, si le climat s'améliore un tant soit peu, cela devrait avoir un effet très marqué sur les groupements de diatomées (Douglas *et al.*, 1994). Les analyses ont montré que, bien que les groupements aient été relativement stables durant des milliers d'années, des changements exceptionnels ont commencé à se produire au XIX$^{e}$ siècle. Selon ces auteurs, ce serait le changement climatique qui expliquerait le mieux ces changements, plutôt que l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique ou le transport à grande distance des polluants. Il ne suffit que d'un léger réchauffement dans cet environnement froid pour allonger de façon significative la saison de croissance et permettre l'apparition observée de communautés de diatomées plus diverses et plus complexes. Le fait que des changements similaires dans les groupements de diatomées n'aient pas été observés dans des lacs voisins profonds couverts de glace vient appuyer cette argumentation.

Océans

Le changement climatique peut entraîner des modifications de diverses caractéristiques des océans, dont la température de l'eau, sa salinité, le niveau des mers, la couverture glacielle et la circulation océanique. Les poissons, les crustacés et les mollusques réagissent directement aux changements dans la température de l'eau; plus l'eau est chaude, plus leur taux de croissance est

élevé. Par exemple, les variations de la température des eaux du fond marin peuvent expliquer 90 % de la variance du taux de croissance de différents stocks de morues dans l'Atlantique Nord (Brander, 1995, cité dans Drinkwater, 1997). De plus, les variations interannuelles de la température peuvent agir sur les taux de croissance des poissons d'un même stock. Les températures plus basses de l'eau de mer depuis le milieu des années 80 sont considérées comme la cause d'au moins la moitié du déclin récent de la taille selon l'âge de la morue dans le nord-est de la plate-forme Scotian (Campana *et al.*, 1995, cité dans Drinkwater, 1997) et au large de Terre-Neuve (de Cárdenas, 1996, cité dans Drinkwater, 1997). La dépendance du taux de croissance à la température de l'eau a aussi été observée chez plusieurs autres espèces dans le nord-ouest de l'Atlantique, et à divers stades de développement, notamment au stade larvaire. Des études de laboratoire ont montré que cette dépendance est liée au moins en partie à des changements dans les taux d'alimentation, lesquels diminuent quand la température de l'eau sort de la plage normale de tolérance (McKenzie, 1934 et 1938, cité dans Drinkwater, 1997).

La température de l'eau, avec l'abondance de nourriture et la présence d'aires de reproduction propices, détermine largement la distribution des poissons, des crustacés et des mollusques, la plupart des espèces ou des stocks ayant une plage de températures préférée. Par suite du réchauffement observé dans le golfe du Maine dans les années 40, il y a eu déplacement vers le nord de plusieurs espèces, dont le maquereau et le homard américain (Taylor *et al.*, 1957, cités dans Drinkwater, 1997). Le capelan, qu'on trouve communément au large du Labrador et de Terre-Neuve, s'est étendu vers le sud jusqu'à la baie de Fundy quand les températures ont baissé dans les années 60, mais est remonté vers le nord avec le réchauffement des années 70. Avec le refroidissement le plus récent, depuis la fin des années 80, le capelan est retourné vers l'est et le sud (Frank *et al.*, 1996, cités dans Drinkwater, 1997). Au nombre des autres espèces qui se sont étendues vers le sud à l'occasion de ce dernier refroidissement, on compte la morue polaire (Lilly *et al.*, 1994, cités dans Drinkwater, 1997) et la morue franche (Young et Rose, 1993, cités dans Drinkwater, 1997).

La survie et la croissance du hareng du Pacifique sont sensibles aux fluctuations naturelles du climat océanique et la température de l'océan les touche directement, et aussi indirectement en altérant l'abondance de ses prédateurs, principalement celle du merlu du Pacifique. Il y a alternance de périodes chaudes et de périodes froides dans les eaux du large de la côte ouest de l'île de Vancouver. Les périodes chaudes depuis 1976 ont été intensifiées par de forts épisodes El Niño. Durant ces périodes chaudes, les taux de survie et de croissance des jeunes harengs sont faibles en raison de l'abondance de merlus du Pacifique et de la température élevée de l'eau, fréquemment associée aux phénomènes El Niño. Un autre facteur vient réduire le taux de survie des jeunes harengs durant les forts événements El Niño, soit la migration vers le nord, jusque dans les eaux de la Colombie-Britannique, de maquereaux qui se nourrissent de harengs, de saumons et d'autres espèces durant l'été. Il en résulte un déclin de la biomasse de reproducteurs du stock de harengs de la côte ouest de l'île de Vancouver, étant donné que beaucoup moins de jeunes atteignent la maturité sexuelle. Inversement, les taux de survie et de croissance sont relativement élevés quand la biomasse estivale de merlu est faible et que la température annuelle de l'eau est basse, soit autour de 10 °C (Environnement Canada, 1994).

Certaines migrations du poisson sont fonction de certains seuils ou plages de température. Par exemple, le maquereau qui hiverne dans le Middle Atlantic Bight n'atteint la côte de la Nouvelle-Écosse ou le golfe du Saint-Laurent que lorsque la température de l'eau dépasse 7 ou 8°C (Sette, 1950, cité dans Drinkwater, 1997). Le long des côtes du Labrador et de Terre-Neuve, le saumon atlantique arrive et se répartit en fonction de la zone où l'eau atteint 4°C (Narayanan *et al.*, 1995, cités dans Drinkwater, 1997). Sur la côte ouest, le saumon du Pacifique qui se rend frayer dans le Fraser emprunte deux grandes voies migratoires. Quand les eaux de surface sont plus chaudes, comme durant un épisode El Niño, le saumon passe par l'extrémité nord de l'île de Vancouver pour se rendre sur la côte de la Colombie-Britannique. Quand les eaux sont plus froides, il passe plus au sud (Groot et Quinn, 1987).

La disparition d'une partie de la glace de mer dans l'Arctique nuirait à certaines espèces qui comptent sur la glace pour se déplacer (p. ex., le caribou de Peary) et chasser (p. ex., l'ours blanc), ou pour d'autres activités liées au cycle vital (p. ex., accouplement et mise bas chez certaines espèces de phoque). À l'autre bout de la chaîne alimentaire, la perte de glace de mer entraînerait un déclin de l'abondance des algues épontiques, lesquelles constituent une source alimentaire pour divers amphipodes (Rose et Hurst, 1992). (Voir la sous-section « Réseaux alimentaires marins de l'Arctique » dans la section sur la biodiversité du présent chapitre.)

Études plus générales

Croissance végétale

Étant donné qu'il y a eu un accroissement du $CO_2$ atmosphérique de près de 30% depuis le début de l'ère industrielle, on pourrait s'attendre à ce qu'il y ait eu accroissement de la croissance végétale dans les conditions naturelles (fertilisation par le $CO_2$). Pour s'en convaincre, on a notamment analysé les anneaux de croissance des arbres. Au moins 20 études de ce genre ont montré l'existence d'accroissements du taux de croissance d'arbres de régions alpines et boréales d'Amérique du Nord et d'Europe par rapport aux taux de croissance d'avant 1850 (Innes, 1991). L'élévation des concentrations de $CO_2$ et des températures de l'air sont deux des causes possibles des accroissements des taux de croissance observés. D'Arrigo et Jacoby (1993) ont examiné les anneaux de croissance des arbres dans trois secteurs proches de leur limite septentrionale en Amérique du Nord. Les sites se trouvaient près de Norman Wells, dans les Territoires du Nord-Ouest, de Churchill, au Manitoba, et de Bettles, en Alaska. Ces auteurs ont observé un accroissement récent de la croissance des arbres, mais il est possible que celui-ci soit entièrement attribuable aux changements dans la température de l'air et dans les précipitations. Il n'y avait aucune tendance résiduelle de quelque importance qui aurait nécessité une explication par d'autres facteurs. Les spécimens de l'Alaska ont aussi montré une plus grande sensibilité aux précipitations depuis environ 1970, ce qui pourrait témoigner d'un stress hydrique accru lié à des conditions plus chaudes (Jacoby et D'Arrigo, 1995).

Une hausse modérée de la température de l'air devrait accroître la croissance végétale dans la plupart des régions, en raison de l'allongement de la période de croissance. De fait, l'analyse de données radiométriques satellitaires a montré l'existence d'un accroissement global de l'activité photosynthétique terrestre de 1981 à 1991 (Myneni *et al.*, 1997). Les résultats suggèrent qu'il y a

eu augmentation de la croissance végétale due à l'allongement de la période de croissance. Les plus forts accroissements de l'activité photosynthétique se sont produits dans la zone de latitude 45-75° N, où l'on estime que la saison de croissance s'est allongée d'environ 12 jours, dont les deux tiers venaient s'ajouter au printemps. Au Canada, les plus forts accroissements de l'activité photosynthétique se sont produits dans une large bande s'étendant du Yukon et de la Colombie-Britannique vers le sud-est jusqu'aux Grands Lacs, puis vers le nord-est jusqu'au Labrador. Des valeurs particulièrement élevées ont été mesurées dans l'ouest et le nord de la partie continentale du pays, ce qui coïncide avec les tendances observées de la température de l'air (printemps plus chauds, particulièrement) et du couvert nival (fonte plus hâtive).

### Phénologie

La phénologie est l'étude de la chronologie saisonnière des stades de la vie végétale et animale (Ratchke et Lacey, 1985, cités dans Beaubien, 1993). Certains aspects de la phénologie des plantes, comme le débourrage et l'apparition des premières feuilles, peuvent servir d'indicateurs biotiques sensibles et observables du changement climatique, étant donné que la température est le facteur le plus important dans la phénologie du développement printanier des végétaux dans la zone tempérée de la planète (Beaubien, 1993). Beaubien (1997) a examiné un enregistrement de 60 ans des dates de la première floraison de trois espèces, le peuplier faux-tremble, l'amélanchier à feuilles d'aulne et le cerisier de Virginie à Edmonton, en Alberta. Globalement, la moyenne annuelle des dates de première floraison pour les trois espèces a avancé (floraison plus hâtive) de huit jours de 1936 à 1996, ce qui coïncide avec les tendances de la température de l'air.

Dans le cadre du programme « Plantwatch », des étudiants et des adultes bénévoles observent et signalent les dates de première floraison et de pleine floraison des espèces végétales. Actuellement, on suit dans le cadre de ce programme les dates de floraison de huit espèces végétales, dont le lilas commun pourpre (dans le monde entier) et sept autres espèces en Amérique du Nord (Beaubien, 1997).

Certaines caractéristiques climatiques, comme la température moyenne et la durée moyenne de l'été, peuvent influer sur le cycle vital de certains insectes de l'Arctique, faisant de ces derniers de bons indicateurs du changement climatique. Au nombre des indicateurs phénologiques entomologiques possibles, on compte la date de début de l'émergence saisonnière et le nombre de générations par année ou d'années par génération (Danks, 1992).

### Pergélisol

Quand la chaleur dégagée par la surface du sol dans les mois froids de l'année excède la chaleur emmagasinée dans les mois chauds, et que la température du sol demeure sous zéro durant au moins deux hivers consécutifs et l'été qui les sépare, il peut y avoir formation de pergélisol, ou sol gelé en permanence. Les conditions climatiques existant au Canada ont fait en sorte qu'il y a du pergélisol sur environ la moitié de la surface terrestre du pays (Ressources naturelles Canada, 1995). Dans la partie méridionale de la zone de pergélisol, ce dernier est réparti en îlots. Si l'on se déplace vers le nord, il devient plus commun (« discontinu »), pour ensuite devenir continu. Il est aussi plus épais sous les hautes latitudes : quelques décimètres seulement dans sa partie

méridionale et plus de 700 mètres dans les îles de l'Arctique. L'eau présente dans le sol gelé en permanence se transforme en glace, tant que son point de congélation n'est pas trop abaissé par la présence de substances dissoutes. Dans les cas extrêmes (habituellement dans les sols de texture fine à fortes teneurs en argile et en limon ou en matières organiques), la glace peut constituer jusqu'à 50 ou 70 % des deux ou trois premiers mètres du sol gelé. Le pergélisol à teneur en glace, de moyenne à forte, est particulièrement courant dans la vallée du Mackenzie et dans les terres adjacentes, de même que dans les îles Banks et Victoria, dans l'ouest de l'archipel arctique (*idem*). Des études ont aussi montré l'existence de pergélisol riche en glace dans le nord du Québec (Allard *et al.*, 1993).

C'est sur ces terrains riches en glace que le réchauffement aurait les conséquences écologiques les plus importantes, la fonte de ce type de sol entraînant au minimum un affaissement du terrain. Cela pourrait entraîner des changements dans la nappe phréatique, des altérations de la végétation, et même la formation de milieux humides et d'étangs peu profonds. Sur les pentes, la dégradation du pergélisol riche en glace pourrait rendre le terrain instable et ainsi entraîner des déplacements massifs de sol, notamment des glissements de terrain. Vitt *et al.* (1994) ont analysé par photos aériennes des terrains couverts de bogs dans la zone de pergélisol discontinu du Manitoba, de la Saskatchewan et de l'Alberta à l'est des Rocheuses. Ils ont pu classer les bogs en cinq types de physiographie de surface. Dans le sud, la plupart des bogs ne renfermaient pas d'éléments internes organisés, ce qui indique qu'ils n'ont jamais eu de pergélisol. Dans les régions les plus septentrionales, le type dominant de bog comportait un plateau de tourbe et beaucoup de pergélisol. Entre les deux, le type dominant de bog comportait une « pelouse » interne - une zone ouverte et humide dominée par des plantes des genres *Sphaigne* et *Carex* et entourée par une zone boisée légèrement plus haute. Selon les auteurs, ces pelouses étaient des zones où du pergélisol riche en glace était présent dans le passé, mais se serait dégradé, probablement par suite du réchauffement climatique après le Petit âge glaciaire, qui s'est terminé vers 1850.

***Méthodes et options d'adaptation des humains***

Le climat change actuellement et, quel que soit le scénario en matière d'émissions anthropiques futures de GES, il continuera de le faire dans l'avenir prévisible (GIEC, 1996a). Ainsi, il semble inévitable qu'on assistera à certains changements écologiques induits par le climat. Toutefois, des incertitudes fondamentales font qu'il est difficile de savoir comment les humains peuvent s'adapter à ces changements. D'un côté, nous ne savons vraiment pas très bien comment les écosystèmes non aménagés répondront au changement climatique, particulièrement si l'ampleur de ce changement correspond aux projections actuelles les plus alarmistes. Dans la section « Impacts sur la biodiversité », on affirme que « les communautés biologiques formées en réponse aux changements climatiques passés n'ont souvent pas d'analogue parmi les groupements d'espèces actuels », même s'il y a des cas où « il existe aujourd'hui des environnements similaires dans des régions climatiques similaires. » Selon notre connaissance des changements écologiques passés, il n'est pas garanti que la structure et les processus des communautés écologiques futures demeureront les mêmes.

Il existe une autre incertitude, liée aux conséquences de la réponse humaine potentielle au changement dans les écosystèmes *aménagés*. Dans la section « Impacts sur les espèces

sauvages », on souligne que «les changements dans l'utilisation des terres et de l'eau peuvent avoir au moins autant d'influence sur la quantité et la qualité des habitats des espèces sauvages que les changements induits directement par le changement climatique ». Considérons par exemple le cas des milieux humides. On estime que, depuis 1800, le septième des milieux humides du Canada a été converti ou détruit au profit de l'agriculture, de l'urbanisation, des activités récréatives et d'autres utilisations anthropiques (Gouvernement du Canada, 1991; Soil Conservation Society of America, 1987). Le changement climatique peut susciter certaines réponses dans divers secteurs, dont l'agriculture, qui pourraient avoir des impacts négatifs sur les milieux humides, à moins que des mesures soient prises pour contrer ces réponses. La nature de ces réponses et leur impact net sur les milieux humides sont cependant difficiles à prévoir.

S'adapter à quoi est l'une des questions qui se posent quand on considère la problématique de l'adaptation humaine au changement dans les écosystèmes non aménagés. On sait que les humains ont la capacité de s'adapter. Ils s'adapteront au besoin et dans la mesure du possible. Les incertitudes mentionnées ci-dessus font qu'il est très important d'être proactifs dans nos efforts pour minimiser les effets négatifs sur les écosystèmes attribuables non seulement au changement climatique, mais aussi à divers stress anthropiques, comme l'acidification et le transport à grande distance des substances toxiques.

***Lacunes dans nos connaissances***

Les prévisions actuelles des variables climatiques fondamentales, comme la température de l'air et les précipitations, issues des MCG sont considérées comme *non fiables à l'échelle régionale* (c.-à-d. que leur résolution spatiale est de centaines, et non pas de dizaines, de kilomètres). Certains problèmes théoriques et pratiques importants (p. ex., comment rendre la physique des nuages; besoin d'ordinateurs plus puissants) doivent être résolus pour pouvoir faire des prévisions à échelle plus fine à partir des MCG, prévisions qui permettront aux scientifiques d'établir de façon plus sûre les impacts du changement climatique pour des écosystèmes spécifiques à l'échelle régionale.

Nous ne pouvons pas non plus prévoir de façon fiable la fréquence et l'amplitude des événements climatiques et hydrologiques *extrêmes* comme les vagues de chaleur, les périodes de froid, les grosses tempêtes, les vents forts, les sécheresse et les inondations. Ces événements, qui se produisent à des moments particuliers de l'année, peuvent causer des changements écologiques plus importants à l'échelle locale ou régionale que bon nombre des changements attendus dans le cadre de tendances climatiques à long terme. Par exemple, les effets d'une seule grosse tempête sur les écosystèmes côtiers peuvent dépasser ceux d'une élévation du niveau de la mer induite par le climat et s'étalant sur quelques décennies. Nous avons grand besoin d'améliorer notre connaissance des événements météorologiques extrêmes.

Les activités de surveillance et de recherche multidisciplinaires à long terme relatives aux conditions et aux tendances écologiques fondamentales, comme celles qui ont été menées dans la région des lacs expérimentaux, sont rares au Canada, et même ailleurs dans le monde. Les activités en cours doivent être poursuivies et on doit les étendre aux écosystèmes peu ou pas représentés pour répondre aux nombreuses questions en suspens sur le sort des écosystèmes

canadiens et les causes des processus qui s'y déroulent. Le Réseau de surveillance et d'évaluation écologiques, coordonné par le Bureau de coordination de surveillance écologique d'Environnement Canada, s'efforce de répondre à ces questions (Environnement Canada, non daté). Dans le cadre de cette initiative, on doit repérer et surveiller des indicateurs clés. Par exemple, on pourrait surveiller une série de bioindicateurs qui intègrent la phénologie des végétaux et celle d'autres organismes (Beaubien, 1993).

Dans le cas des océans, nous avons besoin de mieux connaître les changements dans les paramètres physiques de base, comme la température de l'eau, sa salinité et les courants océaniques (Beckmann *et al.*, 1997). Considérons, par exemple, notre compréhension actuelle de la dynamique de la circulation dans l'Atlantique Nord et de son rôle dans le changement et la variabilité climatiques. Sy *et al.* (1997) ont signalé que le déplacement des masses d'eau froide dans l'Atlantique Nord depuis leur source dans la mer du Labrador se réalise à un taux de trois à quatre fois supérieur au taux estimé antérieurement, ce qui a des conséquences particulières sur la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord. Les recherches futures pourraient de fait apporter de nouveaux résultats inattendus de cette sorte. Nous devons aussi approfondir notre connaissance des cycles vitaux des organismes vivants pour mieux prévoir les impacts du changement et de la variabilité climatiques sur les poissons et autres organismes marins (Drinkwater, 1997).

Au chapitre des études expérimentales sur les effets des concentrations élevées de $CO_2$ sur les écosystèmes, on effectue des expériences sur l'échange de $CO_2$ utilisant des chambres fermées ou ouvertes, ou encore des expériences à l'air libre. Dans ces dernières, la végétation est exposée au $CO_2$ sans être enfermée dans quelque type de chambre que ce soit. Dans les écosystèmes à végétation basse, comme les prairies et la toundra, on peut avoir à étendre les expériences sur dix ans ou plus pour détecter certaines des réponses importantes. Des expériences encore plus longues sont nécessaires pour l'étude de la réponse des forêts aux niveaux élevés de $CO_2$ (Pitelka, 1994).

Les interactions plantes-herbivores et entre organismes d'autres niveaux trophiques doivent être étudiées davantage. On sait que les insectes répondent aux concentrations de nutriments dans les végétaux et aux niveaux de défenses chimiques. La plupart des études ont révélé l'existence de changements dans les ratios carbone/azote (C/N) par suite d'une augmentation des concentrations de $CO_2$; on doit donc s'attendre à des changements dans le comportement des insectes. Aussi, la plupart des études n'ont porté que sur les insectes qui mâchent les feuilles, ignorant les insectes suceurs qui consomment davantage de matière végétale (Pitelka, 1994).

Nous devons accroître notre connaissance des mécanismes qui régulent les cycles biogéochimiques et la productivité biologique. À titre d'exemple, on doit mieux connaître les interactions biotiques et les processus de rétroaction (p. ex., les rétroactions végétaux/sols, et herbivores/plantes) dans la toundra. Les liens entre la photosynthèse et la croissance dans l'Arctique doivent être davantage étudiés, particulièrement en ce qui concerne les mousses et les lichens (Chapin *et al.*, 1992a).

Les travaux de recherche doivent considérer non seulement les effets écophysiologiques directs des changements dans les variables climatiques, mais aussi toutes les modifications de ces effets attribuables aux rétroactions des sols et aux interactions biologiques entre les différents organismes. Bon nombre d'études des impacts du changement climatique sur les écosystèmes sont limitées du fait qu'elles ne prennent pas en considération certaines de ces importantes interrelations.

## IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ

### *Introduction*

Objectifs

Cette section a pour objectifs de montrer comment la biodiversité au Canada peut être affectée par le changement climatique planétaire et de présenter des cas où elle a déjà pu subir des changements.

La biodiversité est une réalité complexe qui est à la fois tributaire et source des changements climatiques. Notre compréhension scientifique de la biodiversité et de la manière dont elle se maintient est encore embryonnaire (Wilson, 1992). À cause du réseau complexe d'interactions qui relie les espèces, les écosystèmes et le climat, il est souvent impossible d'isoler la relation directe de cause à effet entre le changement climatique et la biodiversité. En conséquence, on examine les principales voies par lesquelles les processus et les caractéristiques biologiques liés à la biodiversité peuvent être touchés par le changement climatique. Par ailleurs, les réponses biologiques au changement climatique passé détectées dans les enregistrements paléoécologiques seront examinées à titre d'indice des impacts potentiels futurs.

Définition de la biodiversité

Les bases conceptuelles de la biodiversité ont été élaborées vers la fin des années 80. La biodiversité désigne la variété des formes vivantes et leur abondance dans les communautés biologiques et est une caractéristique des systèmes biologiques à tous les niveaux d'organisation (Noss, 1990a). Il y a variation parmi les gènes, les espèces, les populations, les communautés, les écosystèmes et les paysages (Reid et Miller, 1989; Wilson, 1992; Solbrig, 1991).

Ces concepts ont été formalisés dans la définition de la biodiversité adoptée à la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED), ou Sommet de la Terre, qui a eu lieu à Rio de Janeiro en 1992. L'article 2 de la Convention sur la diversité biologique (PNUE, 1992) définit la diversité biologique, ou biodiversité, comme suit :

> *Variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes.*

Comprendre la biodiversité ne consiste pas seulement à énumérer la variété des organismes vivants dans le temps. Il faut aussi connaître les structures et les processus qui maintiennent cette diversité (Noss, 1990a).

La prise en considération de multiples niveaux d'organisation biologique peut rendre difficile d'évaluer la biodiversité, parce que la diversité à un niveau n'implique pas nécessairement un même niveau de diversité à un autre niveau (Franklin, 1993; Angermeier, 1994). Parfois, la préservation de la biodiversité à une échelle spatiale, temporelle ou organisationnelle donnée peut entrer en conflit avec sa préservation à une autre échelle. Par exemple, la diversité des espèces est souvent le mieux maintenue en présence de conditions de perturbation intermédiaire (Huston, 1979: Connell, 1978). Toutefois, la migration et la dispersion associées à cette perturbation peuvent entraîner un mélange des génotypes dans le paysage et la disparition de génotypes coadaptés permettant l'adaptation à des conditions locales, ce qui aurait pour effet de réduire la diversité génétique de l'espèce considérée (Hobbs et Huenneke, 1992).

***Paléoécologie : climats et réponses des écosystèmes dans le passé***

Les enregistrements paléoécologiques révèlent toute la gamme des réponses climatiques passées dans des régions particulières aux changements dans le climat de la planète (Dansgaard *et al.*, 1993; Dorale *et al.*, 1992). Le lien entre le climat et la répartition des zones de végétation régionales est bien établi (COHMAP, membres du, 1988). Par exemple, les données paléobotaniques ont montré des changements de la position de la limite des arbres durant l'Holocène (10 000 ans avant le présent), qu'on croit être le reflet de variations climatiques liées à la forme et à la position de la zone frontale arctique (MacDonald *et al.*, 1993; Moser et MacDonald, 1990; Ritchie, 1987).

L'évolution de la biodiversité au Canada durant les périodes passées de changement climatique, particulièrement durant l'Holocène, peut nous fournir des indices sur les types de changements auxquels on peut s'attendre en fonction des prévisions actuelles concernant le changement climatique (Liu, 1990; Huntley et Webb, 1989; Payette *et al.*, 1989a; Ritchie, 1985, 1987). La rapidité du changement climatique et le temps de réponse des écosystèmes aux conditions changeantes présentent un intérêt particulier. Vu le peu d'espace dont nous disposons, nous ne donnons ici qu'un bref aperçu de certains des principaux résultats présentés dans la littérature paléoécologique.

Deux thèmes se dégagent de la littérature traitant de paléoécologie et de carottes de glace :

1. Le changement climatique peut se produire beaucoup plus rapidement qu'on le pensait autrefois. Les données paléoclimatiques issues des carottes de glace et des sédiments ont révélé que le système climatique peut passer rapidement d'un régime donné à un autre, significativement différent. On a documenté la variabilité du climat sur des décennies et des siècles durant l'Holocène (Hoffert et Covey, 1992), accompagnée de changements brusques du climat (Taylor *et al.*, 1993; Dansgaard *et al.*, 1989; Flohn, 1987; Cook et Mayes, 1987). Même de subtils changements dans la température ou les précipitations moyennes du globe peuvent donner lieu à des modifications abruptes et à grande échelle des régimes de perturbation

caractéristiques de régions particulières (Woodmansee, 1988). Ainsi, au moins certaines régions du Canada connaîtront probablement des changements climatiques abrupts qui altéreront les régimes normaux de perturbation au pays et qui créeront des niveaux de perturbation suffisants pour détruire les communautés existantes et permettre une invasion rapide d'espèces du sud (Clark, 1991; Campbell et McAndrews, 1993). Cependant, cette possibilité d'une invasion rapide ne veut pas nécessairement dire qu'il y aura établissement rapide de nouveaux types de communautés stables. Il pourrait arriver que la biodiversité ne puisse s'ajuster aussi rapidement que le voudraient les forces économiques et sociales. Par exemple, il faudra attendre au moins des siècles pour que la biodiversité des forêts atteigne un équilibre avec les nouvelles conditions climatiques (MacDonald *et al.*, 1993; Pellat et Mathewes, 1994; Ritchie, 1987; Davis, 1981). Ainsi, selon l'expérience passée, nous devons nous attendre à ce qu'il s'écoule beaucoup de temps avant que n'existent de nouvelles communautés biologiques stables adaptées au nouveau climat.

2. Deuxièmement, les communautés biologiques formées en réponse aux changements climatiques passés n'ont souvent pas d'analogue parmi les groupements d'espèces d'aujourd'hui (Davis, 1981; Anderson *et al.*, 1989). Par exemple, l'étude de Bennett (1990) sur les réponses biotiques au changement climatique dû aux fluctuations périodiques de l'orbite de la Terre (cycles de Milankovitch) montre que les communautés terrestres et dulçaquicoles actuelles n'ont pas une longue histoire, et que chaque espèce a réagi individuellement au changement climatique et aux autres changements environnementaux liés au changement climatique planétaire. Ritchie (1987) est arrivé à une conclusion similaire dans ses études sur l'évolution des communautés forestières d'Amérique du Nord après le dernier âge glaciaire. En analysant le pollen dans des carottes de sédiments, il a découvert des communautés d'arbres vieilles de 9 000 à 3 000 ans qui n'ont pas d'analogue moderne, et ce malgré le fait qu'il existe aujourd'hui des milieux similaires dans des régions climatiques aussi similaires. La découverte de communautés végétales passées sans analogue moderne rend plus difficile la prévision des réponses spécifiques des écosystèmes au réchauffement planétaire prévu (Liu, 1990; Anderson *et al.*, 1989).

### *Réponses de la biodiversité*

Les menaces qui pèsent sur la biodiversité au Canada seront examinées à chacun des trois niveaux d'organisation biologique où on la rencontre; on examinera ainsi la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité des écosystèmes. Quand on le pourra, on traitera des effets tant directs qu'indirects du changement climatique sur la biodiversité. En raison du manque d'espace, nous nous limiterons à l'examen de seulement quelques exemples représentatifs.

Les effets directs du changement climatique sur la biodiversité comprennent les réponses immédiates ou retardées à des facteurs comme la température, les précipitations, l'ensoleillement et la fréquence et l'intensité des tempêtes (McAllister et Dalton, 1992). Ces effets peuvent se faire sentir à toutes les échelles spatiales et temporelles et dans les trois niveaux d'organisation biologique (Peters et Lovejoy, 1992).

Les effets indirects sont ceux qui se produisent par l'entremise d'autres interactions biologiques. En conséquence, ils peuvent toucher l'ensemble des processus écologiques et se traduire par des altérations de la disponibilité des ressources et par des changements dans les aptitudes à la compétition, les taux de dispersion, la prédation, les maladies, la structure des communautés, etc. (McAllister et Dalton, 1992). Par exemple, dans les forêts, les dommages physiologiques subis par les arbres du fait de la sécheresse peuvent rendre les arbres plus sensibles aux attaques des insectes et accroître les possibilités d'incendie, ce qui se solderait par des changements dans la structure des communautés (examiné dans Klein et Perkins, 1988).

Diversité génétique

Par diversité génétique, on entend ici la diversité de l'information génétique à l'intérieur d'une population (Noss, 1990a; Solbrig, 1991). La diversité génétique actuelle est le résultat de processus évolutionnaires qui se sont déroulés sur des milliers de générations; ainsi, elle ne peut être immédiatement rétablie, même par introduction d'espèces exotiques ou au moyen de procédés artificiels de reproduction (Angermeier, 1994).

L'ampleur et la nature de la diversité génétique existante est critique parce que, ultimement, ce sont les gènes qui sont la source des nouvelles variations qui permettent l'adaptation des espèces, et éventuellement des écosystèmes, aux altérations du climat et des conditions environnementales. Le degré de diversité génétique d'une population est également important dans le présent et l'avenir rapproché, en ceci qu'il détermine directement la capacité de reproduction et la résistance aux maladies (Lande, 1988).

La diversité génétique peut être mesurée de bien des manières, notamment par la mesure de la diversité au niveau des produits primaires de l'ADN (enzymes) ou au niveau de l'ADN, lui-même par l'examen des polymorphismes de longueur des fragments de restriction, des polymorphismes d'ADN générés par des amorces de composition arbitraire, ou des microsatellites (Giles, 1994).

On sait relativement peu de choses de l'ampleur naturelle de la diversité génétique dans les populations sauvages du Canada, particulièrement en ce qui concerne les invertébrés du sol et les plantes avasculaires, dont bon nombre n'ont pas encore été nommés (Biodiversity Science Assessment Team, 1994). Même en ce qui concerne les espèces qui sont bien étudiées, comme les mammifères, les oiseaux et les plantes vasculaires, ce n'est que depuis peu qu'on en connaît la diversité génétique. En raison des efforts et des coûts importants liés à la mesure de la diversité génétique des populations sauvages, on tend à limiter les études génétiques aux espèces qui font déjà l'objet de mesures de conservation, comme le béluga (Smith, 1990), ou aux espèces exploitées commercialement, comme les salmonidés (Grewe et Hebert, 1988).

On effectue de plus en plus d'études sur la diversité génétique des populations sauvages du Canada, notamment en ce qui concerne la petite oie des neiges (Quinn et Cooke, 1987), le lemming à collerette dans l'Arctique (Borowik et Engstrom, 1993), les crustacés de l'Arctique (Hebert et Hann, 1986), le carouge à épaulettes (Gibbs *et al.*, 1990) et le campagnol des champs (Plante *et al.*, 1989).

Les conséquences du changement climatique sur la diversité génétique seront examinées sous l'angle de son influence sur des conditions et des processus reconnus pour créer et maintenir la diversité génétique, comme l'altération, la fragmentation des habitats, et l'invasion d'espèces et de génotypes étrangers.

### Altération des habitats

La hausse des températures entraînera une réduction de certaines formes d'habitats, notamment par la diminution du volume d'eau froide dans les lacs et de la superficie des zones alpines. La perte d'habitats peut se solder par une perte de diversité génétique en raison de la disparition de génotypes localement adaptés, particulièrement dans le cas des espèces qui ont une faible capacité de migration. Par exemple, l'étude de la plante herbacée vivace *Polygonum viviparum* a révélé que les populations du Haut-Arctique, du Bas-Arctique et des régions alpines n'ont pas de génotypes en commun (Bauret, 1996). Les populations alpines renferment une moins grande diversité génétique, probablement parce qu'elles ne peuvent pas migrer d'un pic à l'autre, les habitats non propices séparant les pics ne le lui permettant pas. On peut s'attendre à ce que la diversité génétique des populations de montagnes de cette espèce se perde avec le refoulement de son habitat vers les sommets et vu l'incapacité des propagules de gagner des habitats propices vers le nord. De même, la migration des génotypes du Bas-Arctique vers le Haut-Arctique entraînera probablement la disparition de gènes localement coadaptés (Bauret, 1996).

### Fragmentation de l'habitat

Le changement climatique peut fragmenter les habitats de bien des façons. Par exemple, l'accroissement de l'intensité et de la fréquence des orages qui devrait accompagner le changement climatique au Canada pourrait faire augmenter l'intensité et la fréquence des incendies causés par la foudre (Johnson et Larsen, 1991). Là où l'habitat est déjà partiellement fragmenté, avec des îlots reliés par des corridors, les incendies pourraient détruire ces corridors, d'où une fragmentation accrue et une destruction conséquente des voies migratoires. L'accroissement des inondations (Knox, 1993) pourrait créer des habitats isolés entourés de vasières inondées. La sécheresse pourrait assécher les étangs des milieux humides des prairies, réduisant les îlots d'habitat fréquentés par la sauvagine (Poiani et Johnson, 1993).

La fragmentation de l'habitat peut se solder par une réduction du flux de gènes dans le paysage, ainsi que par des déclins des populations dans les îlots restants (Saunders *et al.*, 1991; Fahrig et Merriam, 1994). Ces deux facteurs peuvent contribuer à diminuer la diversité génétique à l'intérieur d'une population donnée en réduisant la taille de la population effective et en favorisant la disparition d'allèles rares à cause de la dérive génétique et de l'extinction des populations locales (Hartl, 1988). Même si les îlots d'habitat qui ont perdu leurs populations sont recolonisés, l'effet net demeurera une réduction de la diversité génétique globale (McCauley, 1991).

### Invasions d'espèces et de génotypes nouveaux

Les invasions biologiques ont déjà contribué substantiellement à la réduction de la diversité génétique et à l'extinction d'espèces dans le monde (Vitousek *et al.*, 1996). L'introduction

d'espèces exotiques touche le patrimoine génétique indigène soit directement par introgression (flux génique), soit indirectement par des réductions de la taille de la population effective, ce qui rend les populations indigènes vulnérables aux effets de l'autofécondation et de la dérive génétique.

Au Canada, certaines espèces indigènes ont déjà subi les effets néfastes d'invasions d'espèces ou de génotypes exotiques (Billington et Hebert, 1991). Dans le secteur des pêches, l'achigan à grande bouche de Floride (Philipp, 1991) et presque tous les salmonidés indigènes (Krueger et May, 1991) ont subi les conséquences génétiques négatives de l'introduction d'espèces exotiques. Dans le cas des salmonidés, les espèces exotiques qui ont été introduites (p. ex., l'omble de fontaine) se sont hybridées avec les espèces indigènes, ce qui a donné lieu à la contamination des patrimoines génétiques de ces dernières.

Diversité des espèces

Par diversité des espèces, on entend la variété des divers types d'organismes présents dans une région donnée. On a montré que le degré de diversité des espèces dans une région donnée joue un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes, la résistance aux invasions et le rétablissement après une perturbation (Tilman, 1996; Richardson et Cowling, 1993; Naeem *et al.*, 1994, 1996; Lodge, 1993). La diversité des espèces est aussi importante pour la société canadienne car c'est la source d'une bonne partie de notre alimentation (p. ex., les poissons marins et les fruits de mer) et elle est au cœur de certaines de nos activités récréatives.

Cette diversité est tributaire d'une grande variété de processus écologiques et environnementaux, dont la taille de l'habitat (MacArthur et Wilson, 1967), les régimes de perturbation (Hobbs et Huenneke, 1992), l'hétérogénéité de l'habitat (Franklin, 1993), les invasions passées (Lodge, 1993), et le taux d'évapotranspiration (Currie, 1991). Il est impossible dans ce court chapitre d'exposer en détail tous les impacts directs et indirects du changement climatique sur la diversité des espèces au Canada. Il existe des examens exhaustifs portant sur le maintien de la biodiversité (Ricklefs et Schluter, 1993) et sur la façon dont cette dernière peut être menacée par les changements environnementaux (Barker et Tingey, 1992; Chapin *et al*, 1992b).

Au Canada, on trouve actuellement une grande diversité d'espèces dans des habitats comme la forêt pluviale côtière tempérée, les fens et d'autres milieux humides riches, les estuaires, les vieilles forêts et des îlots d'habitat relique (p. ex., l'escarpement du Niagara) (Biodiversity Science Assessment Team, 1994). Cependant, on connaît encore mal la totalité de la biodiversité au Canada. Même dans le cas des écosystèmes majeurs (p. ex., la forêt boréale, les prairies), on l'a peu évaluée, particulièrement en ce qui a trait aux groupes très divers d'organismes, comme les arthropodes.

Nous traiterons des dangers que fait peser le changement climatique sur la diversité des espèces en examinant quelques-uns des facteurs qui peuvent toucher directement ou indirectement les conditions et processus reconnus pour la créer et la maintenir.

### Altération des habitats

Le changement climatique peut entraîner directement la perte d'habitats en modifiant, par exemple, les niveaux des eaux, le couvert forestier, le couvert nival et les températures de l'eau dans les lacs et les cours d'eau. La diminution de la taille des habitats accroît les risques d'extinction des populations (Pimm *et al.*, 1993, 1995). On peut donner deux exemples dans lesquels le changement climatique a pour conséquence directe une réduction de l'habitat : celui d'un poisson d'eau douce adapté à l'eau froide (Regier et Meisner, 1990) et celui des habitats de montagnes (Harte et Shaw, 1995; MacDonald et Brown, 1992).

L'omble de fontaine préfère en été les eaux courantes dont la température se situe entre 12 et 18 °C (Meisner, 1990a). Les projections relatives à l'habitat propice qui serait disponible après un réchauffement climatique montrent que son aire de reproduction au Canada sera grandement réduite en raison du réchauffement des eaux souterraines (*idem*, 1990b). Bien que la hausse des températures hivernales doive l'avantager, il verra sa population décliner en raison d'une réduction du taux d'éclosion des œufs causée par la diminution des concentrations d'oxygène dissous dans ses frayères plus chaudes (Meisner, 1990a). Les autres salmonidés auront aussi à faire face à cette situation (Regier *et al.*, 1990).

Les îlots d'habitats naturels des sommets dans les zones alpines sont particulièrement susceptibles d'être réduits, puisque le réchauffement climatique a pour effet de déplacer leurs frontières vers le haut. MacDonald et Brown (1992) ont mis au point un modèle exprimant le taux de disparition des mammifères dans les habitats alpestres en fonction de la taille de l'habitat. Ce modèle prévoit qu'une hausse de 3 °C aurait pour effet une perte d'espèces variant de 9 à 62 % sur chaque sommet de montagne.

La migration des zones climatiques vers le nord pourrait faire en sorte que les réserves et les parcs actuels ne soient plus que des îlots d'habitat. On pourrait y assister à une perte d'espèces, en raison de la taille et de l'isolement de ces îlots (Malcolm et Markham, 1996), et aussi de la réduction des habitats propices (Singh et Wheaton, 1991), étant donné que, dans les poches protégées, on ne trouverait plus les conditions climatiques nécessaires à la préservation des espèces visées (Myers, 1993).

### Invasions d'espèces

Depuis l'arrivée des Européens, il y a eu régulièrement des invasions d'espèces au Canada, qui ont entraîné le déclin ou la disparition de nombreuses espèces indigènes (Crossman, 1991). On s'attend à ce que des espèces méridionales envahissent le Canada par suite de conditions climatiques favorables s'avançant vers le nord. Les conséquences de ces invasions sur la diversité des espèces indigènes sont difficiles à prévoir. De façon générale, les invasions d'espèces se sont révélées l'une des plus grandes menaces pour la biodiversité du globe (Vitousek *et al.*, 1996), et on doit s'attendre à ce qu'il en résulte certaines pertes au Canada.

On dispose actuellement de peu d'indices concluants qui montrent que les aires de répartition de certaines espèces s'étendent vers le nord à l'intérieur du Canada à cause du seul changement

climatique. La plupart des études se concentrent sur le déplacement de sous-populations individuelles et ne prennent pas en considération le déplacement de l'ensemble de l'aire de répartition des espèces. Cependant, Parmesan (1996) a examiné les changements dans la distribution totale du damier d'Edith et a conclu que cette espèce se déplace vers le nord jusqu'en Colombie-Britannique, alors que les populations méridionales disparaissent et que de nouvelles populations apparaissent à la limite septentrionale de son aire.

Staniforth et Scott (1991) ont étudié l'invasion d'espèces de « mauvaises herbes » du sud dans la zone subarctique autour de Churchill, au Manitoba. Le nombre d'espèces et leur présence dans la région se sont accrus au cours des 30 dernières années. Sur les 106 espèces de mauvaises herbes introduites identifiées, 28 % ont persisté dans la région par propagation végétative ou apport de graines. La plupart de ces plantes se trouvaient dans des habitats, perturbés par les activités humaines, situés autour de la ville, particulièrement dans les décharges. Ces plantes ne se sont pas établies dans les lieux naturels, mais ces auteurs ont prévu que d'autres mauvaises herbes présentes au sud viendront s'établir dans les lieux naturels au fur et à mesure que le climat se réchauffera.

Changements dans le couvert nival et d'autres paramètres environnementaux

La diversité des espèces dans une région se développe dans le cadre d'un régime climatique bien défini (Larsen, 1971). Des changements dans l'une ou l'autre des variables environnementales propres au régime climatique pourraient très bien altérer la diversité des espèces. La neige est une variable environnementale importante, qui détermine l'abondance de nombreuses espèces dans l'Arctique et les zones boréales au Canada (Walsh, 1987).

On s'attend à ce que le changement climatique accroisse les chutes de neige de façon importante dans la région boréale (CCC92 - modèle de 2$^{e}$ génération du Centre canadien de modélisation et d'analyse climatiques). Cela aura des impacts importants sur bon nombre d'espèces. Par exemple, de nombreux auteurs ont démontré l'importance du couvert nival pour la composition des communautés végétales de l'Arctique (Schaefer et Messier, 1995; Scott et Rouse, 1995; Walker *et al.*, 1993). Scott et Rouse (1995) ont expérimentalement altéré l'épaisseur du couvert nival dans une région haute de la toundra en installant des clôtures à neige sur des parcelles expérimentales. Ils ont observé un changement rapide dans la composition des communautés végétales par suite de l'augmentation du couvert nival, particulièrement quand cette augmentation était accompagnée par des pluies accrues en été.

Diversité des écosystèmes

Les écosystèmes sont des systèmes ouverts non linéaires qui ne sont pas à l'équilibre et qui peuvent avoir des comportements surprenants (Woodley *et al.*, 1993). Depuis peu, on s'entend de plus en plus pour reconnaître l'importance de faire du maintien de la diversité des écosystèmes un objectif en matière de préservation de la biodiversité (Schmidt, 1996), particulièrement parce que les processus des écosystèmes régulent les flux d'énergie et de matières dans les paysages dont dépend la diversité des espèces (Pickett et Cadenasso, 1995).

Il y a des processus de rétroaction entre les écosystèmes et les espèces qu'ils renferment, et on sait de plus en plus que le fonctionnement des écosystèmes dépend de la diversité d'espèces qu'on y trouve (Tilman, 1996; Tilman et Downing, 1994; Wedin et Tilman, 1996). Par exemple, les écosystèmes dans lesquels on peut observer une fluctuation des contributions individuelles des espèces à la biomasse nette ont montré de plus faibles variations interannuelles de la productivité (Tilman, 1996). Tilman a aussi trouvé que la variabilité des réponses des espèces aux fluctuations de l'environnement assure une stabilité au niveau de l'écosystème, mais non pas au niveau des espèces. Ainsi, la préservation de la diversité des écosystèmes semble liée à la préservation de la diversité des espèces.

Les réponses des écosystèmes au changement climatique sont probablement les plus difficiles à déterminer, du fait qu'elles font intervenir de grandes échelles temporelles et spatiales et une dynamique complexe. En plus des altérations directes du paysage et de l'écosystème, les changements dans la diversité au niveau des gènes et des espèces induits par le changement climatique peuvent aussi entraîner des changements dans le comportement émergent des niveaux d'organisation supérieurs (SCOPE, 1996). Cette complexité indique que les réponses des écosystèmes ne peuvent jamais être prévisibles; on doit donc s'attendre à des « surprises » et planifier en conséquence (Myers, 1995; Holling *et al.*, 1995).

L'élément de surprise est lié à la nature non linéaire des écosystèmes. Ces derniers peuvent absorber des stress sur de longues périodes sans être trop perturbés, pour plus tard arriver à un point catastrophique lorsque les stress cumulés atteignent des proportions critiques (examiné dans Myers, 1995; Carpenter *et al.*, 1995).

On doit se préoccuper de surprises comme la modification rapide des écosystèmes et du paysage (Malcolm et Markham, 1996). Il est aussi probable que se manifestent des processus de rétroaction qui entraîneront de façon subite et imprévisible des modifications en cascade des chaînes trophiques et un remaniement des espèces (Chapin et Korner, 1994). De plus, des changements dus au changement climatique et touchant certaines espèces clés peuvent avoir un plus grand impact sur le fonctionnement des écosystèmes que des changements dans la diversité globale des espèces (Stirling et Derocher, 1992, 1993; Srivastava et Jefferies, 1996).

Comme les écosystèmes sont susceptibles de connaître des changements de structure et de composition surprenants, certains pensent qu'on devrait mettre l'accent sur la préservation de l'intégrité écologique plutôt que sur la protection de la diversité (Noss, 1990b; Woodley *et al.*, 1993; Angermeier et Karr, 1994). L'intégrité, ou la *santé*, écologique se traduit par la capacité qu'a un écosystème de s'auto-organiser sur une vaste gamme de niveaux d'organisation et d'échelles spatio-temporelles (Kay et Schneider, 1992). Les concepts attachés à l'intégrité mettent l'accent sur la préservation de l'adaptabilité et des processus des écosystèmes plutôt que sur leur structure actuelle.

Malheureusement, bien que le concept d'intégrité écologique soit compris intuitivement par presque tous les écologistes, il s'est avéré difficile d'en établir une définition opérationnelle faisant consensus (Shrader-Frechette, 1994). Ultimement, cependant, la plupart des écologistes sont

d'avis qu'il est nécessaire d'adopter un concept de biodiversité qui prenne en considération tant la diversité des espèces que les processus écologiques.

Au nombre des écosystèmes canadiens qui ont été étudiés en rapport avec les scénarios de changement climatique, on compte les lacs boréaux (Schindler *et al.*, 1990, 1996b), les marais côtiers arctiques (Jefferies *et al.*, 1995; Ruess *et al.*, 1989), la dynamique toundra-limite des arbres (Payette *et al.*, 1989a), et les réseaux alimentaires marins de l'Arctique (Conover *et al.*, 1986; Stirling et Derocher, 1992, 1993).

Dans ce qui suit, on traite de la manière dont les écosystèmes peuvent être touchés par le changement climatique, en présentant trois exemples canadiens.

### Désertification d'un marais salé subarctique

Les marais salés et la colonie de petites oies des neiges de la baie La Pérouse, sur les rives de la baie d'Hudson près de Churchill, au Manitoba, ont été largement étudiés durant plus de 25 ans (Cooke, 1987). Il s'en est dégagé une image complexe reliant les herbivores, le cycle de l'azote, la migration de la sauvagine et les impacts directs du changement climatique sur l'écosystème.

Une population résidante de petites oies des neiges, de même que des individus migrateurs, viennent se nourrir dans la baie La Pérouse durant la migration printanière. Quand la population d'oies des neiges était faible, le broutage au printemps et à l'été stimulait la production de biomasse aérienne de graminées, de sorte qu'il y avait une rétroaction positive favorisant la croissance végétale et la productivité du sol (examiné dans Chapin *et al.*, 1992).

Grâce en partie à l'accroissement du taux de survie hivernale des oies des neiges, dû à une diminution de la chasse dans les voies migratoires et à des changements dans les pratiques agricoles dans leur aire d'hivernage du sud des États-Unis, la population de ces oiseaux a connu une hausse annuelle moyenne de 8 %. Les oies des neiges se nourrissent maintenant dans les cultures de blé d'automne partout dans leur aire de répartition, ce qui accroît le taux de survie des juvéniles. Depuis le milieu des années 50, la population d'oies des neiges du centre du continent est passée de 500 000 à 4 000 000 d'oiseaux (Jefferies *et al.*, 1995).

La plus forte densité de la population dans les voies migratoires vers le nord, combinée à de mauvaises conditions météorologiques printanières dans les aires de reproduction septentrionales, retarde le passage des petites oies des neiges migrant vers les aires de reproduction plus au nord. Les migrateurs font maintenant halte dans la baie La Pérouse, avec les oies résidantes qui retournent nidifier. En conséquence, la pression de broutage est intense dans les marais salés à une période où il y a peu de biomasse aérienne à brouter. Au lieu de brouter, les oies fouillent le sol pour se nourrir de rhizomes et de pousses, d'où une destruction des peuplements de graminées des marais salés qui expose les sédiments. L'accroissement des taux d'évaporation durant les étés fréquemment secs et chauds dans les étendues de graminées perturbées fait augmenter la salinité des sols, ce qui empêche l'établissement et la croissance d'une nouvelle végétation (Srivastava et Jefferies, 1996). Il s'ensuit une rétroaction positive entre les herbivores, la croissance végétale et la salinité, ce qui entraîne la désertification de ces marais salés de l'Arctique.

L'accroissement de la salinité s'accompagne d'une réduction des taux globaux de reminéralisation de l'azote du sol en raison de la réduction de la biomasse de graminées. Ainsi, il y a détérioration des conditions édaphiques en ceci que c'est déjà l'azote, plutôt que le phosphore, qui est un facteur limitant dans les sols de la région de la baie La Pérouse (Wilson, 1993). Cette désertification s'est accompagnée d'un déclin des populations d'invertébrés du sol, d'oiseaux de rivage et de certaines espèces de canards brouteurs, comme le canard siffleur (Fred Cooke, données non publiées).

Dynamique de la limite des arbres et incendies

Les incendies, tant par leur fréquence que par leur intensité, ont un impact majeur sur la structure des communautés dans la forêt boréale (Johnson et Fryer, 1989). Les conditions plus chaudes et plus sèches prévues par les MCG devraient avoir pour effet d'accroître la fréquence et la gravité des incendies dans une grande partie de la forêt boréale de l'ouest du Canada (Johnson et Larsen, 1991; Flannigan et Van Wagner, 1991). Cela pourrait avoir des impacts importants sur la nature des espèces présentes dans les écosystèmes et sur les processus en jeu dans ces derniers, mais les effets locaux sur la diversité des espèces dépendent des conditions météorologiques, des conditions édaphiques et d'autres perturbations (Mackay, 1995).

Par exemple, on a montré que la position de la limite des arbres dépend de façon sensible de la dynamique des incendies (Landhausser et Wein, 1993; Payette *et al.*, 1989a). La dynamique de la limite des arbres peut jouer un rôle majeur dans la détermination de la structure des écosystèmes. Les déplacements passés de cette limite dans le nord se sont accompagnés de changements importants dans la nature et la phénologie des espèces présentes (Moser et MacDonald, 1990); ils ont particulièrement influé sur la structure des communautés d'invertébrés dans les lacs touchés (Walker et MacDonald, 1995) et sur la végétation herbacée (Ritchie, 1987).

Dans la forêt boréale de l'ouest, on s'attend à ce que le changement climatique donne lieu à des étés plus chauds et plus secs (CCC92), et à de plus fréquents orages accompagnés de foudre, ce qui accroîtra la fréquence et l'intensité des incendies (Shaver *et al.*, 1992). On prévoit que le réchauffement dans l'ouest entraînera une migration de la limite des arbres vers le nord, en dépit des incendies.
On assistera aussi à un accroissement de la fréquence et de l'intensité des incendies dans les forêts boréales de l'est dans le nord du Québec. Cependant, selon les prévisions climatiques, il fera plus froid dans cette région (CCC92). L'accroissement de la fréquence des incendies fera migrer la limite des arbres vers le sud dans cette région, étant donné que la forêt d'épinettes noires ne pourra pas se régénérer aussi rapidement que la toundra après un incendie sous le climat plus froid (Arseneault et Payette, 1992; Cook et Cole, 1991).

Réseaux alimentaires marins de l'Arctique

Le réseau alimentaire de l'Arctique a une structure complexe qui est fonction de la productivité marine globale. On compte cinq niveaux trophiques distincts, dont le plus élevé est celui du carnivore supérieur, l'ours blanc (Welch *et al.*, 1992). Les changements dans la productivité marine induits par le climat se feront sentir au sommet de la chaîne alimentaire, ce qui aura des

répercussions sur la performance reproductrice et sur la distribution des ours blancs (Stirling et Derocher, 1993; voir aussi Diamond).

Le changement climatique expose ce système à de nombreux risques, dont ceux liés aux impacts sur le couvert de glace de mer et de neige, qui sont peut-être les plus importants. Dans la baie d'Hudson, on s'attend à ce que les eaux se réchauffent graduellement et que la couverture glacielle devienne moins importante et se maintienne aussi moins longtemps (CCC92). Cela aura plusieurs effets sur la productivité. Premièrement, on trouve sous la glace polaire une grande quantité d'algues qui constituent la principale source alimentaire pour une grande variété de zooplancton et de crustacés (Conover *et al.*, 1986). La fonte de la glace réduit le substrat utilisable par les algues, ce qui prive le zooplancton et les crustacés associés à la glace de leur source alimentaire. La fonte de la glace a aussi pour effet de réduire la salinité de la partie supérieure de la colonne d'eau. L'accroissement du gradient de salinité réduira le taux de remontée de l'eau de mer, qui transporte des nutriments des profondeurs vers la surface (*idem*), ce qui réduit encore davantage la productivité du phytoplancton.

La baisse de la productivité primaire fera en sorte que l'océan ne pourra plus maintenir les quantités existantes de crustacés et éventuellement de poissons (*idem*), dont dépendent les populations de phoques (Welch *et al.*, 1992). S'il y a moins de phoques, il y aura aussi moins d'ours blancs (Derocher et Stirling, 1995). Les renards arctiques, qui suivent souvent les ours blancs sur la glace, se nourrissent des restes des proies des ours blancs (Welch *et al.*, 1992). S'il y a moins de carcasses de phoques pour les renards, ceux-ci pourraient être forcés de compter sur les oiseaux nicheurs pour se nourrir l'été, ce qui accroîtra les menaces qui pèsent sur les populations de ces derniers.

***Besoins en matière de recherche***

Nous devons d'abord bien connaître la biodiversité de notre pays avant de pouvoir évaluer les impacts que peuvent avoir sur elle le changement climatique. Actuellement, nous connaissons environ 20 % des espèces qui composent les écosystèmes canadiens, et nous en savons encore moins sur leur écologie. On sait très peu de choses des groupes extrêmement diversifiés (p. ex., les champignons et les arthropodes) qui constituent plus de 80 % de notre biodiversité et forment l'infrastructure qui détermine la dynamique des écosystèmes. Nous devons acquérir une connaissance de base de la biodiversité au niveau des espèces dans les écosystèmes canadiens avant d'être en mesure de déterminer adéquatement la réponse des communautés biologiques au changement climatique.

Nous manquons de données sur la diversité génétique dans les populations sauvages en bonne santé, particulièrement dans le cas des espèces qui ne sont pas exploitées commercialement. Nous devons mieux connaître les profils naturels de la diversité génétique avant de pouvoir établir si le changement climatique réduit cette diversité.

Nous devons nous pencher davantage sur la diversité et sur la sensibilité au changement climatique des microbes du sol et des plantes avasculaires, ces organismes pouvant jouer un rôle très important dans la détermination des processus futurs des écosystèmes. Pour prévoir les réponses des communautés biologiques et des processus écosystémiques au changement

climatique, il faudra notamment connaître les types de comportement dynamique possibles de ces entités. Des études globales sur les comportements des écosystèmes devront être menées.

### *Conclusion*

Les changements climatiques soudains que connaîtra le Canada pourront avoir des impacts positifs et négatifs sur la biodiversité. Cependant, il sera impossible de prévoir avec précision les nouveaux groupements d'espèces qui se formeront et leur diversité. Si l'intégrité des processus en jeu dans les paysages et les écosystèmes est préservée, alors peut-être que la biodiversité pourra être maintenue, voire augmentée, par suite des changements environnementaux qui découleront du changement climatique au pays.

Toutefois, la nature peut nous réserver des surprises, et nous devons donc être prudents dans nos prévisions des impacts du changement climatique sur la biodiversité. Nous devons aussi avoir à l'esprit ce que révèlent clairement les données des époques géologiques anciennes, à savoir que les changements climatiques catastrophiques ont souvent été associés à des périodes d'extinction massive (Crowley et North, 1988; Signor, 1990).

## IMPACTS SUR LES ESPÈCES SAUVAGES

### *Introduction*

Définition d'« espèces sauvages » pour ce chapitre

Dans le document *Une politique des espèces sauvages pour le Canada*, on entend par espèces sauvages « tous les organismes sauvages et leurs habitats - y compris les plantes sauvages, les invertébrés et les micro-organismes aussi bien que les poissons, les amphibiens et les reptiles, ainsi que les oiseaux et les mammifères qui ont toujours été considérés comme faisant partie de la faune » (Conseil des ministres de la Faune du Canada, 1990). Une remarque doit être faite au sujet de cette définition : elle inclut des groupes d'organismes habituellement considérés comme des ressources utilisables (p. ex., les poissons et les arbres des forêts) et qui sont donc traités comme faisant partie de secteurs économiques distincts dans le cadre de l'ÉPC; on examinera ces secteurs connexes au besoin, mais non pas en détail.

Ce chapitre met l'accent sur les caractéristiques des populations d'espèces sauvages qui peuvent être affectées par la variabilité et le changement climatiques. La plupart de ces populations sont avant tout tributaires de la qualité et de la quantité de leurs habitats; ainsi, les impacts du climat sur l'habitat seront probablement plus importants que ceux de tout autre agent de forçage. On traite de l'habitat en profondeur ailleurs dans l'ÉPC, dans au moins trois autres sections : Écosystèmes non aménagés, Biodiversité et Altération des paysages. Ici, on met l'accent sur les impacts directs du climat sur les populations plutôt que sur les habitats. Toutefois, les impacts indirects agissant par l'entremise de changements dans les habitats ne peuvent être ignorés si l'on veut avoir une compréhension globale des impacts du climat. Les recoupements avec d'autres sections sont donc inévitables.

Facteurs autres que le climat agissant sur les espèces sauvages

Bien que les populations d'espèces sauvages soient principalement déterminées par la quantité et la qualité de l'habitat, les relations de compétition de même que les relations prédateur/proie et hôte/parasite, ainsi que la contamination par des substances toxiques ou dangereuses, jouent des rôles importants. Le climat influera sur ces autres composantes des communautés, en plus de faire sentir ses effets sur les populations. Tout facteur faisant entrer en jeu ces autres composantes touchera donc aussi les populations. Dans des systèmes aussi complexes où peuvent interagir divers facteurs, l'isolement des effets possibles du climat représente un défi scientifique considérable.

À ces facteurs environnementaux déterminants, on doit ajouter ceux issus de la société humaine. Les politiques gouvernementales de gestion des espèces sauvages sont tributaires du « paradigme de la chasse » suivant lequel les populations sont régulées par la mortalité des adultes; dans cette perspective, les gestionnaires contrôlent la part de cette mortalité attribuable à la chasse en réglementant le nombre d'animaux pouvant être tués par les chasseurs. Il n'en reste pas moins que les gestionnaires des espèces sauvages conviennent que la qualité et la quantité de l'habitat ont généralement une plus grande influence sur les tailles des populations à long terme que la mortalité due à la chasse. La qualité et la quantité de l'habitat sont des questions d'utilisation des terres et concernent bien d'autres intervenants que les seuls gestionnaires des espèces sauvages. La législation canadienne en matière d'espèces sauvages ne tient pas compte adéquatement du fait qu'il faut agir sur les habitats plus que sur la mortalité due à la chasse, ce qui fait que nous ne disposons pas des outils nécessaires à une gestion directe de la plupart des populations d'espèces sauvages.

Liens avec d'autres secteurs et chapitres de l'Étude pan-canadienne

Les autres secteurs auxquels les populations d'espèces sauvages sont le plus étroitement liées sont la foresterie (où les forêts sont considérées en tant qu'habitats d'espèces sauvages et en tant qu'entités constituées d'espèces sauvages, c'est-à-dire de plantes et d'autres organismes), l'agriculture, les pêches, et la biodiversité, qui a été traitée plus haut. La foresterie et l'agriculture constituent ensemble le secteur de l'utilisation des terres - et donc celui des habitats d'espèces sauvages - qui touche une grande partie de la surface terrestre du Canada; par ailleurs, les populations d'espèces sauvages sont les éléments de base de la biodiversité, des forêts et des pêches; traiter de ces questions séparément peut aider à organiser le discours, mais il s'agit d'une optique conceptuellement arbitraire.

On donne plus loin un exemple des liens existant avec l'agriculture (section « Changements dans la taille des populations - canards des prairies, sécheresse et agriculture »). Dans le domaine de la foresterie, on peut donner l'exemple de la migration possible vers le nord, dans la forêt boréale, de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, une conséquence du réchauffement climatique. Plusieurs espèces d'oiseaux insectivores - principalement les parulines de la famille des Parulidés, mais aussi le gros-bec errant (Crawford *et al.*, 1983) - sont d'importants prédateurs naturels de cette tordeuse (Holling, 1988). On a observé récemment des déclins importants de certaines de ces espèces, particulièrement des parulines migratrices néotropicales (Kirk *et al.*, 1997), mais on ne

sait pas dans quelle mesure ces déclins sont attribuables à la destruction de leur habitat hivernal dans la forêt tropicale ni dans quelle mesure ils sont attribuables à des phénomènes (dont la coupe du bois) qui ont eu lieu dans leurs aires de reproduction de la forêt boréale. Les migrateurs néotropicaux fréquentent tant les régions boréales que les régions tropicales et, par leurs effets sur les infestations d'insectes, ils montrent comment les animaux peuvent jouer un rôle inattendu dans le fonctionnement des écosystèmes (Pastor, 1996).

Liens avec les questions intersectorielles

Les questions intersectorielles qui touchent de plus près les espèces sauvages sont l'altération des paysages, puisque ces derniers définissent les habitats dont peuvent disposer les espèces sauvages; les événements météorologiques extrêmes et les problèmes atmosphériques intégrés, qui ont des impacts sur les populations d'espèces sauvages; et les facteurs extraterritoriaux, particulièrement dans le cas des espèces migratrices (des oiseaux pour la plupart) qui passent des périodes importantes de leur cycle vital en dehors du territoire sur lequel le gouvernement canadien a juridiction.

Biais régionaux

Les influences du climat sont souvent le plus évidentes dans les régions où le climat est le plus extrême. C'est pourquoi une bonne partie de la littérature relative aux impacts du climat sur les espèces sauvages a trait à l'Arctique ou aux prairies, où le froid et la sécheresse, respectivement, ont des effets très marqués sur les espèces sauvages. Dans les régions du pays où les milieux bâtis sont plus abondants, ou bien où le climat est plus modéré, les impacts possibles du climat tendent à être négligés et donc à être moins étudiés.

### *Impacts de la variabilité et du changement climatiques sur les espèces sauvages*

Notre capacité d'évaluer les impacts possibles de la variabilité et du changement climatiques sur les espèces sauvages est limitée par notre connaissance partielle des effets du climat sur ces dernières (Diamond, 1990). Les descriptions de relations entre les variables climatiques et les réponses d'espèces sauvages abondent dans la littérature scientifique (Whyte et Ignatiuk, 1989), mais il y a eu peu de tentatives d'intégrer ces informations fragmentaires pour établir les relations générales existant entre le climat et les espèces sauvages (à ce sujet, voir Root, 1988a, 1988b).

Bien que les impacts du climat sur les habitats des espèces sauvages soient traités ailleurs de façon plus détaillée, nous devons faire quelques remarques pour mettre les choses en perspective. D'abord, nous devons souligner que les mélanges d'espèces qui constituent les communautés végétales que nous connaissons ne sont pas des communautés fixes qui répondront de façon synchrone et en bloc au changement climatique; ce sont plutôt des associations temporaires d'espèces qui partagent une même tolérance aux conditions environnementales existantes. Bon nombre de ces espèces ont des niches climatiques légèrement différentes, et persisteront sur des périodes différentes et migreront à des taux différents en réponse au changement climatique; en conséquence, ce dernier donnera lieu à un réaménagement des communautés d'espèces (Van Devender et Spaulding, 1979; Peters, 1990). Ainsi, il se pourrait que les relations interspécifiques

existant dans les communautés d'aujourd'hui, qui déterminent notre compréhension actuelle de la tolérance environnementale des espèces, ne persistent pas sous les climats futurs.

Changements dans la distribution des habitats

La distribution actuelle des biomes, des écozones et des associations végétales est déterminée par les interactions entre le climat et les sols, l'influence du climat étant clairement reflétée par la répartition des principaux types d'habitat (p. ex., toundra, forêt et prairie) en bandes qui suivent grossièrement les latitudes autour de la planète. De façon très générale, on peut dire qu'une élévation de la température de la planète devrait avoir pour effet de faire migrer ces zones vers les pôles (Flohn, 1979); toutefois, des incertitudes majeures demeurent en cette matière. On ne peut pas prévoir l'étendue probable (limites septentrionales et méridionales) de chacun des principaux types d'habitat, ni leur composition. Par exemple, est-ce que la forêt boréale telle qu'on la connaît aujourd'hui conservera son mélange d'espèces actuel? Ou bien est-ce qu'il y aura réaménagement des espèces, comme on l'a laissé entendre plus haut, ce qui ferait apparaître des communautés entièrement différentes? Avec leur modèle, Rizzo et Wiken (1992) ont prévu non seulement des changements importants dans les frontières écologiques, mais aussi des changements internes importants dans la composition des écosystèmes. Lenihan et Neilson (1995), en utilisant le modèle canadien climat-végétation (MCCV), ont développé deux scénarios de doublement du $CO_2$, qui ont tous les deux prévu une réduction de l'étendue de la toundra et des formations boisées subarctiques, une migration vers le nord et un accroissement de l'étendue des forêts boréales et tempérées, et une expansion de la végétation des prairies et des forêts-parcs sèches. Les deux scénarios prévoyaient aussi des changements considérables dans la composition de certains types de végétation. Le MCCV utilise des paramètres climatiques qui influent sur la distribution de la végétation plus directement que ceux habituellement utilisés dans les MCG, et donne probablement des résultats plus réalistes que les prévisions fondées sur les produits des MCG classiques.

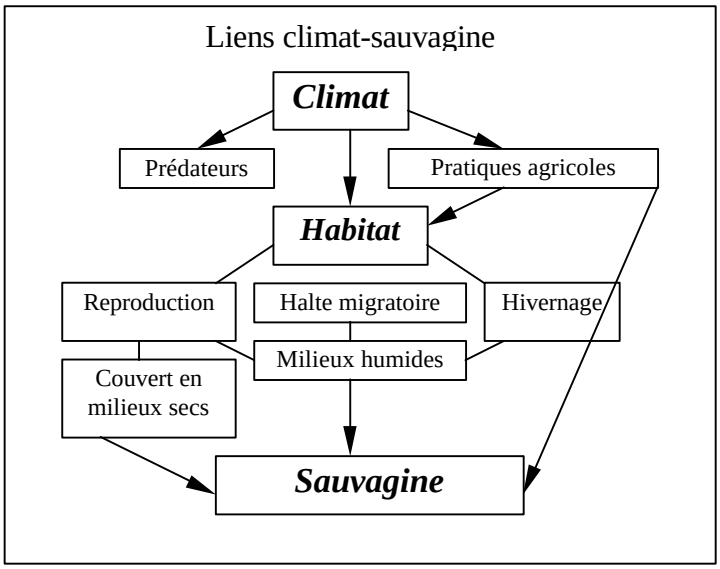
On doit aussi avoir à l'esprit que la valeur actuelle de la plupart des écosystèmes en tant qu'habitats de la faune au Canada est déterminée autant par la gestion humaine de ces habitats (par l'entremise notamment de l'agriculture, de la foresterie et des pêches) que par les caractéristiques naturelles de ces systèmes. Il s'ensuit que les changements anthropiques dans l'utilisation des terres et de l'eau peuvent avoir au moins autant d'influence sur la quantité et la qualité des habitats des espèces sauvages que les changements induits directement par le changement climatique.

Les voies principales par lesquelles le changement climatique affectera l'habitat des espèces sauvages sont illustrées, pour le cas de la sauvagine, à la figure 2.1 (tirée de Diamond et Brace, 1991); les mêmes principes peuvent être appliqués à d'autres groupes d'espèces sauvages. Ce schéma met en évidence que la variabilité et le changement climatiques affecteront les pratiques agricoles qui à leur tour affecteront l'habitat de façon probablement plus marquée que le processus parallèle des effets directs du changement climatique sur l'habitat. Comme la plupart des habitats de l'extérieur de l'Arctique sont actuellement aménagés, au moins à un certain degré, il s'ensuit que les changements dans les pratiques de gestion auront des effets sur les habitats, qui s'ajouteront à ceux induits directement par le changement climatique. Par exemple, les prairies

canadiennes sont actuellement pour la plus grande partie utilisées à des fins agricoles, et leur valeur future pour les espèces sauvages dépendra de la réaction des agriculteurs au changement climatique. Si les champs de blé se transformaient en pâturages secs, on assisterait, entre autres, à l'apparition d'habitats à herbe courte qui favoriseraient les espèces sauvages adaptées à ce genre de milieu (Owens et Myres, 1973; Diamond, 1993). De même, au moins la moitié des terres boisées du Canada sont aménagées en vue de la production de produits forestiers (bois d'œuvre et pâte); pour ce faire, on doit couper les arbres, mais cela s'accompagne d'une lutte contre les incendies, de la fragmentation des habitats forestiers et de la construction de routes; les changements dus aux pratiques forestières auront probablement autant d'influence sur la qualité des habitats forestiers que les changements induits directement par le changement climatique. En clair, cela veut dire que les réponses humaines au changement climatique pourraient avoir autant d'effet sur les populations d'espèces sauvages que le changement climatique lui-même. On doit aussi avoir à l'esprit que bon nombre d'espèces sauvages peuvent s'adapter à certains changements dans les conditions de leur habitat, notamment à ceux qui pourraient être issus du changement climatique.

Mis à part les changements dans la distribution des types de végétation, qui sont traités plus en détail dans d'autres chapitres, il reste trois habitats en péril qui ne se définissent pas principalement par leur végétation. Il s'agit des îles marines basses, des vasières côtières et des écosystèmes marins.

**Figure 2.1 Principales voies par lesquelles le climat influe sur les populations de sauvagine**




Vasières côtières

De nombreuses espèces d'oiseaux de rivage (pluviers, bécasseaux et phalaropes) nichent dans l'Arctique canadien et migrent chaque automne vers leurs aires d'hivernage des régions tropicales ou tempérées de l'Amérique du Sud. Pour obtenir l'énergie nécessaire à cette migration, elles doivent trouver en chemin des sources abondantes d'aliments dans des lieux sécuritaires, qu'on

appelle haltes migratoires ou aires de repos. Les plus importantes haltes migratoires au Canada pour ces oiseaux sont la baie James (Ontario), la baie de Fundy (Nouveau-Brunswick et Nouvelle-Écosse) et le delta du Fraser (Colombie-Britannique). Ces trois haltes comportent de vastes vasières côtières riches en invertébrés (p. ex., *Corophium volutator* dans la baie de Fundy) et dont l'étendue protège les oiseaux des prédateurs terrestres. La baie de Fundy, par exemple, accueille entre 50 et 90 % de la population mondiale de bécasseaux semipalmés, qui s'y arrêtent au cours de la migration les conduisant de l'Arctique jusqu'en Amérique du Sud chaque automne (Mawhinney *et al.*, 1993). Durant leur séjour d'environ 15 jours les bécasseaux semipalmés voient leur poids presque doubler (de 20-25 g à environ 40 g) avant de s'envoler pour leur voyage sans escale de 60 à 70 heures vers leurs aires d'hivernage distantes de 4 000 kilomètres, au Surinam (Hicklin et Smith, 1984; Stoddard *et al.*, 1983). La disparition de cet habitat, ou une réduction importante de sa superficie, pourrait avoir de graves conséquences pour la population de plus de deux millions d'oiseaux (Mawhinney *et al.*, 1993) qui fréquente actuellement ce site.

Tous ces sites sont des vasières côtières qui pourraient être déstabilisées, et même inondées, advenant une élévation du niveau de la mer. Bien que les terres basses qui jouxtent ces vasières puissent les remplacer, elles sont actuellement largement utilisées à des fins agricoles ou autres et leurs exploitants ne les abandonneront pas facilement pour les laisser devenir un habitat d'oiseaux de rivage. On observe déjà des changements importants dans les caractéristiques des vasières de la baie de Fundy, dans leurs densités d'invertébrés et leur utilisation par les oiseaux de rivage, mais on ne sait pas très bien dans quelle mesure ces changements sont liés à l'élévation du niveau de la mer (Percy *et al.*, 1996).

### Écosystèmes marins

Cette section traite essentiellement des oiseaux de mer et de leurs proies marines. Dunbar (1973, 1976, 1985; Dunbar et Thompson, 1979) a fait état de certains changements dans la vie marine attribuables au climat, dans l'Arctique canadien et les régions voisines. Les écosystèmes marins se répartissent en zones aux échelles planétaire, régionale et locale, d'une manière très semblable aux biomes terrestres. Les écozones marines sont caractérisées par diverses propriétés physiques, notamment la température, la salinité et la vitesse et la direction des courants (Ekman, 1967). Chaque zone renferme des communautés caractéristiques de végétaux et d'animaux, tout comme les écozones terrestres. Les distributions des oiseaux de mer dans le monde sont fonction des caractéristiques des diverses écozones marines (Murphy, 1936), principalement des types de proies présentes (plancton, krill, calmar et poisson). Les impacts du changement climatique sur les populations d'oiseaux marins se feront probablement sentir de façon indirecte et principalement par l'entremise des réponses de leurs proies aux changements dans la distribution des masses d'eau dans la mer.

Dans le Canada atlantique, par exemple, le courant froid du Labrador s'étendra probablement vers le sud en raison de la fonte de la calotte glaciaire du Groenland, qui accroîtra l'apport d'eau douce froide dans la baie de Baffin (Conover, 1995). Comme ce courant détermine le climat régional, le réchauffement planétaire produira en fait un refroidissement local dans le Canada atlantique (voir le volume sur la Région de l'Atlantique). La baisse des températures des eaux du Canada atlantique ces dernières années pourrait être en partie attribuable à ce processus, et certains

auteurs l'ont reliée à l'effondrement (ou à l'absence de rétablissement) des stocks de morues. Simultanément, certains oiseaux marins qui aiment les eaux froides ont étendu leur aire de reproduction vers le sud : par exemple, le fulmar boréal, qui a colonisé le sud-est du Labrador et l'est de Terre-Neuve dans les années 70 (Brown et Nettleship, 1984), la mouette tridactyle, qui a colonisé la baie de Fundy à la fin des années 80 (Kehoe, 1994), et le petit pingouin, qui s'est établi tout récemment dans un nouveau site dans la baie de Fundy (Mawhinney et Sears, 1996).

Les changements récents de la distribution des poissons et des invertébrés marins dans les eaux du Canada atlantique laissent penser que tous les niveaux du réseau alimentaire marin pourraient réagir à l'extension des eaux froides vers le sud; on ne sait pas si cette extension est attribuable au réchauffement planétaire à long terme ou à un cycle à court terme dans lequel se succéderaient des périodes chaudes et des périodes froides (Conover, 1995).

La distribution des colonies d'oiseaux nicheurs dans l'Arctique est étroitement reliée aux polynies et aux côtes où les glaces disparaissent tôt, comme dans le sud-ouest du Groenland, dans le détroit d'Hudson et dans la polynie des eaux du Nord dans le haut de la baie de Baffin (Brown, 1991). Le réchauffement planétaire profitera probablement à ces oiseaux marins en faisant fondre la glace de mer plus tôt, ce qui libérera des aires d'alimentation, en allongeant la période de croissance du phytoplancton, ce qui bénéficiera à l'ensemble des organismes du très court cycle alimentaire marin de l'Arctique, et en permettant aux oiseaux qui nichent sur des corniches et dans des éboulis rocheux de le faire plus tôt du fait de la fonte plus hâtive de la neige (Brown, 1991). Cependant, si le réchauffement est tel qu'il entraîne une réduction très marquée de l'étendue de la glace de mer, la quantité d'aliments pourrait diminuer étant donné qu'une bonne partie du réseau alimentaire de l'Arctique dépend des algues qui croissent sous la glace (Bradstreet et Cross, 1982).

La réduction de la couverture glacielle dans l'Arctique pourrait avoir des conséquences négatives pour divers mammifères marins. La distribution et les effectifs des phoques de l'Arctique lui sont étroitement liés et si cette dernière est réduite, on assistera ultimement à une réduction des populations de phoques; comme ce sont des animaux qui vivent longtemps et ont de faibles taux de reproduction, il se pourrait qu'ils ne puissent s'adapter que lentement (Stirling et Derocher, 1992). Les phoques sont aussi les proies principales des ours blancs; à la limite sud de leur aire, dans les baies James et d'Hudson, les ours blancs doivent déjà jeûner durant les quatre mois où il n'y a pas de glace. Le prolongement de la période sans glace accroîtra le stress nutritionnel dans la population; si cette période devient trop longue, les ours pourraient se trouver incapables d'accumuler les réserves de graisse dont ils ont besoin pour survivre. L'impact du réchauffement climatique commencera à se faire sentir de diverses manières : déclin de la santé des ours, réduction du taux de reproduction, réduction du taux de survie des petits, et accroissement des interactions entre les ours et les humains. Bien que la plupart de ces signes soient actuellement détectables chez les ours blancs de l'ouest de la baie d'Hudson, on ne peut pas établir si c'est le changement climatique qui en est responsable. L'allongement de la saison sans glace dans l'océan Arctique pourrait atteindre un point où l'ours blanc risquerait l'extinction (Stirling et Derocher, 1992).

Une relation étroite entre les tendances des conditions météorologiques, l'abondance du plancton et du hareng, et plusieurs paramètres de la reproduction chez une mouette marine (la mouette tridactyle *Rissa tridactyla*) a été observée sur une période de 33 ans dans la mer du Nord (Aebischer *et al.*, 1990). Cette étude remarquable ne nous permet pas d'établir si cette corrélation est attribuable à des liens causaux qui s'enchaîneraient dans le réseau alimentaire à partir de la base de celui-ci, sur laquelle auraient au départ agi les conditions météorologiques, ou si ces variations s'expliquent par des impacts climatiques touchant de façon indépendante chacun des différents niveaux du réseau alimentaire. Il est probable que les mécanismes en cause soient plus complexes que ce que laissent entendre ces deux propositions. Le fait que le signal météorologique soit suffisamment puissant pour se faire sentir à tous les niveaux trophiques indique avec force que les réseaux alimentaires marins peuvent fournir des indices clairs du changement climatique planétaire.

Changements dans la distribution des populations

Bien que la plupart des changements dans la distribution des espèces sauvages soient habituellement dus surtout à des changements dans la distribution des habitats, les changements climatiques peuvent aussi entraîner plus directement des changements dans la distribution des populations d'espèces sauvages. Les animaux homéothermes (dits « à sang chaud ») sont moins sensibles aux impacts directs du changement climatique que les animaux poïkilothermes (« à sang froid »), mais même les oiseaux réagissent directement au climat malgré leur isolation thermique très efficace.

La relation entre le climat et les distributions hivernales des oiseaux en Amérique du Nord a été analysée par Root (1988a, b); celui-ci a utilisé les données de nombreuses décennies des Recensements des oiseaux de Noël, réalisés par des bénévoles depuis le début du XX$^{e}$ siècle. L'aire hivernale de la plupart des espèces d'oiseaux chanteurs d'Amérique du Nord est principalement déterminée par la distribution des habitats; mais, ce facteur mis à part, la limite septentrionale de l'aire hivernale de nombreuses espèces d'oiseaux chanteurs coïncide avec les isothermes de janvier, où les besoins énergétiques journaliers sont environ 2,4 fois supérieurs au taux métabolique de base (*idem*). Si on considère qu'il y a là une relation causale, le réchauffement hivernal devrait entraîner une migration vers le nord de l'aire hivernale de nombreux oiseaux chanteurs.

Par ailleurs, on n'a pas entrepris d'analyses détaillées des distributions estivales des oiseaux, bien qu'on dispose de données numériques (Price *et al.*, 1995), lesquelles ont été utilisées en vue de la détermination de tendances pour les 30 dernières années (Sauer *et al.*, 1997). James et Shugart (1974) ont étudié en détail le commencement de la saison de ponte du merle d'Amérique en réalisant une analyse des composantes principales de sept variables climatiques; cette étude a montré que la combinaison des températures d'avril mesurées aux thermomètres sec et mouillé était le facteur qui donnait la meilleure prévision du commencement de la période de nidification. Ces auteurs ont proposé que leur modèle graphique de l'« espace climatique » des merles d'Amérique pourrait être étendu pour prévoir l'aire de répartition de l'espèce, et les changements de cette aire en rapport avec les changements climatiques (particulièrement, dans ce cas, les températures d'avril). On n'a pas examiné le potentiel de cette méthode pour les autres oiseaux

nicheurs d'Amérique du Nord, mais on explore actuellement la possibilité de relier la phénologie (le moment) et le taux de reproduction au changement climatique chez un insectivore aérien, l'hirondelle bicolore (Hoyt, 1996).

Les oiseaux qui se nourrissent d'insectes en vol - les insectivores aériens - sont particulièrement sensibles aux conditions météorologiques du printemps et du début de l'été. Il arrive relativement souvent que des adultes meurent par suite de coups de froid en avril et en mai (Erskine, 1978; Henny *et al.*, 1982; Krapu, 1986; Sealy, 1966), et les petits en croissance sont vulnérables en juin quand les adultes doivent passer la plus grande partie de leur temps à chasser plutôt que de les couver. Comme ce fut le cas dans le sud de la Saskatchewan en 1993, le froid et la pluie à cette période peuvent causer une mortalité massive des oisillons parce que les adultes doivent passer plus de temps à chercher de la nourriture et ne peuvent alors pas garder leurs petits au chaud (Hoyt, 1996). L'accroissement de la fréquence de tels épisodes extrêmes peut causer une mortalité suffisamment importante pour que les oiseaux disparaissent des régions touchées pour s'établir dans d'autres régions. Certains autres insectivores aériens, particulièrement les martinets (famille des Apodidés), sont mieux adaptés sur le plan métabolique aux étés froids et humides; les oisillons peuvent faire varier leur taux de croissance en entrant dans un état de torpeur leur permettant de conserver leur énergie dans les périodes de pénurie (Lack, 1973).

Changements dans la productivité et les taux de survie

Productivité

L'hirondelle bicolore est un exemple d'espèce qui peut connaître une baisse de productivité par suite d'épisodes de conditions météorologiques estivales extrêmes. L'accroissement des précipitations estivales aura probablement des effets négatifs sur une grande variété d'oiseaux s'il réduit le temps disponible pour l'alimentation; mais s'il augmente, les productions primaire et secondaire (particulièrement s'il est combiné à des températures chaudes), il peut avoir un effet bénéfique. Pour généraliser, on peut dire qu'un accroissement des précipitations estivales moyennes peut améliorer la productivité des oiseaux de façon générale, mais qu'un accroissement de la fréquence des tempêtes estivales peut ne pas avoir cet effet, particulièrement si ces tempêtes se produisent à des moments critiques du cycle de reproduction. Une élévation subite du niveau des eaux peut être catastrophique pour les oiseaux qui nichent près de l'eau; les canards plongeurs, et spécialement les plongeons huards, qui nichent à quelques centimètres de la surface de l'eau, sont particulièrement vulnérables. Par exemple, les fortes pluies associées au passage dans les Maritimes de la tempête tropicale Bertha au milieu de juillet 1996 ont entraîné une hausse très subite des niveaux des eaux dans le sud-ouest du Nouveau-Brunswick, inondant plusieurs nids de plongeons en quelques heures (Benjamin et Diamond, 1996). La même tempête a balayé la plupart des nids de la colonie de mouettes décrite par Kehoe (1994), qui venait de s'établir sur les falaises de leur île, et a tué de nombreux oisillons de quatre espèces d'oiseaux marins sur l'île Machias Seal, dans la baie de Fundy (Amey, 1997).

### Taux de survie

La plupart des espèces sauvages se reproduisent en été plutôt qu'en hiver, de sorte que les changements dans le climat hivernal affecteront les taux de survie plutôt que la productivité. Les changements dans les seules températures hivernales au Canada auront probablement peu d'effet, mais les épisodes et les tempêtes de verglas - qui devraient devenir plus fréquents avec le réchauffement des hivers - pourront avoir de graves impacts sur divers organismes. Quand les petits oiseaux n'ont plus accès aux bourgeons, aux fruits et aux écorces parce que ces derniers sont couverts de glace, ils ne peuvent satisfaire leurs besoins énergétiques (bon nombre de très petits oiseaux, comme les mésanges, doivent s'alimenter pratiquement toute la journée pour combler leurs besoins énergétiques en hiver). En outre, les couches de glace sur la neige font que les caribous de Peary des îles de l'Arctique n'ont plus accès aux lichens et aux autres végétaux; on a établi un lien entre les déclins récents des effectifs de ces troupeaux et l'accroissement de la fréquence des pluies verglaçantes en hiver (Miller *et al.*, 1977, 1982).

On sait que l'épaisseur du couvert nival affecte la distribution de nombreux mammifères, particulièrement des ongulés et des loups, à l'échelle locale et régionale (Formozov, 1946; Telfer et Kelsall, 1984). Les ongulés ne sont pas tous adaptés à la neige de la même manière sur les plans structural et comportemental. À l'un des extrêmes, on trouve le bison, avec son poitrail bas, son corps lourd et ses petits sabots, qui le portent à s'enliser dans la neige profonde et à briser les croûtes peu épaisses; aussi, il ne s'alimente que de végétaux qui se trouvent sous la neige. À l'autre extrême, on trouve le caribou, avec son poitrail relativement haut, son corps léger et ses sabots larges en forme de croissant accompagnés d'ergots très développés. Les distributions actuelles des communautés d'ongulés correspondent bien à leurs adaptations au type et à la profondeur du couvert nival dans les régions où on les trouve. Les changements dans le climat hivernal modifieront probablement les aires de répartition de ces espèces. De tels changements se sont produits entre le Petit âge glaciaire (1300-1850), durant lequel les orignaux et les caribous étaient présents en Nouvelle-Écosse, et la période post-1850, durant laquelle les hivers plus doux ont permis au cerf de Virginie de recoloniser la province au détriment du caribou (Telfer, 1967). Il y aura aussi modification des relations prédateur-proie par suite du changement dans la distribution des types de couvert nival; par exemple, dans la neige profonde les loups pataugent alors que les caribous peuvent bien se déplacer, mais, dans la neige légère, ils peuvent suivre les orignaux, pas mieux équipés qu'eux (Telfer et Kelsall, 1984).

### Changements dans la taille des populations

La taille des populations de nombreuses espèces sauvages varie de façon cyclique (Steen *et al.*, 1990). D'abondants travaux de recherche ont tenté d'élucider les causes de ces cycles (et d'établir si ces derniers sont réellement prévisibles ou s'il s'agit de fluctuations aléatoires). L'idée que le climat pourrait être une des causes de ces cycles est relativement récente.

#### Le lynx et les cycles climatiques à long terme

Les variations cycliques dans les populations peut-être les mieux connues sont celles du lynx, un mammifère prédateur des forêts septentrionales (Sinclair *et al.*, 1993; Scott et Craine, 1993). Les

cycles des populations de lynx suivent habituellement celui d'environ dix ans de sa proie principale, le lièvre d'Amérique. À partir des données des cernes de croissance des arbres recueillies à Churchill (Manitoba) utilisées comme données subsitutives du climat, Scoot et Craine (1993) ont relié les phases à long terme du cycle du lynx à trois phases dans la circulation atmosphérique générale. Selon ces auteurs, la réduction des populations de proies durant les périodes froides entraîne une spécialisation chez le lynx, ce qui marque le début d'une cycle de population; dans les périodes plus chaudes, les prédateurs peuvent chasser une plus grande diversité de proies, et les populations de lynx cessent leur variation cyclique.

Canards des prairies, sécheresse et agriculture

On connaît moins les fluctuations des canards des prairies (famille des Anatidés), dont les effectifs suivent un cycle d'environ cinq à dix ans reflétant plus au moins le nombre d'étangs disponibles au printemps (Kiel *et al.*, 1972; Diamond et Brace, 1991). Les canards ont besoin de milieux humides pour se nourrir et d'une végétation permanente à proximité des sites d'alimentation pour nicher. Des sécheresses extrêmes dans les aires de reproduction principales des prairies peuvent avoir pour effet de déplacer les canards vers le nord, dans la forêt boréale ou même dans les biomes de la toundra arctique (Hansen et McKnight, 1964). Par suite des baisses marquées des effectifs de canards dans les années 80, on a mis sur pied le Plan nord-américain de gestion de la sauvagine (PNAGS) (Nelson *et al.*, 1991) dans le but de rétablir l'habitat de nidification de la sauvagine dans toute l'Amérique du Nord, mais particulièrement dans les prairies, où la plus grande partie de la population continentale se reproduit (Batt *et al.*, 1989). On a beaucoup débattu la question de savoir dans quelle mesure les déclins des populations étaient dus à l'agriculture intensive (destruction des habitats de nidification et drainage des milieux humides) et dans quelle mesure ils étaient dus au climat (Turner *et al.*, 1987; Johnson et Shaffer, 1987; Diamond et Brace, 1991). Bethke et Nudds (1995) ont examiné la relation entre, d'une part, les changements à long terme dans l'utilisation des terres et le climat et, d'autre part, l'abondance des canards sur une période de 30 ans. Ils ont utilisé les données de dénombrements aériens annuels, corrigés en fonction de dénombrements au sol, et les données de précipitations pour relier des indices d'abondance de 10 espèces de canards à des indices de l'état des milieux humides pour la période 1955-1974. Ils ont ensuite utilisé ces relations pour prévoir l'abondance de chaque espèce sur la période 1975-1989, et ont attribué les « déficits » (c.-à-d. les cas où les populations réelles étaient inférieures aux populations prévues) à l'impact de l'agriculture intensive. Ils ont observé que les effets de l'agriculture étaient négligeables dans l'est des prairies, où l'agriculture intensive avait déjà détruit la plus grande partie de l'habitat de la sauvagine avant 1951, et qu'ils allaient en s'accroissant vers l'ouest et le nord, où il reste beaucoup plus d'habitats.

Deux aspects de cette étude offrent un intérêt particulier : a) les auteurs ont consacré beaucoup d'efforts à trouver la combinaison la plus appropriée de variables climatiques (l'humidité du sol conservée, qui prend en considération les précipitations des 21 derniers mois et accorde un poids plus important aux précipitations hivernales qu'aux précipitations estivales [Williams et Robertson, 1965]); et b) il s'agit d'une étude unique en ceci qu'elle utilise de nombreuses sources de données différentes (sur la sauvagine, le climat et l'utilisation des terres) pour cerner un problème, et, ce faisant, elle nous permet de beaucoup mieux comprendre comment ces paramètres interagissent dans un écosystème complexe. Ses auteurs ont appliqué la puissance

informatique moderne à des concepts dont les bases avaient été jetées bien avant (Boyd 1981, 1985), mais qui ne pouvaient être utilisés sans des ressources analytiques et informatiques sophistiquées.

Ce cas montre non seulement qu'il est possible d'utiliser les données existantes pour démêler les interactions complexes entre l'utilisation des terres, le climat et les populations d'espèces sauvages, mais aussi qu'on doit définir avec soin les variables climatiques particulières pertinentes dans chaque situation. Dans le cas présent, l'accumulation de l'eau dans le sol sur une période de près de deux ans s'est révélée être le facteur qui a eu la plus grande influence sur une composante importante des milieux humides considérés.

Oies nichant dans l'Arctique[1]

À la plupart des latitudes dans le Nord canadien, l'ouest est plus chaud que l'est. La limite des arbres reflète cette réalité; en effet, elle atteint le cercle polaire dans le nord-ouest, mais ne dépasse pas 53°N dans le nord du Québec. Cependant, la plupart des oies nichent dans l'est de l'Arctique, et les accroissements récents les plus importants de leurs effectifs ont été observés dans le nord du district de Keewatin, au sud du golfe de la Reine-Maud, et dans le nord-ouest de l'île de Baffin, deux régions où la neige fond habituellement plus tard que plus au nord ou plus au sud. Cet accroissement des populations d'oies dans le centre de l'Arctique s'est produit en même temps qu'une hausse de la température estivale moyenne de 0,1°C par année durant la période 1977-1988 (Etkin, 1991); cependant il pourrait être plus lié aux changements des pratiques agricoles et des pressions de chasse dans le sud qu'aux températures dans le nord.

Changements dans la période et le taux de reproduction[1]

Bon nombre d'oiseaux arctiques commencent à se reproduire à la fonte des neiges ou juste après; les fontes tardives retardent la reproduction et réduisent souvent la productivité, soit pour des raisons énergétiques (p. ex., chez la bernache cravant à ventre pâle [Barry, 1962], la petite oie des neiges [Davies et Cooke, 1983] et l'oie de Ross [Ryder, 1967]), soit par un accroissement de la prédation (Byrkjedal, 1980). Dans les cas extrêmes, un printemps tardif peut inciter les oies à gagner des aires de reproduction complètement nouvelles (McCormick, 1988), ou à abandonner leurs tentatives de reproduction cette année-là. Chez les oiseaux qui vivent longtemps, comme les oies, il est important pour les adultes de ne pas mettre en péril leur propre survie en nichant trop tardivement pour pouvoir assurer le renouvellement complet de leurs plumes de vol avant l'arrivée de l'hiver.

La présence d'un certain couvert nival au moment de l'arrivée des oiseaux peut aussi être bénéfique pour certaines espèces, comme l'oie à bec court, parce que la neige protège contre le gel les végétaux dont elles se nourrissent durant les premiers stades de croissance des végétaux, où la valuer nutritive en est le plus élevée (Fox *et al.*, 1991). Ces oies se rassemblent pour se nourrir en bordure des îlots de neige fondante, sans utiliser les pousses gelées des zones libres de neige. Selon que la neige fond plus ou moins tôt, les oies nicheuses seront exposées à des risques

[1] Largement inspiré de Boyd, 1988.
[1] Largement inspiré de Boyd, 1988.

ou seront avantagées, une fonte très hâtive ayant pour effet de réduire la quantité de nourriture de bonne qualité et n'étant pas bénéfique pour les oies qui doivent refaire leurs forces avant de nidifier. La dépendance à l'égard des végétaux émergeant des îlots de neige fondante a aussi été observée chez l'oie rieuse et chez la bernache du Canada à leurs sites de reproduction sur la péninsule Kent (T. N.-O.), à la fin de mai et au début de juin (Boyd et Diamond, 1993).

L'influence de la date de fonte de la neige sur le moment de la reproduction a été examinée dans la région de la baie d'Hudson, où trois populations de deux espèces d'oies ont nidifié plus tôt dans les années 70 et 80 que dans la période 1964-1970, durant laquelle les températures étaient nettement plus basses (Boyd, 1982; MacInnes *et al.*, 1990).

Le taux de reproduction des oies et des oiseaux de rivage qui nichent dans l'Arctique varie souvent de façon similaire chez les espèces de la même région. La question de savoir quelle part de cette variation est attribuable aux conditions météorologiques dans les aires de reproduction (Boyd, 1987) ou aux cycles des populations de prédateurs (comme le renard arctique) et de leurs autres proies (campagnols et lemmings pour la plupart) (Summers et Underhill, 1987) demeure controversée; ces deux facteurs sont probablement importants (Dhondt, 1987).

La reproduction chez bon nombre d'oiseaux de rivage arctiques a lieu à un moment tel que les oisillons éclosent en même temps que les insectes dont ils se nourrissent (Holmes, 1966); le manque de synchronisation entre les conditions de température favorables, la fonte des neiges et la physiologie des oiseaux de rivage et des insectes peut avoir des effets significatifs sur le taux de reproduction (Green *et al.*, 1977). De hautes températures estivales peuvent accroître la productivité de l'écosystème, mais peuvent aussi avoir un impact négatif sur la couvaison et sur la croissance et la survie des jeunes de bon nombre d'espèces d'oiseaux des hautes latitudes qui sont mal adaptées aux maximums quotidiens prévus de 30 °C et plus.

Quand on corrèle les indices annuels du taux de reproduction dans les populations d'oies avec les mesures des conditions printanières (comme la température moyenne de juin, la diminution du couvert nival, ou la date à laquelle la température quotidienne s'élève au-dessus de 0 °C), on observe souvent des relations statistiquement significatives (Boyd, 1988). Habituellement, les réponses sont asymétriques : de basses températures et un couvert nival tardif sont associés à un faible taux de reproduction, mais des températures au-dessus de la moyenne, ou la disparition particulièrement hâtive du couvert nival, n'ont pas un lien particulièrement fort avec un bon taux de reproduction.

Chez bon nombre d'oiseaux marins, tant la distribution des aires de reproduction que le moment de la reproduction sont liés aux températures des eaux de surface de la mer (Harris et Wanless, 1989). Comme il est probable que ces températures changent par suite du réchauffement climatique, on peut s'attendre à des changements notables dans la distribution et le taux de reproduction des oiseaux marins. Dunbar (1985) et Dunbar et Thompson (1979) ont traité des fluctuations climatiques dans le nord-ouest de l'Atlantique au cours des derniers siècles et de leurs effets sur les populations de poissons et d'oiseaux marins.

Changements dans les migrations

On sait qu'il y a une corrélation étroite entre le moment des migrations et les conditions météorologiques; par exemple, les oies des neiges quittent leurs quartiers d'hiver quand les températures s'élèvent au-dessus de 18 °C (Flickinger, 1981), et la limite septentrionale qu'atteignent les bernaches du Canada lors de leur migration printanière correspond à l'isotherme de 35 °F (1,7 °C) (Lincoln, 1979). En général, les systèmes météorologiques, plutôt que les températures observées, déterminent probablement le moment des migrations; le gros de la migration de la sauvagine à l'automne a lieu peu de temps après le passage d'un front froid (Hochbaum, 1955), tandis qu'au printemps, les migrateurs se déplacent vers le nord dans le secteur chaud de dépressions (Lincoln, 1979). Ainsi, la distribution des masses d'air est au moins aussi importante que les températures et la force des vents (Blokpoel et Gauthier, 1975).

Bon nombre des événements du cycle annuel d'un oiseau, comme la migration, la reproduction et la mue, sont souvent déclenchés par des changements dans le photopériodisme (Murton et Westwood, 1977). Ce mécanisme de synchronisation pourrait se révéler mal adapté aux nouvelles conditions climatiques, tandis que la relation entre, d'une part, la longueur du jour et, d'autre part, les fluctuations des ressources alimentaires, la disponibilité de l'habitat, le mouvement des masses d'air, etc. se défait parce que ces derniers facteurs se mettent à changer sans que la longueur du jour change de façon correspondante.

L'importance des vasières côtières comme haltes migratoires pour les oiseaux de rivage a déjà été mentionnée (« Changements dans la distribution des habitats - vasières côtières »), et les vasières les plus importantes du Canada ont été répérées. La destruction de ces sites pourrait être catastrophique pour les oiseaux de rivage, à moins qu'ils puissent être remplacés par d'autres sites, mais il ne semble pas exister de sites candidats aussi propices. Cependant, du côté positif, la plupart des oiseaux de rivage qui passent par la baie de Fundy à l'automne utilisent d'autres voies migratoires dans le centre du continent au printemps. Certains des sites qu'ils fréquentent au printemps, comme les lacs Quill en Saskatchewan (Alexander *et al.*, 1996), pourraient aussi être utilisés à la place de la baie de Fundy à l'automne. Toutefois, si la sécheresse tendait à sévir dans les prairies canadiennes et dans les Grandes Plaines, comme le prévoient la plupart des modèles (Mc.G. Tegart *et al*., 1990), on assisterait à une baisse de la quantité et peut-être de la qualité des aires de repos. En outre, l'élévation des températures et de la salinité des eaux dans les milieux humides restants des prairies pourrait bien entraîner un accroissement de la fréquence et de la gravité des épizooties, particulièrement du botulisme et du choléra aviaire (Wobeser, 1994), ce qui aurait des impacts potentiellement importants sur les oies, les canards et les oiseaux de rivage.

Bien que l'abandon de la voie migratoire côtière au profit d'une voie continentale puisse sembler peu probable, on a récemment démontré que les oiseaux pouvaient changer leurs habitudes migratoires très rapidement à la suite de changements dans les ressources; par exemple, plusieurs espèces de canards plongeurs ont changé de voies migratoires et d'aires d'hivernage en Europe et en Amérique du Nord pour profiter de la colonisation des eaux intérieures par la moule zébrée, *Dreissena polymorpha* (Wormington et Leach, 1992; Stanczykowska *et al.*, 1990).

Les oies qui nichent dans l'Arctique sont affectées par les pratiques agricoles dans leurs aires de repos printanières des provinces des Prairies et du nord des États-Unis. Les oies des neiges qui migrent vers le nord accumulent des réserves de graisse pour la reproduction en se nourrissant de résidus de maïs et d'autres céréales dans les prairies canadiennes; le temps qu'il a fait au moment des récoltes au cours de l'automne précédent peut affecter la quantité d'aliments laissés dans les champs pour l'hiver, dont pourront bénéficier les oies en migration vers le nord le printemps suivant (Alisauskas et Ankney, 1992). Selon Davies et Cooke (1983), les conditions d'humidité du sol au printemps peuvent influer, à ce moment, sur l'apport de glucides et l'accumulation de graisse chez les oies au printemps en déterminant le début et la vitesse de la nouvelle croissance végétale. Alisauskas et Ankney (1992) ont observé que les oies des neiges qui se trouvent dans des aires de repos cultivées au printemps se nourrissent largement de résidus de maïs laissés au sol l'automne précédent et non pas de plantes vertes. Les plantes qui poussent au printemps sont probablement importantes dans les aires de repos qui se trouvent au nord des terres intensivement cultivées et dans les aires de reproduction.

Liens internationaux

Bon nombre d'oiseaux de rivage qui migrent vers le nord au printemps font en sorte d'arriver dans la baie de la Delaware au moment de la ponte des limules pour s'y nourrir des oeufs riches en éléments nutritifs pondus par ces arthropodes sur le rivage. Ainsi, la baie de la Delaware joue au printemps dans le cycle vital des oiseaux de rivage migrateurs un rôle semblable à celui de la baie de Fundy à l'automne; c'est une halte migratoire essentielle où les oiseaux accumulent des réserves d'énergie pour poursuivre leur long voyage (Lester et Myers, 1989). Si le changement climatique venait modifier la période de migration des oiseaux de rivage ou le moment de la ponte chez les limules, ces deux événements ne seraient plus synchronisés et il pourrait en résulter des conséquences graves pour les oiseaux de rivage.

Les espèces migratrices soulignent le fait que le changement climatique est un phénomène planétaire dont les causes et les conséquences débordent de beaucoup le cadre des frontières nationales. On peut donner l'exemple, qui n'a pas encore d'équivalent dans les Amériques, de la fauvette grisette, un oiseau migrateur de l'ancien monde qui a connu un déclin en Europe. Ce petit oiseau chanteur insectivore a déjà été l'une des espèces les plus communes de la campagne anglaise. Il hiverne dans le Sahel en Afrique de l'Ouest, région qui a connu une grave sécheresse dans les années 70. Bon nombre de fauvettes grisettes ont dû mourir dans les conditions arides qui ont duré plusieurs années, parce qu'elles ne sont pas revenues en Europe et que les populations nicheuses sont demeurées inférieures à celles qui existaient avant la sécheresse (Winstanley *et al.*, 1974; Elkins, 1983).

Événements extrêmes

Les tempêtes peuvent en tout temps avoir des effets néfastes sur les oiseaux. Les coups de froid à la fin du printemps entraînent souvent une mortalité importante chez les petits oiseaux (voir « Changements dans la distribution des populations »), et les tempêtes estivales peuvent tuer des oiseaux de rivage dans leurs aires de reproduction (Morrison, 1975). Les observations de ce type

d'événements extrêmes sont habituellement descriptives, et on connaît mal le rôle qu'ils peuvent jouer dans la détermination des niveaux des populations à long terme.

Dans le cas des oies nichant dans l'Arctique, il y a cependant des cas bien documentés montrant l'impact de froids hivernaux extrêmes. Dans le sud des États-Unis, les vagues de froid rendent moins disponibles la végétation verte des champs labourés et en chaume et poussent ainsi les oies des neiges hivernantes vers les pâturages, les jachères ou leur habitat ancestral, les marais côtiers (Alisauskas *et al.*, 1988). Plus grave encore, durant le très froid hiver de 1976-1977, les deux tiers des 125 000 bernaches cravants qui hivernaient sur la côte atlantique des États-Unis sont mortes de faim et de froid (Rogers, 1979). Le résultat le plus important de ce désastre a toutefois été un impact positif sur les survivants. Le gel les ayant chassées de leur aire d'alimentation habituelle de la zone intertidale où elles se nourrissaient de zostères et d'autres algues, elles ont gagné l'intérieur pour se nourrir de graminées courtes sur les terrains d'aviation, les terrains de golf et les pelouses des banlieues. Leurs descendants ont aujourd'hui pris l'habitude de gagner les prairies de l'intérieur à herbe courte à la fin de l'hiver, quand les ressources alimentaires de l'estran sont épuisées. Il y a d'autres exemples européens de changements durables dans la distribution des oiseaux dus à des déplacements causés par des conditions météorologiques exceptionnellement mauvaises. Par exemple, durant le froid hiver de 1978-1979, environ 5 000 bernaches du Canada de la population nicheuse de Suède se sont rendues dans le nord de l'Allemagne pour la première fois. Il s'en est suivi qu'environ 3 000 à 4 000 bernaches continuent d'hiverner en Allemagne chaque année (Prokosch, 1991).

***Approches et options d'adaptation***

Les populations d'espèces sauvages qui sont le plus probablement menacées par le changement et la variabilité climatiques sont celles qui subissent déjà l'influence néfaste d'autres facteurs. Parmi les aires de repos des oiseaux de rivage migrateurs, la baie de la Delaware est déjà menacée par les développements côtiers, et les vasières de la baie de Fundy le sont par les changements dans les régimes des marées découlant de l'endiguement de cours d'eau ainsi que par la récolte des vers d'appât (le polychète *Glycera dibranchiata*) (Percy *et al.*, 1996). On a fait beaucoup pour protéger d'importantes haltes migratoires des oiseaux de rivage dans le cadre du Pogramme du Réseau de réserves d'oiseaux de rivage de l'hémisphère occidental (Myers *et al.*, 1987), mais toute stratégie de conservation fondée sur la protection d'aires particulières se butera à des problèmes. En effet, en raison du changement des conditions climatiques, les zones protégées ne pourront plus abriter les espèces, les habitats et les communautés qu'elles devaient préserver (Peters et Darling, 1985; Lester et Myers, 1989).

Dans le pire des cas, c'est-à-dire quand les populations déclinent de façon marquée et se trouvent nettement menacées d'extinction, les activités de gestion devront pour réussir devenir beaucoup plus interventionnistes. Selon Peters et Darling (1985), on devrait considérer sérieusement les options suivantes : instauration de zones protégées plus nombreuses, plus grandes et reliées par des corridors; programmes de transplantation; reproduction sélective des segments de population les mieux adaptés au nouveau climat; et entreposage hors site de matériel génétique, ce qui donnerait lieu à une « écologie de sauvetage » de plus en plus interventionniste. On pourrait aussi protéger des zones clés futures, comme les zones qui seront probablement inondées, et procéder à

des aménagements à l'échelle des paysages de façon à ce que les activités humaines comme l'agriculture et la foresterie puissent s'harmoniser avec les considérations générales touchant les habitats.

***Lacunes des connaissances***

Les chercheurs s'intéressent depuis relativement peu de temps aux impacts du climat (on peut cependant donner les exemples de James, 1970; et James et Shugart, 1974). Au Canada, l'atelier sur le changement climatique et les espèces sauvages organisé par le Service canadien de la faune en 1989 (Service canadien de la faune, 1989) n'a pas entraîné de changements notables dans les politiques et les priorités de recherche. Bien qu'on ait traité largement des effets des *conditions météorologiques* - particulièrement des événements extrêmes - dans la littérature, personne n'a tenté de faire une synthèse de ces informations disparates en vue d'une évaluation des impacts globaux du *climat*. Les informations demeurent éparses. Il est dans un premier temps absolument nécessaire de les intégrer pour être en mesure d'élaborer une stratégie de recherche. Le fait que le climat doive être inclus dans tout modèle visant à expliquer la dynamique des populations de quelque espèce que ce soit n'est pas encore largement accepté par les biologistes des populations, malgré les nombreux exemples présentés dans ce chapitre. Si le climat a un effet important sur de nombreuses populations (comme le cas des canards des prairies le montre clairement), alors il est évident que les biologistes des espèces sauvages doivent mieux comprendre ses effets, ne serait-ce que pour améliorer les modèles de population actuels.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes qui ont révisé en tout ou en partie l'ébauche du présent chapitre et /ou qui nous ont conseillé durant la préparation de ce dernier :

- Tom Brydges, Gary Ironside, Ian Marshall et Patricia Roberts-Pichette, tous de la Direction de l'évaluation, de la surveillance et des indicateurs d'Environnement Canada;
- Don MacIver et Jennifer McKay, du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada;
- Philip Marsh, de l'Institut national de recherches hydrologiques d'Environnement Canada;
- Dean Jeffries, de l'Institut national de recherche sur les eaux d'Environnement Canada;
- Cheri Gratto-Trevor et Colleen Hyslop, du Service canadien de la faune d'Environnement Canada;
- Marty Bergmann et Henry Lear, de la Direction de la recherche sur les pêches du ministère des Pêches et des Océans du Canada;
- Albert Finnamore, du Provincial Museum of Alberta;
- David Neave, d'Habitat faunique Canada;
- Erin Neave, de Neave Resource Management.
- Nous remercions aussi Adam Fenech, de la Direction de l'évaluation, de la surveillance et des indicateurs d'Environnement Canada, qui a participé à la mise en oeuvre initiale du présent chapitre.

## RÉFÉRENCES

Aebischer, N.J., Coulson, J.C. et Colebrook, J.M. (1990). Parallel long-term trends across four marine trophic levels and weather, *Nature*, 347:753-755.

Alexander, S.A., Hobson, K.A., Gratto-Trevor, C.L. et Diamond, A.W. (1996). Conventional and isotopic determinations of shorebird diets at an inland stopover: the importance of invertebrates and *Potamogeton pectinatus* tubers, *Canadian Journal of Zoology*, 74:1057-1068.

Alisauskas, R.T. et Ankney, C.D. (1992). Spring habitat use and diets of midcontinent adult lesser snow geese, *Journal of Wildlife Management*, 56(1):43-54.

Alisauskas, R.T., Ankney, C.D. et Klaas, E.E. (1988). Winter diets and nutrition of midcontinental lesser snow geese, *Journal of Wildlife Management*, 52(3):403-414.

Allard, M., Tremblay, C., Pilon, J.A. et Frydecki, J. (1993). « Quaternary geology and geocryology in Nunavik, Canada », dans *Proceedings, Sixth International Conference on Permafrost*, Beijing (Chine).

Amey, K.D. (1997). *Seabirds as indicators of changes in marine food webs and recruitment to commercial fish stocks*, Progress Report, Atlantic Cooperative Wildlife Ecology Research Network, Université du Nouveau-Brunswick, Fredericton (N.-B.), 32 p.

Anderson, P.M., Bartlein, P.J., Brubaker, L.B., Gajewski, K. et Ritchie, J.C. (1989). Modern analogues of late-Quaternary pollen spectra from the western interior of North America, *Journal of Biogeography*, 16:573-596.

Angermeier, P.L. (1994). Does biodiversity include artificial diversity?, *Conservation Biology*, 8(2):600-602.

Angermeier, P.L. et Karr, J.R. (1994). Biological integrity versus biological diversity as policy directives: Protecting biotic resources, *Bioscience*, 44(10):690-697.

Archambault, S. et Bergeron, Y. (1992). An 802-year tree-ring chronology from the Quebec boreal forest, *Canadian Journal of Forest Research*, 22:674-682.

Arseneault, D. et Payette, S. (1992). A postfire shift from lichen-spruce to lichen-tundra vegetation at tree-line, *Ecology*, 73:1067-1081.

Barker, J.R. et Tingey, D.T. (dir.) (1992). *Air pollution effects on biodiversity*, Van Nostrand Reinhold, New York (N.Y.), 322 p.

Barry, T.W. (1962). Effect of late seasons on Atlantic Brant reproduction, *Journal of Wildlife Management*, 26 :19-26.

Batt, B.D.J., Anderson, M.G.eterson, C.D. et Caswell, F.D. (1989). « The use of prairie potholes by North American ducks », dans *Northern Prairie Wetlands*, Van der Valk, A. (dir.), Ames, Iowa State University Press, p. 204-227.

Bauret, M.R. (1996). Genetic diversity and ecotypic differentiation in arctic and alpine populations of Polygonum viviparum, *Arctic and Alpine Research*, 28:190-195.

Beaubien, E.G. (1993). « Plant phenology: bioindicator for climate change », dans *Proceedings of the Third Prairie Conservation and Endangered Species Workshop, held in Brandon, Manitoba,* G.L. Holroyd, H.L. Dickson, M. Regnier et H.C. Smith (dir.), Occasional Paper No. 19, Provincial Museum of Alberta, Natural History, Edmonton (Alb.), p. 89-92.

Beaubien, E.G. (1997). « Plantwatch: Tracking the biotic effects of climate change using students and volunteers. Is spring arriving earlier on the prairies? », dans *Proceedings, 3rd National Science Meeting, Ecological Monitoring and Assessment Network,* Saskatoon (Sask.), janvier 1997, Environnement Canada, Burlington (Ont.).

Beckmann, L., Dunn, M. et Moore, K. (1997). « Effects of climate change on coastal systems in British Columbia and Yukon », *Responding to global climate change in British Columbia and Yukon, Vol. I, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation,* E. Taylor et B. Taylor (dir.), British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks et Environnement Canada, Vancouver (C.-B.), p. 8-1 à 8-26.

Benjamin, N. et Diamond, A.W. (1996). *Assessment of effects of heavy metals on common loons (*Gavia immer*) breeding in the Maritimes*, Progress Report, Atlantic Cooperative Wildlife Ecology Research Network, Université du Nouveau-Brunswick, Fredericton (N.-B.), 16 p.

Bennett, K.D. (1990). Milankovitch cycles and their effects on species in ecological and evolutionary time, *Paleobiology*, 16:11-21.

Bergeron, Y. et Archambault, S. (1993). Decreasing frequency of forest fires in the southern boreal zone of Québec and its relation to global warming since the end of the « Little Ice Age », *The Holocene*, 3:255-259.

Bethke, R.W. et Nudds, T.D. (1995). Effects of climate change and land use on duck abundance in Canadian prairie-parklands, *Ecological Applications*, 5(3):588-600.

Billington, N. et Hebert, P.D.N. (dir.) (1991). International symposium on « The ecological and genetic implications of fish introductions », *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48 (supplément 1), 181 p.

Biodiversity Science Assessment Team (1994*). Biodiversity in Canada: a science assessment for Environment Canada*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 245 p.

Bird, J.B. (1967). *The physiography of arctic Canada*, The Johns Hopkins Press, Baltimore (Md.), 336 p.
Blokpoel, H. et Gauthier, M. (1975). Migration of lesser snow and blue geese, Part 2, Influence of the weather and prediction of major flights, *Canadian Wildlife Service Report Series*, No. 32, 29 p.

Borowik, O.A. et Engstrom, M.D. (1993). Chromosomal evolution and biogeography of collared lemmings (*Dicrostonyx*) in the eastern and High Arctic of Canada, *Canadian Journal of Zoology*, 71:1481-1494.

Box, E.O. (1981). *Macroclimate and Plant Forms: An Introduction to Predictive Modeling in Phytogeography*, Dr. W. Junk Publishers, La Haye (Pays-Bas), 258 p.

Boyd, H. (1981). Prairie dabbling ducks 1941-1990, *Canadian Wildlife Service Progress Notes* 119, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), 9 p.

Boyd, H. (1982). Influence of temperature on arctic-nesting geese, *Aquila*, 89:259-269.

Boyd, H. (1985). The large-scale impact of agriculture on ducks in the prairie provinces, *Canadian Wildlife Service Progress Notes* 149, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), 13 p.

Boyd, H. (1987). Do June breeding temperatures affect the breeding success of Dark-bellied Brent Geese?, *Bird Study*, 34:155-159.

Boyd, H. (1988). *Impact of climate change on arctic-nesting geese*, rapport inédit du Service canadien de la faune, SCF, Whitehorse (Yn).

Bradstreet, M.S.W. et Cross, W.E. (1982). Trophic relationships at high arctic ice edges, *Arctic*, 35:1-12.

Brander, K.M. (1995). The effects of temperature on growth of Atlantic cod (*Gadus morhua L.*), *ICES Journal of Marine Science*, 52:1-10.

Brown, D.A. (1997, sous presse). « Wetland gas production — effect of climate change on the microbial ecology », dans Actes du *Symposium on Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, tenu en avril 1997 à Oak Hammock Marsh (Man.).

Brown, R.G.B. (1991). « Marine birds and climatic warming in the northwest Atlantic », dans *Canadian Wildlife Service Special Publication No. 68*:49-54.

Brown, R.G.B. et Nettleship, D.N. (1984). « The seabirds of northeastern North America: their present status and conservation requirements », dans *Status and conservation of the world's seabirds*, J.P. Croxall, P.G.H. Evans et R.W. Schreiber (dir.), International Council for Bird Preservation Technical Publication No. 2, Cambridge (G.-B.), p. 85-100.

Bryson, R.A. (1966). Air masses, streamlines, and the boreal forest, *Geographical Bulletin*, 8:228-269.

Burke, I.C., Yonker, C.M., Parton, W.J., Cole, C.V., Flach, K. et Schimel, D.S. (1989). Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soils, *Soil Science Society of America Journal*, 53:800-805.

Byrkjedal, I. (1980). Nest predation in relation to snow cover — a possible factor influencing the starting of breeding in shorebirds, *Ornis Scandinavica*, 11:249-252.

Campana, S.E., Mohn, R.K., Smith, S.J. et Chouinard, G. (1995). Spatial visualization of a temperature-based growth model for Atlantic cod (*Gadus morhua*) off the eastern coast of Canada, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52:2445-2456.

Campbell, I.D. et McAndrews, J.H. (1993). Forest disequilibrium caused by rapid Little Ice Age cooling, *Nature*, 366:336-338.

Carpenter, S.R., Chisholm, S.W., Krebs, C.J., Schindler, D.W. et Wright, R.F. (1995). Ecosytem experiments, *Science*, 269:324-327.

Chapin III, F.S., Jeffries, R.L., Reynolds, J.F., Shaver, G.R. et Svoboda, J. (1992). « Arctic plant physiological ecology in an ecosystem context », dans *Arctic Ecosystems in a Changing Climate, An Ecophysiological Perspective*, F.S. Chapin III, R.L. Jeffries, J.F. Reynolds, G.R. Shaver, J. Svoboda et E.W. Chu (dir.), Academic Press, Inc., San Diego (Ca.), p. 441-451.

Chapin III, F.S. et Korner, C. (1994). Arctic and alpine biodiversity: patterns, causes and ecosystem consequences, *Trends in Ecology and Evolution*, 9:45-47.

Chapin III, F.S., Jefferies, R.L., Reynolds, J.F., Shaver, G.R. et Svoboda, J. (1992). *Arctic Ecosystems in a Changing Climate, An Ecophysiological Perspective*, Academic Press, San Diego (Ca.), 469 p.

Clair, T., Beltaos, S., Brimley, W. et Diamond, A. (1997). « Climate change sensitivities of Atlantic Canada's hydrological and ecological systems », dans *Climate change and climate variability in Atlantic Canada, Vol. VI, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, R.W. Shaw (dir.), Environnement Canada, région de l'Atlantique, Bedford (N.-É.), p. 59-77.

Clark, J.S. (1991). « Ecosystem sensitivity to climate change and complex responses », dans R.L. Wyman (dir.), *Global climate change and life on earth*, Routledge, Chapman and Hall, Inc., New York (N.Y.), p. 65-98.

Cohen, S.J. (1997). *Mackenzie Basin Impact Study Final Report*, Summary of Results, Environnement Canada, 20 p.

COHMAP Members (Members of the Cooperative Holocene Mapping Project) (1988). Climatic changes of the last 18,000 years: observations and model simulations, *Science*, 241:1043-1052.

Connell, J.H. (1978). Diversity in tropical rain forests and coral reefs, *Science*, 199:1302-1310.

Conover, R.J. (1995). Climate, copepods and cod — some thoughts on the long-range prospects for a sustainable northern cod fishery, *Climate Research*, 23:69-82.

Conover, R.J., Herman, A.W., Prinsenberg, S.J. et Harris, L.R. (1986). Distribution of and feeding by the copepod Pseudocalamus under fast ice during the arctic spring, *Science*, 232:1245-1247.

Conseil des ministres de la Faune du Canada (1990). *A wildlife policy for Canada*, disponible auprès du Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 29 p.

Cook, E.R. et Cole, J. (1991). On predicting the response of forests in eastern North America to future climatic change, *Climatic Change*, 19:271-282.

Cook, E.R. et Mayes, P. (1987). « Decadal-scale patterns of climatic change over eastern North America inferred from tree rings », dans *Abrupt Climate Change: Evidence and Implications*, W.H. Berger et L.D. Labeyrie (dir.), Reidel Publishing Company, Dordrecht (Pays-Bas), p. 61-66.

Cooke, F. (1987). « Lesser snow goose: a long term study », chap. 13 dans *Avian Genetics*, F. Cooke et P.A. Buckley (dir.), Academic Press, New York (N.Y.), p. 407-432.

Crawford, H.S., Titterington, R.W. et Jennings, D.T. (1983). Bird predation and spruce budworm populations, *Journal of Forestry*, 81:433-435.

Crossman, E.J. (1991). Introduced freshwater fishes: a review of the North American perspective with emphasis on Canada, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48 (supplément 1):46-57.

Crowley, T.J. et North, G.R. (1988). Abrupt climate change and extinction events in earth history, *Science*, 240:1002.

Currie, D.J. (1991). Energy and large scale patterns of animal and plant species richness, *American Naturalist*, 137:27-49.

Danks, H.V. (1992). Arctic insects as indicators of environmental change, *Arctic*, 45:159-166.

Dansgaard, W., White, J.W.C. et Johnsen, S.J. (1989). The abrupt termination of the Younger Dryas climate event, *Nature*, 339:532-534.

Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjornsdottir, A.E., Jouzel, J. et Bond, G. (1993). Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, *Nature*, 364:218-220.

D'Arrigo, R.D. et Jacoby, G.C. (1993). Tree growth-climate relationships at the northern boreal forest tree line of North America: evaluation of potential response to increasing carbon dioxide, *Global Biogeochemical Cycles*, 7:525-535.

Davies, J.C. et Cooke, F. (1983). Annual nesting productivity in snow geese: prairie droughts and arctic springs, *Journal of Wildlife Management*, 47:291-296.
Davis, M.B. (1981). « Quarternary history and the stability of plant communities », dans *Forest Succession: Concepts and Applications*, D.C West, H.H. Shugart et D.B. Botkin (dir.), Springer-Verlag, Berlin (Allemagne), p. 132-153.

Davis, M.B., Woods, K.D., Webb, S.L. et Futyama, D. (1986). Dispersal versus climate: expansion of *Fagus* and *Tsuga* into the Upper Great Lakes Region, *Vegetatio*, 67:93-103.

de Cárdenas, E. (1996). Some considerations about annual growth rate variations in cod stocks, *NAFO Science Council Studies*, *24*:97-107.

Derocher, A.E. et Stirling, I. (1995). Mark-recapture estimation of polar bear population size and survival rates in western Hudson Bay, *Journal of Wildlife Management*, 59:215-221.

de Young, B. et Rose, G.A. (1993). On recruitment and distribution of Atlantic cod (*Gadus morhua*) off Newfoundland, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50:2729-2741.

Dhondt, A.A. (1987). Cycles of lemmings and Brent Geese *Branta b. bernicla*: a comment on the hypothesis of Roselaar and Summers, *Bird Study*, 34:151-154.

Diamond, A.W. (1990). « Wildlife as biological indicators for assessing impacts of climate change », dans *Climate change: implications for water and ecological resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 225-233.

Diamond, A.W. (1993). « Integration of ecological and biodiversity concerns into sustainable land management », dans *Sustainable land management for the 21st century* R.C. Wood et J. Dumanski (dir.), Agricultural Institute of Canada, Ottawa (Ont.), p. 179-187.

Diamond, A.W. et Brace, R.K. (1991). « Climate and waterfowl populations », dans *Symposium on impacts of climatic change and variability on the Great Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 245-257.

Dillon, P.J. et LaZerte, B.D. (1992). Response of the Plastic Lake catchment, Ontario, to reduced sulphur deposition, *Environmental Pollution*, 77:211-217.

Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C. et Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems, *Science*, 263:185-190.

Dorale, J.A., Gonzalez, L.A., Reagan, M.K., Pickett, D.A., Murrell, M.T. et Baker, R.G. (1992). A high-resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from Cold Water Cave, northeast Iowa, *Science*, 258:1626-1630.

Douglas, M.S.V., Smol, J.P. et Blake Jr., W. (1994). Marked post-18th century environmental change in high-Arctic ecosystems, *Science*, 266:416-419.

Drinkwater, K.F. (1997). « Impacts of climate variability on Atlantic Canadian fish and shellfish stocks », dans *Climate change and climate variability in Atlantic Canada, Vol. VI, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, R.W. Shaw (dir.), Environnement Canada, région de l'Atlantique, Bedford (N.-É.), p. 21-34.

Dunbar, M.J. (1973). On the west Greenland sea-life area of the Atlantic salmon, *Arctic*, 26:3-6.

Dunbar, M.J. (1976). Climatic change and northern development, *Arctic*, 29:183-193.

Dunbar, M.J. (1985). « Sea ice and climatic change in the Canadian Arctic since 1800 », dans C.R. Harington (dir.), *Climatic change in Canada — 5*, Syllogeus No. 55, Musée national des sciences naturelles, Ottawa (Ont.), p. 107-119.

Dunbar, M.J. et Thompson, D.H. (1979). West Greenland salmon and climatic change, *Meddeleser om Gronland*, 202:5-19.

Ekman, S. (1967). *Zoogeography of the sea*, London : Sidgwick and Jackson, 417 p.

Elkins, N. (1983). *Weather and bird behaviour*, Calton Staffordshire, Poyser (G.-B.), 239 p.

Environnement Canada (1994). *Sustaining Marine Resources: Pacific Herring Fish Stocks*. Environmental Indicator Bulletin, SOE Bulletin No. 94-5, State of the Environment Directorate, Ottawa (Ont.), 6 p.

Environnement Canada (1995). *L'état du climat au Canada : la surveillance de la variabilité et du changement climatique*, rapport sur l'état de l'environnement n° 95-1, 52 p.

Environment Canada (s.d.). *The Ecological Monitoring and Assessment Network (EMAN): What It Is, How It Works, and Why We Need It*, Ecological Monitoring and Coordinating Office, Environnement Canada, Burlington (Ont.).

Erskine, A.Y. (1978). The first ten years of the cooperative Breeding Bird Survey in Canada, *Canadian Wildlife Service Report Series* No. 42, 61 p.

Etkin, D.A. (1991). Winter and summer surface air temperature trends in the Northern Hemisphere: 1950 to 1988, *Climatological Bulletin*, 25(3):182-193.

Fahrig, L. et Merriam, G. (1994). Conservation of fragmented populations, *Conservation Biology*, 8:50-59.

Flannigan, M.D. et Van Wagner, C.E. (1991). Climate change and wildfire in Canada, *Canadian Journal of Forest Research*, 21:66-72.

Flenley, J.R. (1979). The late quaternary vegetational history of the equatorial mountains, *Progress in Physical Geography*, 3:488-509.

Flickinger, E.L. (1981). Weather conditions associated with beginning of northward migration departures of snow geese, *Journal of Wildlife Management*, 45 :516-520.

Flohn, H. (1979). « Can climate history repeat itself? Possible climate warming and the case of paleo-climatic warm phases », dans *Man's impact on climate*, W. Bach, J. Pankrath et W.W. Kellogg (dir.), Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), p. 15-28.

Flohn, H. (1987). « Air-sea interaction processes as models for abrupt climatic changes », dans *Abrupt Climate Change: Evidence and Implications*, W.H. Berger et L.D. Labeyrie (dir.), Reidel Publishing Company, Dordrecht (Pays-Bas), p. 23-30.

Formozov, A.N. (1946). *Snow cover as an integral factor of the environment and its importance in the ecology of mammals and birds*, Occasional Publications 1, Boreal Institute for Northern Studies, Université de l'Alberta, Edmonton (Alb.), 175 p.

Fox, A.D., Gitay, H. et Boyd, H. (1990). Snow-patch foraging by pink-footed geese, *Anser brachyrhynchus* in south Iceland, *Holarctic Ecology*, 14 :81-84.

Frank, K.T., Carscadden, J.E. et Simon, J.E. (1996). Recent excursions of capelin (*Mallotus villosus*) to the Scotian Shelf and Flemish Cap during anomalous hydrographic conditions, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53:1473-1486.

Franklin, J.F. (1993). Preserving biodiversity: species, ecosystems, or landscapes*?*, *Ecological Applications*, 3:202-205.

Gibbs, H.L., Weatherhead, P.J. et Boag, P.T. (1990). Realized reproductive success of polygnous red-winged blackbirds revealed by DNA markers, *Science*, 250:1394-1397.

Giles, B.E. (1994). Genetic biodiversity: analysing the data, *Trends in Ecology and Evolution*, 9:317-319.

Gouvernement du Canada (1991). *The Federal Policy on Wetland Conservation*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 14 p.

Graumlich, L.J. (1994). « Long-term vegetation change in mountain environments, paleoecological insights into modern vegetation dynamics », dans *Mountain Environments in Changing Climates*, M. Bensiton (dir.), Routledge, Londres (G.-B.), p. 167-179.

Green, G.H., Greenwood, J.J.D. et Lloyd, C.S. (1977). The influence of snow conditions on the date of breeding of wading birds in north-east Greenland, *Journal of Zoology* (London), 183:311-328.

Grewe, P.M et Hebert, P.D.N. (1988). Mitochondrial DNA diversity among broodstocks of the lake trout, *Salvelinus namaycush, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45:2114-2122.

Groot, C. et Quinn, T.P. (1987). Homing migration of Sockeye Salmon, *Oncorhynchys nerka*, to the Fraser River, *Fisheries Bulletin*, 85:455-469.

Hall, J.P. (1995). Forest Health Monitoring in Canada: How Healthy is the Boreal Forest?, *Water, Air and Soil Pollution*, 82(1/2):77-85.

Hansen, H.A. et McKnight, D.E. (1964). « Emigration of drought-displaced ducks to the Arctic », *Transactions of the 29th North American Wildlife and Natural Resources Conference*, p. 119-127.

Hare, F.K. et Ritchie, J.C. (1972). The boreal bioclimates, *Geographical Review*, 62:333-365.

Harris, M.P. et Wanless, S. (1989). The breeding biology of Razorbills *Alca torda* on the Isle of May, *Bird Study*, 36:105-114.

Harte, J. et Shaw, R. (1995). Shifting dominance within a montane vegetation community: results of a climate-warming experiment, *Science*, 267:876-880.

Hartl, D.L. (1988). *A primer of population genetics*, 2e éd., Sinauer Associates, Sunderland (Mass.), 305 p.

Hebert, P.D.N. et Hann, B.J. (1986). Patterns in the composition of arctic tundra pond microcrustacean communities, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43:1416-1425.

Henny, C.J., Blus, L.J. et Satfford, C.J. (1982). DDE not implicated in cliff swallow *Petrochelidon pyrrhonata* mortality during severe spring weather in Oregon, *Canadian Field-Naturalist*, 96:210-211.

Hicklin, P.W. et Smith, P.C. (1984). Selection of foraging sites and invertebrate prey by migrant semipalmated sandpipers *Calidris pusilla* (Pallas) in the Bay of Fundy, *Canadian Journal of Zoology*, 62:2201-2210.

Hobbs, R.J. et Huenneke, L.F. (1992). Disturbance, diversity, and invasion: implications for conservation, *Conservation Biology*, 6:324-337.

Hochbaum, H.A. (1955). *Travels and traditions of waterfowl*, University of Minnesota Press, Minneapolis (Minn.), 301 p.

Hoffert, M.I. et Covey, C. (1992). Deriving global climate sensitivity from paleoclimate reconstructions, *Nature*, 360:573-576.

Hogg, E.H. (1994). Climate and the southern limit of the western Canadian boreal forest, *Canadian Journal of Forest Research*, 24:1835-1845.

Holdridge, L.R. (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data, *Science*, 105:367-368.

Holling, C.S. (1988). Temperate forest outbreaks, tropical deforestation and migratory birds, *Memoirs of Entomological Society of Canada*, 146:21-32.

Holling, C.S., Schindler, D.W., Walker, B.W. et Roughgarden, J. (1995). « Biodiversity in the functioning of ecosystems: an ecological analysis », chap. 2, dans *Biodiversity loss: economic and ecological issues*, C.A. Perrings, K.-G. Maler, C. Folke, C.S. Holling et B-O. Jannson (dir.), Cambridge University Press, New York (N.Y.), p. 44-83.

Holmes, R.T. (1966). Feeding ecology of the Red-backed Sandpiper (*Claidris alpina*) in arctic Alaska, *Ecology*, 47:32-45.

Hoyt, J. (1996). *The effects of climate and food availability on breeding phenology and success of tree swallows* Tachyncineta bicolor *in southern Saskatchewan*, thèse de licence ès sciences, Dépt. de Biologie, Université du Nouveau-Brunswick (N.-B.), 52 p.

Huntley, B. et Webb, T. (1989). Migration: "species" response to climatic variations caused by variations in the earth's orbit, *Journal of Biogeography*, 16:5-19.

Huston, M. (1979). A general hypothesis of species diversity, *American Naturalist*, 113:81-101.

Innes, J.L. (1991). High-altitude and high-latitude tree growth in relation to past, present and future global climate changes, *Holocene*, 1:168-173.

GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1990). *Scientific Assessment of Climate Change*, Report prepared for GIEC by Working Group I, World Meteorological Organization, Genève (Suisse).

GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996a). *GIEC Second Assessment. Climate Change 1995*, World Meteorological Organization et United Nations Environment Program, 64 p.

GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996b). *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses,* R.T. Watson, M.C. Zinyowera et R.H. Moss (dir.), Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (Angleterre), 879 p.

Jacoby, G.C. et D'Arrigo, R.D. (1995). Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska, *Global Biogeochemical Cycles*, 9:227-234.

James, F.C. (1970). Geographic variation in birds and its relation to climate, *Ecology*, 51:365-390.

James, F.C. et Shugart, H.H. (1974). The phenology of the nesting season of the American Robin (*Turdus migratorius*) in the United States, *Condor*, 76:159-168.

Jefferies, R.L., Gadallah, F.L., Srivastava, D.S. et Wilson, D.J. (1995). « Desertification and trophic cascades in arctic coastal ecosystems: a potential climate change scenario? », dans *Global Change and Arctic Ecosystems,* T.V. Callaghan (dir.), Actes des communications présentées à la conférence internationale, 21-26 août 1993, Oppdahl (Norvège), Office for official publication of the European Union, Luxembourg, p. 201-206.

Johnson, D.H. et Shaffer, T.L. (1987). Are mallards declining in North America?, *Wildlife Society Bulletin*, 15:340-345.

Johnson, E.A. et Fryer, G.I. (1989). Population dynamics in lodgepole pine-engelmann spruce forests, *Ecology*, 70:1335-1345.

Johnson, E.A. et Larsen, C.P.S. (1991). Climatically induced change in fire frequency in the southern Canadian rockies, *Ecology*, 72:194-201.

Kadonaga, L. (1997). « Forecasting future fire susceptibility in the Mackenzie Basin », dans *Mackenzie Basin Impact Study (MBIS) Final Report*, S.J. Cohen (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 157-165.

Katz, R.W. et Brown, B.G. (1992). Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages, *Climatic Change*, 21:289-302.

Kay, J.J. et Schneider, E.D. (1992). « Thermodynamics and measures of ecological integrity », chap. 12, dans D.H. McKenzie, D.E. Hyatt et V.J. McDonald (dir.), *Ecological Indicators,* Vol. 1, Elsevier Applied Science, New York (N.Y.), p. 159-182.

Kearney, M.S. (1982). Recent seedling establishment at timberline in Jasper National Park, Alta., *Canadian Journal of Botany*, 60(11):2283-2287.

Kehoe, P. (1994). A New Brunswick Black-legged Kittiwake, *Rissa tridactyla,* colony, *Canadian Field-Naturalist*, 108(3):375-376.

Kiel, W.H. Jr., Hawkins, A.S. et Perret, N.G. (1972). Waterfowl habitat trends in the aspen parkland of Manitoba, *Canadian Wildlife Service Report Series* No. 18, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), 61 p.

Kirk, D.A., Diamond, A.W., Erskine, A.J., Smith, A.R., Holland, G. et Chytyk, P. (1997). Population changes in boreal forest birds in Saskatchewan and Manitoba, *Wilson Bulletin*, 109(1):1-27.

Klein, R.M. et Perkins, T.D. (1988). Primary and secondary causes and consequences of contemporary forest decline, *Botanical Review*, 54:1-43.

Knox, J.C. (1993). Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate, *Nature*, 361:430-432.

Koppen, W. (1936). *Das Geographische System der Klimate*, Gerbrüder Borntrager, Berlin (Allemagne), 46 p.

Krapu, G.L. (1986). Patterns and causes of change in a cliff swallow colony during a 17-year period, *Prairie Naturalist*, 18:109-114.

Krueger, C.C. et May, B. (1991). Ecological and genetic effects of salmonid introductions in North America, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48 (supplément 1):66-77.

Lack, D. (1973). *Swifts in a tower*, London: Chapman and Hall, 239 p.

Lande, R. (1988). Genetics and demography in biological conservation, *Science*, 241:1455-1460.

Landhausser, S.M. et Wein, R.W. (1993). Postfire vegetation recovery and tree establishment at the arctic treeline: climate change-vegetation response hypotheses, *Journal of Ecology*, 81:665-672.

Larsen, J.A. (1971). Vegetational relationships with air mass frequencies: boreal forest and tundra, *Arctic*, 24:177-194.

Latham, P.J., Pearlstine, L.G. et Kitchens, W.M. (1991). Spatial distributions of the Softstem Bulrush, *Scirpus validus*, across a salinity gradient, *Estuaries*, 14:192-198.

Lenihan, J.M. et Neilson, R.P. (1995). Canadian vegetation sensitivity to projected climatic change at three organizational levels, *Climatic Change*, 30(1):27-56.

Lester, R.T. et Myers, J.P. (1989). Global warming, climate disruption, and biological diversity, *Audubon Wildlife Report*, 1989/90:177-221.

Lilly, G.R., Hop, H., Stansbury, D.E. et Bishop, C.A. (1994). *Distribution and abundance of polar cod (*Boreogadus saida*) off southern Labrador and eastern Newfoundland*, ICES CM 1994/O:6.

Lincoln, F.C. (1979). *Migration of birds*. U.S. Fish and Wildlife Service Circular 16, (éd. rév.), Department of the Interior, Washington (D.C.), 119 p.

Liu, K-B. (1990). Holocene paleoecology of the boreal forest and Great Lakes-St. Lawrence forest in northern Ontario, *Ecological Monographs*, 60:179-212.

Lock, A.R., Brown, R.G.B. et Gerriets, S.H. (1994). *Gazetteer of marine birds in Atlantic Canada*, Service canadien de la faune, région de l'Atlantique, 137 p.

Lodge, D.M. (1993). Biological invasions: lessons for ecology, *Trends in Ecology and Evolution*, 8:133-137.

Luckman, B.H. (1994). Evidence for climatic conditions between ca. 900-1300 A.D. in the southern Canadian Rockies, *Climatic Change*, 26:171-182.

MacArthur, R.H. et Wilson, E.O. (1967). *The theory of island biogeography*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), 203 p.

MacArthur, R.H. (1972). *Geographical ecology: patterns in the distribution of species*, Harper and Row, New York (N.Y.), 269 p.

MacDonald, G.M., Edwards, T.W.D., Moser, K.A., Pienitz, R. et Smol, J.P. (1993). Rapid response of treeline vegetation and lakes to past climate warming, *Nature*, 361(6409):243-246.

MacDonald, K.A. et Brown, J.H. (1992). Using montane mammals to model extinctions due to global change, *Conservation Biology*, 6:409-415.

MacInnes, C.D., Dunn, E.H., Rusch, D.H., Cooke, F. et Cooch, F.G. (1990). Advancement of goose nesting dates in the Hudson Bay region, 1951-1986, *Canadian Field-Naturalist*, 104(2):295-297.

Mackay, J.R. (1995). Active layer changes (1968 to 1993) following the forest-tundra fire near Inuvik, N.W.T., Canada, *Arctic and Alpine Research*, 27:323-336.

Malcolm, J.R. et Markham, A.D. (1996). Ecosystem resilience, biodiversity and climate change: setting limits, *Parks*, 6:38-49.

Mawhinney, K. et Sears, D. (1996). First nesting of the razorbill, *Alca torda*, in the Wolves archipelago, New Brunswick, *Canadian Field-Naturalist*, 110(4):698-700.

Mawhinney, K, Hicklin, P.W. et Boates, J.S. (1993). A re-evaluation of the numbers of migrant semi-palmated sandpipers *Calidris pusilla* in the Bay of Fundy, *Canadian Field-Naturalist*, 107(1):19-23.

Maxwell, J.B. et Barrie, L.A. (1989). Atmospheric and climatic change in the Arctic and Antarctic, *Ambio*, 18:42-49.

McAllister, D.E. et Dalton, K.W. (1992). How global warming affects species survival, *Canadian Biodiversity*, 2:7-14.

McCauley, D.E. (1991). Genetic consequences of local population extinction and recolonization, *Trends in Ecology and Evolution*, 6:5-8.

McCormick, K.J. (1988). Lesser snow goose colonies in the Pelly Lake area, *Canadian Wildlife Service Progress Note*, No. 178, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), 3 p.

McG. Tegart, W.J., Sheldon, G.W. et Griffiths, D.C. (dir.) (1990). *Climate change: the GIEC impacts assessment*, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), 365 p.

McKenzie, R.A. (1934). « Cod and water temperature », Biological Board of Canada, *Atlantic Progress Report*, No. 12, p. 3-6.

McKenzie, R.A. (1938). « Cod take smaller bites in ice-cold water », Fisheries Research Board of Canada, *Atlantic Progress Report*, No. 22, 12-14.

McNicol, D.K. et Mallory, M.L. (1994). Trends in small lake water chemistry near Sudbury, Canada, 1983-1991, *Water, Air, and Soil Pollution*, 73:105-120.

Meisner, J.D. (1990a). Effect of climatic warming on the southern margins of the native range of brook trout, *Salvelinus fontinalis*, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47:1065-1070.

Meisner, J.D. (1990b). Potential loss of thermal habitat for brook trout, due to climatic warming, in two southern Ontario streams, *Transactions of the American Fisheries Society*, 119:282-291.

Miller, F.L., Russell, R.H. et Gunn, A. (1977). Peary caribou and muskoxen on western Queen Elizabeth Islands, N.W.T. 1972-74, *Canadian Wildlife Service Report Series*, No. 40, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), 55 p.

Miller, F.L., Edmonds, E.J. et Gunn, A. (1982). Foraging behaviour of Peary Caribou in response to springtime snow and ice conditions, *Canadian Wildlife Service Report Series*, No. 48, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), 41 p.

Morrison, R.I.G. (1975). Migration and morphometrics of European Knot and Turnstone on Ellesmere Island, Canada, *Bird-Banding*, 46:290-301.

Moser, K.A. et MacDonald, G.M. (1990). Holocene vegetation change at treeline north of Yellowknife, North West Territories, Canada, *Quaternary Research*, 34:227-239.

Murphy, R.C. (1936). *Oceanic birds of South America*, Macmillan, New York (N.Y.), pages div.

Murton, R.K. et Westwood, N.J. (1977). *Avian breeding cycles*, Clarendon Press, Oxford (G.-B.), 594 p.

Myers, J.P., Morrison, R.I.G., Antas, P.Z., Harrington, B.A., Lovejoy, T.E., Sallaberry, M., Senner, S.E. et Tarak, A. (1987). Conservation strategy for migratory species, *American Scientist*, 75:19-26.

Myers, N. (1995). Environmental unknowns, *Science*, 269:358-360.

Myers, N. (1993). Environmental refugees in a globally warmed world, *Bioscience*, 43:752-761.

Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. et Nemani, R.R. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991, *Nature*, 386 (6626):698-702.

Naeem, S., Hakansson, K., Lawton, J.H. et Thompson, L.J. (1996). Biodiversity and plant productivity in a model assemblage of plant species, *Oikos*, 76:259-264.

Naeem, S., Thompson, L.J., Lawler, S.P., Lawton, J.H. et Woodfin, R.M. (1994). Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems, *Nature*, 368:734-737.

Narayanan, S., Carscadden, J., Dempson, J.B., O'Connell, M.F., Prinsenberg, S., Reddin, D.G. et Shackell, N. (1995). « Marine climate off Newfoundland and its influence on Atlantic salmon (*Salmo salar*) and capelin (*Mallotus villosus*) », dans *Climate Change and Northern Fish Populations*, Beamish, R.J. (dir.), Canadian Special Publication in Fisheries and Aquatic Science No. 121, National Research Council, Ottawa (Ont.), p. 461-474.

Natural Resources Canada (1995). *Canada Permafrost*, planche 2.1, dans The National Atlas of Canada, 5$^{e}$ éd., MCR 4177, Ottawa.

Nelson, H.K., Streeter, R.G. et McQuaig, J.D. (1991). « Accomplishments of the North American Waterfowl Management Plan », *Transactions of the 56$^{th}$ North American Wildlife and Natural Resources Conference*, p. 439-452.

Noss, R.F. (1990a). Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach, *Conservation Biology*, 4:355-364.

Noss, R.F. (1990b). Can we maintain biological and ecological integrity?, *Conservation Biology*, 4:241-243.

Oechel, W.C., Hastings, S.J., Vourlitis, G., Jenkins, M., Riechers, G. et Grulke, N. (1993). Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source, *Nature*, 361:520-523.

Owens, R.A. et Myres, M.T. (1973). Effects of agriculture upon populations of native passerine birds of an Alberta fescue grassland, *Canadian Journal of Zoology*, 51:697-713.

Parmesan, C. (1996). Climate and species' range, *Nature*, 382:765-766.

Pastor, J. (1996). Unsolved problems of boreal regions, *Climatic Change*, 33:343-350.

Payette, S., Filion, F., Delwaide, A. et Begin, C. (1989a). Reconstruction of tree-line vegetation response to long-term climate change, *Nature*, 341:429-432.

Payette, S., Morneau, C., Sirois, L. et Desponts, M. (1989b). Recent fire history of the northern Québec biomes, *Ecology*, 70:656-673.

Pellatt, M.G. et Mathewes, R.W. (1994). Paleoecology of postglacial tree line fluctuations on the Queen Charlotte Islands, Canada, *Ecoscience*, 1:71-81.

Percy, J.A., Wells, P.G. et Evans, A. (1996). *Fundy issues: information update and workshop synthesis*, Fundy Marine Ecosystem Project, version préliminaire inédite, Wolfville (N.-É.).

Peters, R.L. II. (1990). « The effect of global climatic change on natural communities », dans E.O.Wilson (dir.), *Biodiversity*, National Academy Press, Washington (D.C.), p. 450-461.

Peters, R.L. et Darling, J.D.S. (1985). The greenhouse effect and nature reserves, *BioScience*, 35:707-717.

Peters, R.L. et Lovejoy, T.E. (dir.) (1992). *Global warming and biological diversity*, Yale University Press, New Haven (Conn.), 385 p.

Philipp, D.P. (1991). Genetic implications of introducing Florida largemouth bass, *Micropterus salmonides floridanus, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48 (supplément 1):58-65.

Pickett, S.T.A. et Cadenasso, M.L. (1995). Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems, *Science*, 269:331-334.

Pimm, S.L., Diamond, J., Reed, T.M., G.J. Russell et Verner, J. (1993). Times to extinction for small populations of large birds, *Proceedings of the National Academy of Science*, 09:10871-10875.

Pimm, S.L., Russell, G.J., Gittleman, J.L. et Brooks, T.M. (1995). The future of biodiversity, *Science*, 269:347-350.

Pitelka. L.F. (1994). Ecosystem response to elevated $CO_2$, *Trends in Ecology and Evolution*, 9:204-207.

Plante, Y., Boag, P.T. et White, B.N. (1989). Macrogeographic variation in mitochondrial DNA of meadow voles (*Microtus pennsylvanicus*), *Canadian Journal of Zoology*, 67:158-167.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement) (1992). *Convention sur la diversité biologique*. Texte et annexes, Rio de Janeiro (Brésil), pages div.

Poiani, K.A. et Johnson, W.C. (1993). Potential effects of climate change on a semi-permanent prairie wetland, *Climate Change*, 24:213-232.

Price, J., Droege, S. et Price, A. (1995). *The Summer Atlas of North American Birds*, Academic Press, New York (N.Y.), 364 p.

Prokosch, F. (1991). Present status and recent changes in numbers and feeding sites of *Branta* species on the coasts of the FRG during the 1980s, *Ardea*, 79(2):135-139.

Quinn, T.W. et Cooke, F. (1987). DNA marker analysis detects multiple paternity and maternity in single broods of the lesser snow goose, *Nature*, 326:392-394.
Ratchke, B. et Lacey, E.P. (1985). Phenological patterns of terrestrial plants, *Annual Review of Ecological Systematics*, 16, 179-214.

Regier, H.A. et Meisner, J.D. (1990). Anticipated effects of climate change on freshwater fishes and their habitat, *Fisheries*, 15:10-15.

Regier, H.A., Holmes, J.A. et Pauly, D. (1990). Influence of temperature change on aquatic ecosystems: an interpretation of empirical data, *Transactions of the American Fisheries Society*, 119:347-389.

Reid, W.V.C. and Miller, K.R. (1989). *Keeping options alive: the scientific basis for conserving biodiversity*, World Resources Institute, Washington (D.C.), 128 p.

Richardson, D.M. et Cowling, R.M. (1993). Biodiversity and ecosystem processes: opportunities in Mediterranean-type ecosystems, *Trends in Ecology and Evolution*, 8:79-81.

Ricklefs, R.E. et Schluter, D. (dir.) (1993). *Species diversity in ecological communities*, University of Chicago Press, Chicago (Ill.), 414 p.

Ritchie, J.C. (1985). Late-Quaternary climatic and vegetational change in the lower Mackenzie basin, northwest Canada, *Ecology*, 66:612-621.

Ritchie, J.C. (1987). *Postglacial vegetation of Canada*, Cambridge University Press, Cambridge (Mass.), 178 p.

Ritchie, J.C. et Hare, F.K. (1971). Late-Quaternary vegetation and climate near the arctic tree line of northwestern North America, *Quaternary Research*, 1:331-342.

Rizzo, B. et Wiken, E. (1989). « Assessing the sensitivity of Canada's ecosystems to climatic change », dans *Landscape Ecological Impact of Climatic Change on Boreal/(Sub)Arctic Regions, with Emphasis on Fennoscandia*, Koster, E.A. et Boer, M.M. (comp.), rapport de discussion préparé pour la European Conference on Landscape Ecological Impact of Climatic Change, Lunteren (Pays-Bas), p. 94-111.

Rizzo, B. et Wiken, E. (1992). Assessing the sensitivity of Canada's ecosystems to climatic change, *Climatic Change*, 21(1):37-55.

Rogers, J.P. (1979). « *Branta bernicla hrota* in the U.S.A. — a management review », dans *Proceedings of First Technical Meeting on Western Palearctic Migratory Bird Management, Branta bernicla bernicla, held Paris 12-13 December 1977,* M. Smart (dir.), International Waterfowl Research Bureau, Slimbridge (G.-B.), p. 195-205.

Root, T. (1988a). Energy constraints on avian distributions and abundances, *Ecology*, 89:330-339.

Root, T. (1988b). Environmental factors associated with avian distributional boundaries, *Journal of Biogeography*, 15:489-505.
Roots, E.F. (1989). Climate change: high-latitude regions, *Climatic Change*, 15:223-253.

Rose, C. et Hurst, P. (1992). *Can Nature Survive Global Warming?*, World Wide Fund for Nature, Gland (Suisse), 59 p.

Ruess, R.W., Hik, D.S. et Jefferies, R.L. (1989). The role of lesser snow geese as nitrogen processors in a sub-arctic salt marsh, *Oecologia*, 79:23-29.

Ryder, J.P. (1967). The breeding biology of Ross' goose in the Perry River region, Northwest Territories, *Canadian Wildlife Service Report Series*, No. 3, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), 56 p.

Sala, O.E., Parton, W.J., Joyce, L.A. et Lauenroth, W.K. (1988). Primary production of the central grasslands region of the United States, *Ecology*, 69:40-45.

Sauer, J.R., Hines, J.E., Gough, G, Thomas, I. et Peterjohn, B.G. (1997). *The North American Breeding Bird Survey Results and Analysis, Version 96.3*, Patuxent Wildlife Research Center, Laurel (Md.).

Saunders, D.A., Hobbs, R.J. et Margules, C.R. (1991). Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review, *Conservation Biology*, 5:18-32.

Schaefer, J.A. et Messier, F. (1995). Scale-dependent correlations of arctic vegetation and snow cover, *Arctic and Alpine Research*, 27:38-43.

Schindler, D.W., Beaty, K.G., Fee, E.J., Cruikshank, D.R., DeBruyn, E.R., Findlay, D.L., Linsey, G.A., Shearer, J.A., Stainton, M.P. et Turner, M.A. (1990). Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest, *Science*, 250(4983):967-970.

Schindler, D.W., Bayley, S.E., Parker, B.R., Beaty, K.G., Cruikshank, D.R., Fee, E.J., Schindler, E.U. et Stainton, M.P. (1996). The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, *Limnology and Oceanography*, 41(5):1004-1007.

Schindler, D.W., Curtis, P.J., Parker, B.R. et Stainton, M.P. (1996). Consequences of climate warming and lake acidification for UV-B penetration in North American boreal lakes, *Nature*, 379:705-708.

Schmidt, K. (1996). Rare habitats vie for protection, *Science*, 274:916-918.

SCOPE (1996). *Functional roles of biodiversity: a global perspective*, Chichester, New York. Published on behalf of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) of the International Council of Scientific Unions (ICSU), SCOPE Report No. 55, Chicester, Toronto (Ont.), 493 p.

Scott, P.A. et I.T. Craine. (1993). The lynx cycle: a climatic perspective, *Climate Research*, 2:235-240.
Scott, P.A. et Rouse, W.R. (1995). Impacts of increased winter snow cover on upland tundra vegetation: a case example, *Climate Research*, 5:25-30.

Sealy, S.G. (1966). Swallow mortality at Moose Mountain, *Blue Jay*, 24:17-18.

Service canadien de la faune (1989). *Climate change workshop*, rapport inédit, Saskatoon (Sask.).

Sette, O.E. (1950). Biology of the Atlantic Mackerel (*Scomber scombrus*) of North America, Part II, Migrations and habits, *Fishery Bulletin*, 49:251-358.

Shaver, G.R., Billings, W.D., Chapin, F.S., Giblin, A.E., Nadelhoffer, K.J., Oechel, W.C. et Rastetter, E.B. (1992). Global change and the carbon balance of arctic ecosystems, *Bioscience*, 42:433-441.

Shrader-Frechette, K.S. (1994). Ecosystem health: a new paradigm for ecological research?, *Trends in Ecology and Evolution*, 9:456-457.

Signor, P.W. (1990). The geologic history of diversity, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 21:509-539.

Sinclair, A.R.E., Gosline, J.M., Holdsworth, G., Krebs, C.J., Boutin, S., Smith, J.N.M., Boonstra, R. et Dale, M. (1993). Can the solar cycle and climate synchronize the snowshoe hare cycle in Canada? Evidence from tree rings and ice cores, *American Naturalist*, 141:173-198.

Singh, T. et Wheaton, E.E. (1991). Boreal forest sensitivity to global warming: implications for forest management in western interior Canada, *Forestry Chronicle*, 67:342-348.

Smith, J.G. (dir.) (1990). Advances in research on the Beluga whale, *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Science*, 224, 206 p.

Soil Conservation Society of America (1987). *Wetland Conservation: A Call for Action*, A position statement of the Ontario Chapter, Soil Conservation Society of America, Don Mills (Ont.), 20 p.

Solbrig, O.T. (1991). The origin and function of biodiversity, *Environment*, juin, p. 17-38.

Solomon, A.M., Tharp, M.L., West, D.C., Taylot, G.E., Webb, J.W. et Trimble, J.L. (1984). *Response of unmanaged forests to $CO_2$-induced climate change: available information, initial tests and data requirements*, DOE/NBB-0053, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield (Va.), 93 p.

Srivastava, D.S. et Jefferies, R.L. (1996). A positive feedback: herbivory, plant growth, salinity, and the desertification of an arctic salt-marsh, *Journal of Ecology*, 84:31-42.

Staniforth, R.J. et Scott, P.A. (1991). Dynamics of weed populations in a northern subarctic community, *Canadian Journal of Botany*, 69:814-821.

Stephenson, N.L. (1990). Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance, *American Naturalist*, 135:649-670.

Stirling, I. et Derocher, A.E. (1992). « Possible impacts of climate warming on polar bears », Abstract presented at Canadian Arctic Global Change Research Workshop, *Biological implications of global change: northern perspectives*. Co-sponsored by Royal Society of Canada, Canadian Global Change Program, and Association of Canadian Universities for Northern Studies, 22-23 octobre 1992, Université de l'Alberta, Edmonton (Alb.), p. 79.

Stirling, I. et Derocher, A.E. (1993). Possible impacts of climatic warming on polar bears, *Arctic*, 46:240-245.

Stoddard, P.K., Marsden, J.E. et Williams, T.C. (1983). Computer simulation of autumnal bird migration over the western North Atlantic, *Animal Behaviour*, 31:173-180.

Summers, R.W. et Underhill, L.G. (1987). Factors related to the breeding production of brent geese and waders on the Tamyr peninsula, *Bird Study*, 34:161-171.

Sy, A, Rhein, M., Lazier, J.N.R., Koltermann, K.P., Meincke, J., Putzka, A. et Bersch, M. (1997). Surprisingly rapid spreading of newly formed intermediate waters across the North Atlantic Ocean, *Nature*, 386 (6626):675-679.

Taylor, C.C., Bigelow, H.B. et Graham, H.W. (1957). Climate trends and the distribution of marine animals in New England, *Fisheries Bulletin*, 57:293-345.

Taylor, K.C., Lamorey, G.W., Doyle, G.A., Alley, R.B., Grootes, P.M., Mayewski, P.A., White, J.W.C. et Barlow, L.K. (1993). The « flickering switch » of late Pleistocene climate change, *Nature*, 361:432-436.

Telfer, E.S. (1967). Comparison of moose and deer winter range in Nova Scotia, *Journal of Wildlife Management*, 31:418-425.

Telfer, E.S. et Kelsall, J.P. (1984). Adaptation of some large North American mammals for survival in snow, *Ecology*, 65:1828-1834.

Tilman, D. (1996). Biodiversity: population versus ecosystem stability, *Ecology*, 77:350-363.

Tilman, D. et Downing, J.A. (1994). Biodiversity and stability in grasslands, *Nature*, 367:363-365.

Turner, B.C., Hochbaum, G.S., Caswell, F.D. et Neiman, D.J. (1987). « Agricultural impacts on the Canadian Prairies », 1981-85, *Transactions of 52nd North American Wildlife and Natural Resources Conference*, p. 206-232.

Van Devender, T.R. et Spaulding, W.G. (1979). Development of vegetation and climate in the southwestern United States, *Science*, 204:701-710.

Vitousek, P.M., D'Antonio, C.M., Loope, L.L. et Westbooks, R. (1996). Biological invasions as global environmental change, *American Scientist*, 84:468-478.

Vitt, D.H., Halsey, L.A. et Zoltai, S.C. (1994). The bog landforms of continental western Canada in relation to climate and permafrost patterns, *Arctic and Alpine Research*, 26, p. 1-13.

Walker, D.A., Halfpenny, J.C., Walker, M.D. et Wessman, C.A. (1993). Long-term studies of snow-vegetation interactions, *BioScience*, 43:288-301.

Walker, I.R. et MacDonald, G.M. (1995). Distributions of Chironomidae (*Insecta: Diptera*) and other freshwater midges with respect to treeline, Northwest Territories, Canada, *Arctic and Alpine Research*, 27:258-263.

Walsh, J.E. (1987). « Large-scale effects of seasonal snow cover », dans *Large scale effects of seasonal snow cover*, B.E. Goodison, R.G. Barry et J. Dozier (dir.), International Association for the Hydrological Sciences, Pub. No. 166, Oxford (G.-B.), p. 2-25.

Webb, T. III et Bartlein, P.J. (1992). Global changes during the last 3 million years: climatic controls and biotic responses, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23:141-173.

Wedin, D.A. et Tilman, D. (1996). Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands, *Science*, 274:1720-1723.

Wein, R.W., Gal, R., Hogenbirk, J.C., Hogg, E.H., Landhausser, S.M., Lange, P., Olsen, S.K., Schwarz, A.G. et Wright, R.A. (1994). « Analogues of climate change - fire-vegetation responses in the MacKenzie basin », dans *Mackenzie Basin Impact Study - Interim Report #2*, S.J. Cohen (dir.), *Proceedings of the Sixth Bienniel AES/DIAND Meeting on Northern Climate & Mid Study Workshop of the Mackenzie Basin Impact Study held April 10-14, 1994, Yellowknife, NWT*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 337-343.

Wein, R.W. et Hogg, E.H. (1990). « Climate change moisture stresses on northern coniferous forests », dans *Climate Change Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), actes d'un symposium/atelier international, Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 285-289.

Welch, H.E., Bergmann, M.A., Siferd, T.D., Martin, K.A., Curtis, M.F., Crawford, R.E., Conover, R.J. et Hop, H. (1992). Energy flow through the marine ecosystem of the Lancaster Sound Region, Arctic Canada, *Arctic*, 45:343-357.

Whyte, A. et Ignatiuk, J. (1989). *Preliminary annotated bibliography on climate change and wildlife*, manuscrit inédit, Service canadien de la faune, Saskatoon (Sask.), 58 p.

Williams, G.D.V. et Robertson, G.W. (1965). Estimating most probable prairie wheat production from precipitation data, *Canadian Journal of Plant Sciences*, 45:34-47.

Wilson, D.J. (1993). *Nitrogen mineralization in a grazed sub-arctic salt marsh*, thèse de maîtrise ès sciences, Département de Botanique, Université de Toronto, Toronto (Ont.), 226 p.

Wilson, E.O. (1992). *The diversity of life*, Belknap Press, Harvard University, Cambridge (Mass.), 424 p.

Winstanley, D., Spencer, R. et Williamson, K. (1974). Where have all the whitethroats gone?, *Bird Study*, 21:1-14.

Woodley, S., Kay, J.J. et Francis, G. (dir.) (1993*). Ecological integrity and the management of ecosystems*, St. Lucie Press, Delray Beach (Fla.), 220 p.

Woodmansee, R.G. (1988). « Ecosystem processes and global change », dans *Scales and Global Change*, T. Rosswall, R.G. Woodmansee et P.G. Risser (dir.), John Wiley and Sons, New York (N.Y.), p. 11-27.

Woodward, F.I. (1987). *Climate and Plant Distribution*, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), 174 p.

Yan, N.D., Keller, W., Scully, N.M., Lean, D.R.S. et Dillon, P.J. (1996). Increased UV-B penetration in a lake owing to drought-induced acidification, *Nature*, 381:141-143.

**POUR LECTURE ULTÉRIEURE**

Bazzaz, F.A. et Fajer, E.D. (1992). Plant life in a $CO_2$-rich world, *Scientific American*, 266(1):68-74.

D'Arrigo, R.D. et Jacoby, G.C. (1996). « Past changes in climate and tree growth in the western Americas », dans *High-Latitude Rainforests and Associated Ecosystems of the West Coast of the Americas*, R.G. Lawford, P.B. Alaback et E. Fuentes (dir.), Ecological Studies, Vol. 116, Springer, New York (N.Y.), p. 75-88.

Davis, M.B. et Botkin, D.B. (1985). Sensitivity of cool-temperate forests and their fossil pollen record to rapid temperature change, *Quaternary Research*, 23:327-340.

Field, C.B., Chapin II, F.S., Matson, P.A. et Mooney, H.A. (1992). Responses of terrestrial ecosystems to the changing atmosphere: A resource-based approach, *Annual Review of Ecological Systematics*, 23:201-235.

Graumlich, L.J. (1991). Subalpine tree growth, climate, and increasing $CO_2$: an assessment of recent growth trends, *Ecology*, 72, p. 1-11.

Hunt, H.W., Trlica, M.J., Redente, E.F., Moore, J.C., Detling, J.K., Kittel, T.G.F., Walter, D.E., Fowler, M.C., Klein, D.A. et Elliott, E.T. (1991). Simulation model for the effects of climate change on temperate grassland ecosystems, *Ecological Modelling*, 53:205-246.

Idso, S.B. et Kimball, B.A. (1993). The growth in carbon dioxide enriched air and its implications for global carbon cycling and maximum levels of atmospheric $CO_2$, *Global Biogeochemical Cycles*, 7:537-555.

Jefferies, R.L. et Maron, J.L. (1997). The embarrassment of riches: atmospheric deposition of nitrogen and community and ecosystem processes, *Trends in Ecology and Evolution*, 12:74-78.

LaMarche, V.C., Jr., Graybill, D.A., Fritts, H.F. et Rose, M.R. (1984). Increasing atmospheric carbon dioxide: tree ring evidence for growth enhacement in natural vegetation, *Science*, 225(4666):1019-1021.

McClure, J.W. et Lee, T.D. (1993). Small-scale disturbance in a northern hardwoods forest: effects on tree species abundance and distribution, *Canadian Journal of Forestry Research*, 23:1347-1360.

Merriam, G. et Villard, M.-A. (1991). Heterogeneity in ecological space and time: a vital variable in population persistence, *Advances in Ecology*, 1:199-208.

Murcia, C. (1995). Edge effects in fragmented forests: implications for conservation, *Trends in Ecology and Evolution*, 10:58-62.

Oehler, J.D. et Litvaitis, J.A. (1996). The role of spatial scale in understanding responses of medium-sized carnivores to forest fragmentation, *Canadian Journal of Zoology*, 74:2070-2079.

Payette, S. et Gagnon, R. (1985). Late Holocene deforestation and tree regeneration in the forest-tundra of Quebec, *Nature*, 313:570-572.

Perrings, C.A., Maler, K.-G., Folke, C., Holling, C.S. et Jannson, B-O. (1994*). Biodiversity Conservation Problems and Policies*, Kluwer Academic Publishers, Boston (Mass.), 389 p.

Perrings, C.A., Maler, K.-G., Folke, C., Holling, C.S. et Jannson, B-O. (1995). *Biodiversity loss: economic and ecological issues*, Cambridge University Press, New York (N.Y.), 332 p.

Torn, M.S. et Fried, J.S. (1992). Predicting the impacts of global warming on wildland fire, *Climatic Change*, 21:257-274.

UNEP (United Nations Environment Programme) (1995). *Global Biodiversity Assessment*, United Nations Environment Programme, Cambridge University Press, Cambridge (Mass.), 1140 p.

Valone, T.J. et Brown, J.H. (1995). Effects of competition, colonization, and extinction on rodent species diversity, *Science*, 267:880-883.

Wetlands International (1997). Wetlands and climate change, *Wetlands: The newsletter of Wetlands International*, juin 1997, 3:4-5.

## ANNEXE 2A : NOMS COMMUNS ET SCIENTIFIQUES DE CERTAINES ESPÈCES MENTIONNÉES DANS LE TEXTE

**Mammifères**
caribou de Peary : *Rangifer tarandus*
lièvre d'Amérique : *Lepus americanus*
lynx : *Lynx canadensis*
ours blanc : *Ursus maritimus*

**Oiseaux**
bécasseau semipalmé : *Calidris pusilla*
bernache cravant à ventre pâle : *Branta bernicla hrota*
canard siffleur : *Anas americana*
fauvette grisette : *Sylvia communis*
fou de Bassan : *Morus bassanus*
fulmar boréal : *Fulmarus glacialis*
gros-bec errant : *Coccothraustes vespertinus*
guillemot marmette : *Uria aalge*
merle d'Amérique : *Turdus migratorius*
mouette tridactyle : *Rissa tridactyla*
oie à bec court : *Anser brachyrhynchus*
oie de Ross : *Chen rossi*
petit pingouin : *Alca torda*
petite oie des neiges : *Chen caerulescens*
plongeon huard : *Gavia immer*

**Poissons**
morue : *Gadus morhua*
omble de fontaine : *Salvelinus fontinalis*

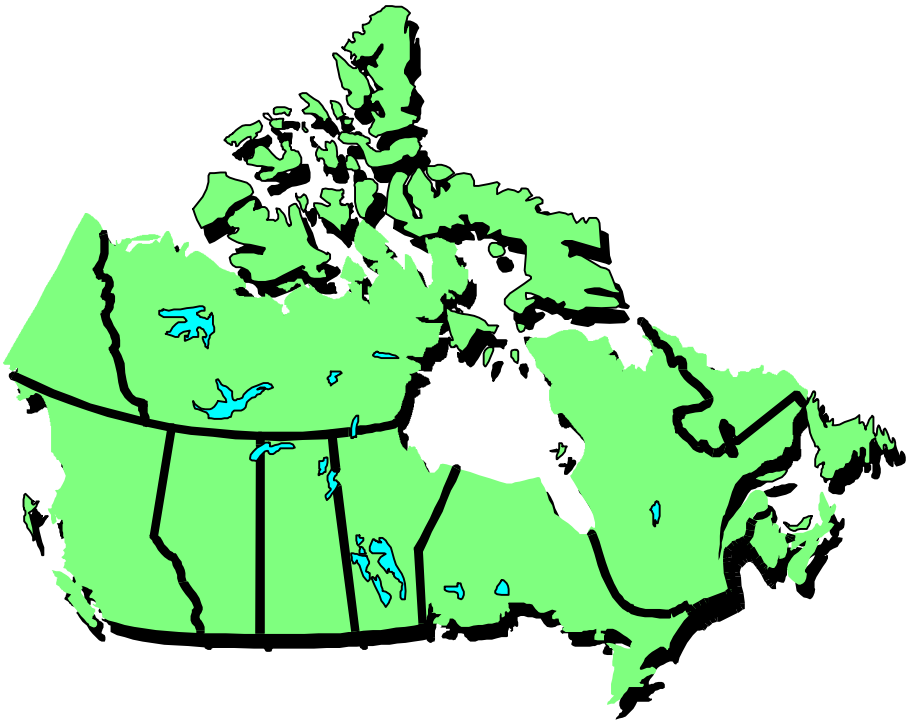
**Insectes**
damier d'Edith : *Euphydryas editha*
tordeuse des bourgeons de l'épinette : *Choristoneura fumifera*

**Végétaux**
amélanchier à feuilles d'aulne : *Amelanchier alnifolia*
airelle des marécages : *Vaccinium uliginosum*
busserole alpine : *Arctostaphylos alpina*
cerisier de Virginie : *Prunus virginiana*
peuplier faux-tremble : *Populus tremuloides*
rhododendron de Laponie : *Rhododendron lapponicum*

# CHAPITRE TROIS

# LES MILIEUX HUMIDES DU CANADA ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

*Thomas A. Clair [1], Barry G. Warner [2], Richard Robarts [3], Henry Murkin [4], John Lilley [5], Linda Mortsch [6] et Clayton Rubec [7]*



1. Environnement Canada - Région de l'Atlantique, B. P. 6227, Sackville (N.-B.) E4L 1G6, téléphone : (506) 364-5070, télécopieur (506) 364-5062, courriel : tom.clair@ec.gc.ca
2. Wetlands Research Centre, Environmental Studies Building 1, University of Waterloo, Waterloo (Ont.) N2L 3G1
3. National Hydrological Research Institute, 11 Innovation Blvd, Saskatoon (Sask.) SN7 3H5
4. Institut de recherche sur les terres humides et la sauvagine, a/s de Canards Illimités Canada, B.P. 1160, Stonewall (Man.) R0C 2Z0
5. Lilley Environmental Consulting, 1003 Garland Terrace, Sherwood Park (Alb.) T8A 2R5
6. Groupe de recherche en adaptation environnementale, Service de l'environnement atmosphérique, a/s de Faculty of Environmental Studies, University of Waterloo, Waterloo (Ont.) N2L 3G1
7. Environnement Canada, Service canadien de la faune, Place Vincent Massey, Hull (Qc.) K1A 0H3

## RÉSUMÉ

Les milieux humides, qui comprennent les marais et les tourbières, couvrent 14 % de la superficie terrestre du Canada. Ils sont une ressource essentielle et offrent un habitat à des espèces importantes, en plus de servir de puits de carbone atmosphérique, de liens dans le cycle des éléments nutritifs et des minéraux, de zones tampons contre la pollution tout en remplissant d'autres fonctions liées à l'écoulement et à la rétention des eaux. Les milieux humides contribuent à la chaîne alimentaire en assurant le cycle des éléments nutritifs, produisent des végétaux dont se nourrissent divers organismes et abritent une grande variété d'espèces. La plus importante aire de reproduction des oiseaux aquatiques en Amérique du Nord, et en particulier dans la région des Prairies, se trouve dans les milieux humides de prairie, où la production annuelle de canards représente 50 à 80 % de la population totale de ces oiseaux sur le continent. En outre, quelque trois millions d'oiseaux aquatiques font halte dans les milieux humides en bordure des Grands Lacs lors de leurs migrations. La survie de nombreuses espèces rares, menacées ou en danger de disparition dépend des habitats qu'on trouve seulement en milieux humides. Ces habitats remplissent également des fonctions liées aux activités touristiques et récréatives.

Les tourbières du nord sont des bassins de captage et de stockage des eaux et, bien qu'on y trouve une faune moins diversifiée, de nombreuses espèces y font halte pour se nourrir et s'abriter. Les tourbières sont d'excellents puits de carbone, de par leur capacité d'emmagasiner cette substance dans les couches de tourbe, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres. De plus, l'exportation du carbone des tourbières à l'état de carbone organique dissous (COD) constitue une importante source de carbone pour les cours d'eau et les lacs. Les tourbières sont exploitées à des fins horticoles et parfois énergétiques.

Les fonctions hydrologiques comprennent la stabilisation de l'écoulement, l'alimentation et l'émergence des eaux souterraines ainsi que la lutte contre l'érosion. Les milieux humides jouent également un rôle utile dans la prévention des inondations, la réduction des contaminants et la conservation des ressources en eau. L'hydrologie est un facteur déterminant de l'écologie des milieux humides. Dans les cuvettes des Prairies, par exemple, les milieux humides sont composés, en grande partie, de bassins fermés qui sont alimentés principalement par les eaux de ruissellement libérées par la fonte des neiges et par les pluies printanières. En été et à l'automne, l'évapotranspiration de la végétation des milieux humides est habituellement plus importante que les précipitations, ce qui entraîne une baisse des niveaux d'eau. En outre, du fait de la réaction de la végétation aux variations des niveaux d'eau, les bassins qui s'assèchent pourraient se couvrir d'une végétation dispersée ou dense en été. Dans les Grandes Plaines, vu la variabilité du climat, les niveaux d'eau annuels fluctuent d'une saison et d'une année à l'autre; la qualité et la permanence de l'eau varient donc de façon significative d'un milieu à l'autre dans cette région. Les tourbières sont également tributaires du régime hydrologique : le niveau de la nappe phréatique est le principal facteur qui régit la décomposition de la tourbe. Lorsque la tourbe est exposée à l'air, elle s'oxyde très rapidement en dégageant du $CO_2$. La tourbe saturée d'eau se décompose en général plus lentement qu'elle ne s'accumule, en rejetant plus de méthane ($CH_4$) au cours de ce processus.

Les scénarios de changement climatique semblent indiquer que le réchauffement sera accompagné d'une modification du régime des précipitations à l'échelle locale et régionale. Des températures plus élevées auront un effet sur l'hydrologie, la géochimie, l'écologie et la qualité de l'eau des milieux humides, de même que sur les systèmes d'eau souterraine associés. Les résultats des simulations montrent que, si le taux de précipitation et les quantités d'eau de ruissellement libérées par la fonte des neiges au printemps augmentaient pour atteindre 10 % des précipitations totales au cours de la saison de croissance, ce serait suffisant pour compenser les pertes accrues en eau par évapotranspiration attribuables à des températures plus élevées en été. Toujours selon ces simulations, les milieux humides semi-permanents pourraient passer de bassins d'eau libre à des zones entièrement couvertes de végétation, même dans le contexte du vaste éventail de changements prévus dans les régimes de précipitations des Grandes Plaines. La simulation des hausses de température et des baisses de précipitations porte également à croire que ces deux facteurs augmenteraient considérablement la salinité des milieux humides.

Des changements climatiques qui entraîneraient une baisse des niveaux d'eau pourraient sensiblement modifier la quantité et la qualité des habitats des oiseaux aquatiques dans les milieux humides. Les modèles ont montré qu'une hausse des températures de 3 ºC se traduirait par une diminution de 56 % du nombre de bassins humides de la forêt-parc et de 15 % dans la prairie du Canada. Toutefois, une augmentation de 10 % des précipitations compensait presque l'élévation des températures de 3 °C dans la prairie, mais, dans la forêt-parc, le nombre de bassins montrait toujours une diminution de 39 %. Des précipitations à la baisse couplées à une élévation des températures entraînait une perte encore plus importante du nombre de bassins en milieux humides.

Un climat plus sec et plus chaud pourrait avoir un impact direct sur la production d'oiseaux aquatiques en causant l'assèchement d'un plus grand nombre de bassins et un effet indirect en favorisant une végétation émergente plus dense, donc moins appropriée au type d'habitat généralement fréquenté par les oiseaux aquatiques. La réaction des milieux humides à ces conditions varie selon le type, la géomorphologie et la profondeur de l'eau. La communauté végétale réagit en fonction de facteurs comme la répartition de la végétation dans le passé, la propagation végétative, les conditions de germination, le taux de survie lors des inondations et des sécheresses, ainsi que les mécanismes de dispersion. Parmi les autres aspects importants de la structure et des fonctions des milieux humides qui peuvent subir les effets du climat figurent la production d'algues, la décomposition, le cycle des éléments nutritifs et des minéraux ainsi que la dynamique qui régit la chaîne alimentaire. Toutefois, avec la hausse des températures, l'habitat de la prairie pourrait s'étendre vers le nord et atténuer certaines des pertes prévues dans d'autres parties de la région.

Les milieux humides en bordure de lacs et de cours d'eau subiraient également les répercussions de la baisse des niveaux d'eau. Dans les marais le long du Saint-Laurent, par exemple, la végétation émergente occupait 37 % de la superficie lorsque le niveau d'eau était bas, 18 % dans les conditions courantes et seulement 6 % avec un niveau d'eau élevé. La fluctuation des niveaux d'eau pourrait stimuler l'invasion des milieux humides par des espèces opportunistes ou exotiques, modifiant ainsi les caractéristiques des marais qui, de vastes étendues marécageuses

avec un niveau d'eau bas, se transformeraient en étendues d'eaux libres avec un niveau d'eau élevé.

Dans le nord du Canada, où les précipitations sont plus importantes que l'évapotranspiration, et où les températures moyennes annuelles sont basses (froides), les conditions sont propices à l'accumulation de matières organiques qui se transforment en tourbe lorsque l'oxygène du sol nécessaire à la décomposition des végétaux est limité (p. ex., lorsque les débris végétaux sont saturés d'eau). La majorité des tourbières du Canada reposent sur une couche de pergélisol sporadique à continu. Une élévation des températures de 5 ºC entraînerait à terme la fonte du pergélisol dans toutes les régions, à l'exception du Grand Nord. Un réchauffement climatique ne serait-ce que de 2 ºC transformerait la majeure partie de la région des tourbières, qui passerait d'une zone de pergélisol discontinu à une zone de pergélisol sporadique. Ces conditions pourraient même favoriser à nouveau l'accumulation de tourbe dans les régions subarctiques, mais la dégradation des tourbières du sud pourrait survenir plus rapidement que le déplacement des zones vers le nord, d'où une diminution probable de la superficie totale des tourbières canadiennes.

Les milieux humides sont également une importante source de COD pour les étangs, les lacs et les cours d'eau. Les rejets de COD, qui sont liés aux précipitations annuelles totales ainsi qu'à la topographie des bassins, seront influencés par les précipitations et la température. Selon certains scénarios de changement climatique, il y aura une diminution de l'écoulement et des apports de COD provenant des milieux humides. Il est difficile de prévoir les répercussions de ces changements sur les écosystèmes, car le COD influe sur la clarté de l'eau des lacs et des cours d'eau, et sur la pénétration de la lumière solaire et des rayons UVB, et donc ultérieurement sur la température de l'eau ainsi que sur la production primaire.

Nous n'avons encore qu'une connaissance fragmentaire des milieux humides et de leurs réactions possibles au changement climatique. Par rapport aux autres écosystèmes, ces milieux n'ont jamais fait l'objet d'une modélisation adéquate, et ils sont souvent exclus des modèles qui étudient les impacts du changement climatique à l'échelle planétaire. Il y a un besoin de recherches sur les processus hydrogéochimiques des milieux humides et sur les interactions entre les niveaux d'eau et la végétation de ces milieux. Il est également nécessaire d'effectuer des simulations des changements des habitats liés au changement climatique afin de comprendre les variations possibles, tant qualitatives que quantitatives, des milieux humides ainsi que leur incidence sur la production d'oiseaux aquatiques et sur la diversité biologique. Enfin, il reste encore à déterminer les types de tourbières, leur profondeur et leur superficie, à établir leur capacité de rétention du carbone, à déterminer leurs réactions au changement climatique, en particulier au méthane et au dioxyde de carbone. Les modèles climatiques devraient être utilisés avec d'autres modèles, comme ceux qui simulent les précipitations, le ruissellement et les eaux souterraines, pour mieux évaluer les conséquences du changement climatique sur les milieux humides du Canada et définir les valeurs et les fonctions qu'ils remplissent.

## INTRODUCTION

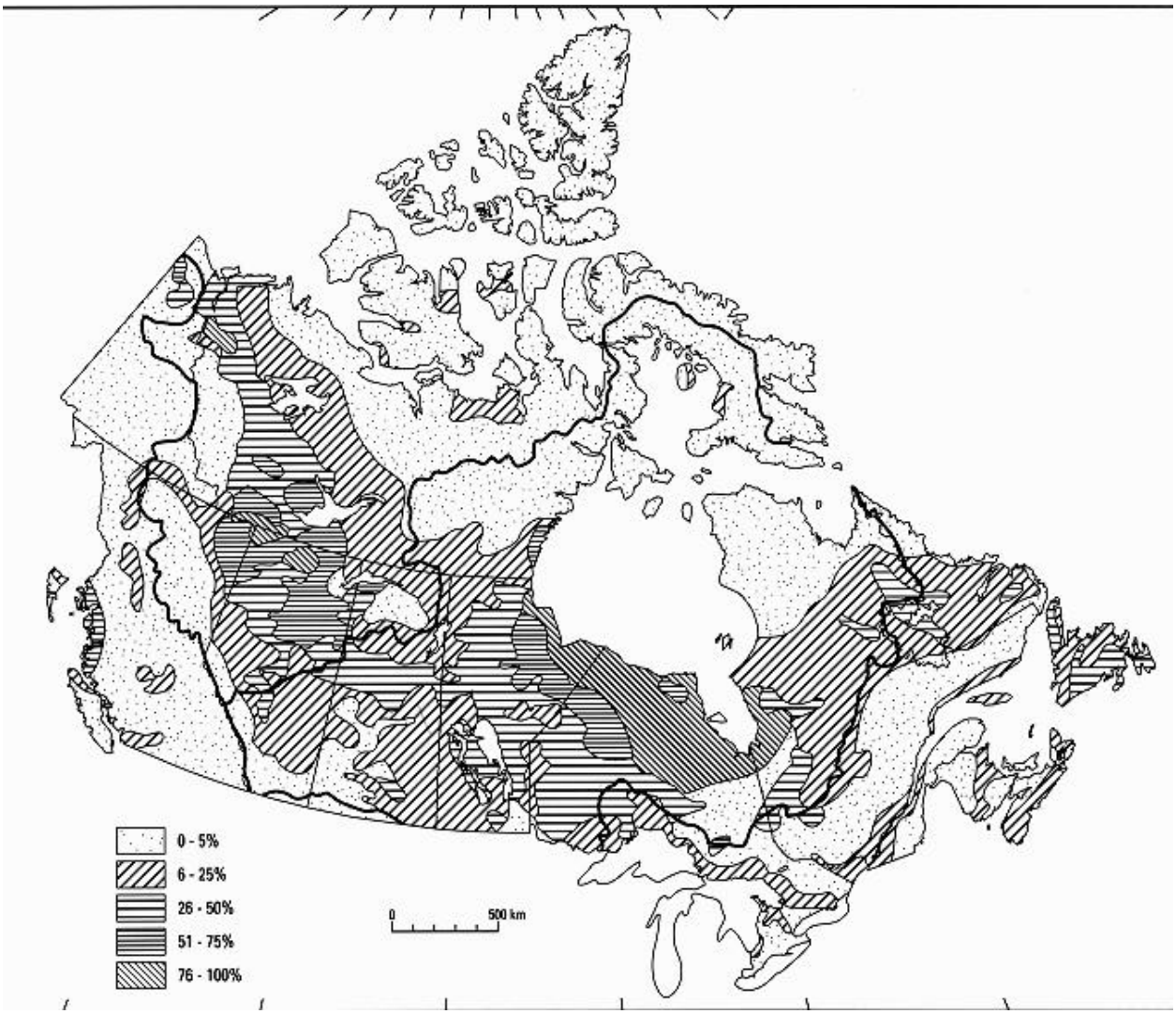
Depuis les fondrières des Prairies jusqu'aux rives des Grands Lacs, en passant par le Fraser, le Saint-Laurent et le Saint-Jean, et jusque dans ses vastes contrées du Nord, le Canada possède une variété de milieux humides, qui couvrent 14 % de sa superficie (figure 3.1). La plupart des Canadiens connaissent mieux les milieux humides sous les noms de marais, fondrière, marécage, muskeg, tourbière et bog et, bien qu'il existe de nombreuses définitions scientifiques, ils ont tous quatre éléments en commun : l'eau, la terre, les éléments nutritifs et la végétation. Les milieux humides peuvent être vus comme des zones de transition, présentant les caractéristiques à la fois des milieux aquatiques et terrestres. Ils sont souvent situés en bordure de lacs et de cours d'eau et dans les plaines inondables, où l'élévation périodique du niveau d'eau assure l'inondation naturelle des terres. D'autres milieux humides sont alimentés par l'eau qui se trouve juste sous la surface ou par l'eau de ruissellement provenant des pluies ou de la fonte des neiges. Les milieux humides, qui sont une ressource essentielle pour l'habitat de nombreuses espèces animales et végétales importantes, assurent également le cycle du carbone, de l'azote et du soufre. Ils servent aussi de zone tampon contre la pollution et contribuent à la régulation des débits des cours d'eau et à la rétention hydrique.

La taille des milieux humides varie de petites dépressions du sol mesurant quelques mètres carrés aux vastes étendues des tourbières des basses terres des baies d'Hudson et James. Il existe en outre divers types de milieux humides qui abritent une faune et une flore qui leur sont propres. Parmi les plantes spectaculaires ou inhabituelles des milieux humides figurent plusieurs variétés de plantes carnivores (droséras, sarracénies, dionées et utriculaires), ainsi que de nombreuses espèces d'orchidées et de mousses.

La matière organique dissoute (MOD), un des plus importants produits des milieux humides, est également une composante essentielle de la chaîne alimentaire des systèmes aquatiques et de l'équilibre acide-base des eaux douces. La MOD joue également un rôle clé dans le transport et la toxicité des métaux en traces et d'autres contaminants, et protège les organismes aquatiques des effets du rayonnement ultraviolet (UV) en influant sur la pénétration de la lumière. De plus, l'exportation de matières organiques dissoutes constitue la principale perte d'azote (N) des bassins hydrologiques boisés (Schiff *et al*., sous presse).

Entre l'air, l'eau, la végétation et les composantes fauniques des écosystèmes, il se produit des interactions qui sont souvent influencées par les activités internes des milieux humides ou par celles des terres adjacentes. L'hydrologie des milieux humides, par exemple, est liée à l'écoulement et à la rétention des eaux de ses aires de captage. Les activités qui ont un impact sur l'équilibre hydrique des ces milieux influeront donc également sur l'hydrologie, la végétation et les espèces sauvages qu'ils abritent. Ces activités comprennent le changement climatique, les pratiques agricoles et forestières, la construction de routes et l'urbanisation.

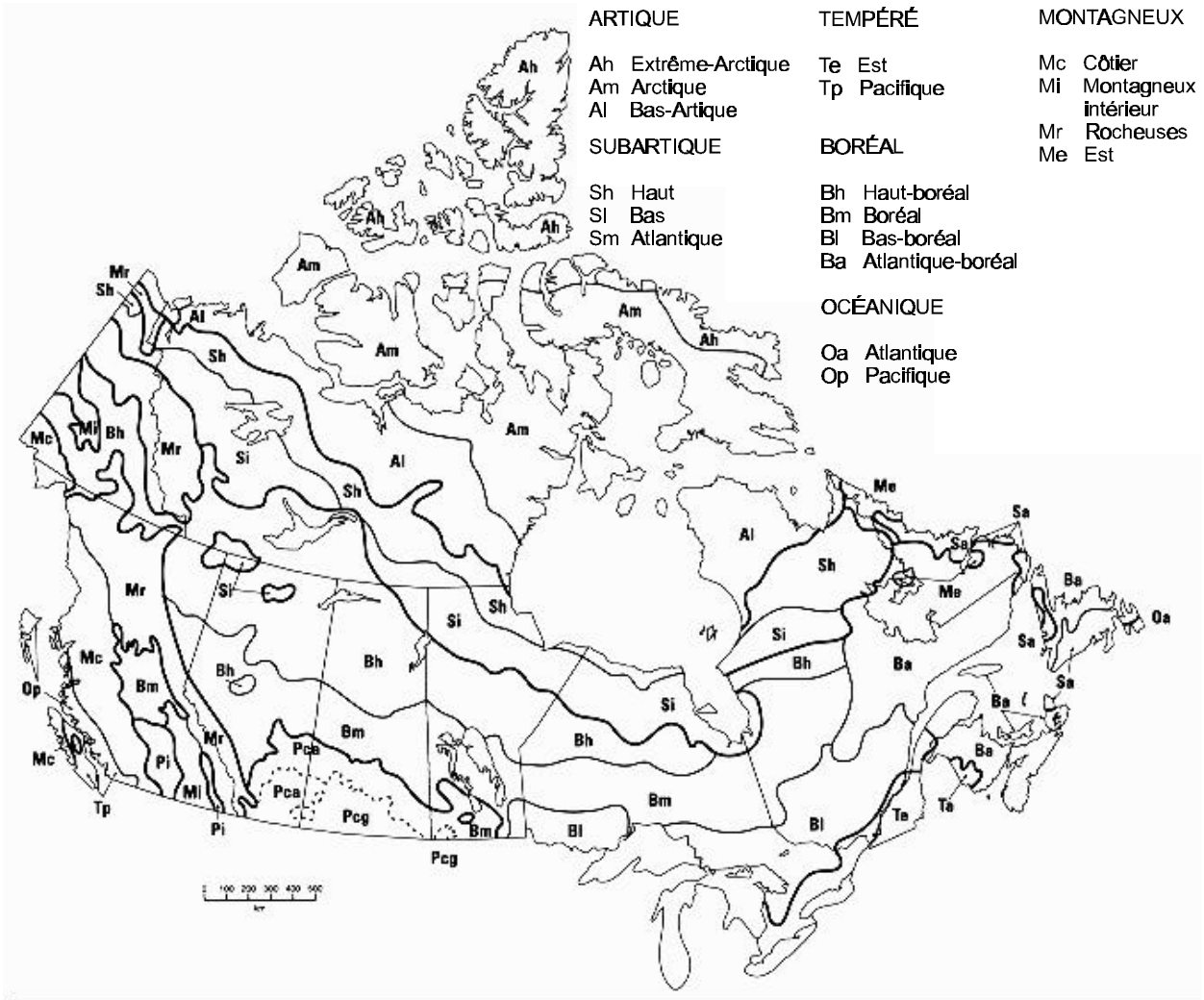
**Figure 3.1 Les milieux humides du Canada**




***Caractéristiques des milieux humides***

Les milieux humides peuvent se définir comme des terres dont la nappe phréatique se situe au niveau, près ou au-dessus de la surface ou des terres inondées pendant une période suffisamment longue pour favoriser les processus aquatiques ou ceux des milieux humides (Woo *et al*., 1993). Au Canada, les milieux humides se divisent en deux grandes catégories : a) les milieux humides organiques, communément appelés tourbières, qui renferment une accumulation minimale de 40 cm de matière organique, et b) les milieux humides minéraux qui contiennent moins de 40 cm de matière organique (NWWG, 1988). Le système de classification des milieux humides comprend trois niveaux hiérarchiques : le modelé, la morphologie de la surface et la composition du couvert végétal. Les classes de terres humides sont au nombre de cinq : les bogs, les fens, les marécages, les marais et les eaux libres peu profondes (figure 3.2).

**Figure 3.2 Classification des milieux humides au Canada**




Tous les bogs sont des tourbières. La surface d'un bog et sa nappe phréatique sont souvent surélevées et, généralement, la végétation de surface se trouve loin des eaux riches en minéraux provenant des sols. Les eaux de surface des bogs sont donc très acides et les couches supérieures de tourbe extrêmement pauvres en éléments nutritifs, ou ombrotrophes. On y trouve surtout des arbustes éricacés et de la sphaigne. Il n'y a généralement pas d'arbres, ou quelques-uns aux troncs rabougris (généralement des épinettes noires et des mélèzes) qui forment des forêts claires (NWWG, 1988; Warner et Rubec, 1997). Les bogs sont très répandus dans les écozones de la forêt boréale du Canada, et se retrouvent souvent dans d'autres milieux.

Les fens sont essentiellement des tourbières qui se caractérisent par une nappe phréatique élevée avec un système de drainage interne. Une nappe phréatique à écoulement lent est enrichie d'éléments nutritifs provenant du drainage de surface des hautes terres ou des eaux souterraines. Les fens sont donc minérotrophes et les bogs ombrotrophes. En majeure partie, l'épaisseur de la tourbe est généralement supérieure à 40 cm. Il existe deux types de fens : riches en minéraux et renfermant une végétation abondante; pauvres en minéraux, étape transitoire entre le bog et le fen,

qui ont une certaine interaction avec les eaux riches en minéraux et renfermant une végétation moins productive (*idem*). On trouve ces fens dans tout le pays, de l'écozone de la forêt boréale jusque dans le sud.

Les marécages sont des tourbières ou des terres humides minérales où il y a un certain mouvement de l'eau souterraine et des eaux stagnantes ou qui s'écoulent très lentement selon les saisons ou pendant des périodes plus longues. La nappe phréatique peut s'abaisser sous la zone de racinement à certaines périodes, créant ainsi une aération à la surface. Les marécages sont généralement des milieux riches en minéraux qui favorisent le foisonnement d'arbres et de grands arbustes. Le substrat est constitué d'un mélange de matières minérales et organiques, souvent ligneuses et bien décomposées (*idem*).

Les marais sont en grande partie des milieux humides minéraux, qui sont inondés sur une base périodique ou permanente par des eaux stagnantes ou à écoulement lent. Ces milieux, généralement riches en éléments nutritifs, sont des régions de sols minéraux, mais on y trouve parfois une couche peu profonde de sédiments organiques bien décomposés. La nappe d'eau souterraine y est élevée et l'eau demeure dans la zone de racinement durant la majeure partie de la saison de croissance. Les marais sont caractérisés par une végétation émergente qui comprend roseaux, joncs et carex. Les niveaux d'eau de surface peuvent fluctuer selon les saisons et, aux périodes d'étiage, exposer des plages de végétation dense et des espaces vaseux ou salés (*idem*).

***Répartition et abondance***

On ne connaît pas encore exactement l'étendue des milieux humides au Canada (NWWG, 1988), mais des travaux de classification et de cartographie sont en cours (Halsey et Vitt, sous presse). Selon les évaluations, les milieux humides couvriraient environ 14 % de la superficie du pays ou 127,2 millions d'hectares (ha) (tableau 3.1, figure 3.1). On a également évalué que les tourbières occupaient environ 111,3 millions d'hectares et que, pour tout le Canada, le volume de tourbe, basé sur l'épaisseur moyenne de la tourbe, représente 3 trillions de mètres cubes.

Au Canada, la répartition des milieux humides est déterminée principalement par les régimes hydrogéomorphologiques et climatiques locaux qui influent sur l'apport d'eau provenant des précipitations et la perte par évapotranspiration. Le tableau 3.1 montre la répartition des milieux humides en fonction du climat et de la topographie. La plus forte concentration de milieux humides de l'intérieur des terres se trouve dans une bande allant du nord de l'Ontario à la vallée du Mackenzie, en passant par le centre du Manitoba et de la Saskatchewan et le nord de l'Alberta. C'est une région où les conditions sont propices à la formation de tourbières, car le climat y est frais en été et très froid en hiver, et la moyenne annuelle des précipitations relativement basse. Le long de cette bande, les plus importantes concentrations de tourbières se trouvent dans les zones de bas relief, comme dans les basses terres des baies d'Hudson et James et près du lac Winnipeg. Les moraines bosselées des Prairies contiennent un nombre incalculable de dépressions, dont beaucoup sont devenues des milieux humides, couvrant peut-être 15 à 20 % de la superficie de cette région (NWWG, 1988).

**Tableau 3.1 Répartition des milieux humides et des tourbières par province et territoire au Canada** (NWWG, 1988)

| | Superficie des tourbières | | Superficie totale des milieux humides | |
|---|---|---|---|---|
| **Province ou territoire** | ha x $10^3$ | % de la superficie | ha x $10^3$ | % de la superficie |
| **Alberta** | 12 673 | 20 | 13 704 | 21 |
| **Colombie-Britannique** | 1 289 | 1 | 3 120 | 3 |
| **Manitoba** | 20 664 | 38 | 22 470 | 41 |
| **Nouveau-Brunswick** | 120 | 2 | 544 | 8 |
| **Terre-Neuve et Labrador** | 6 429 | 17 | 6 792 | 18 |
| **Territoires du Nord-Ouest** | 25 111 | 8 | 27 794 | 9 |
| **Nouvelle-Écosse** | 158 | 3 | 177 | 3 |
| **Ontario** | 22 555 | 25 | 29 241 | 33 |
| **Île-du-Prince-Édouard** | 8 | 1 | 9 | 1 |
| **Québec** | 11 713 | 9 | 12 151 | 9 |
| **Saskatchewan** | 9 309 | 16 | 9 687 | 17 |
| **Territoire du Yukon** | 1 298 | 3 | 1 510 | 3 |
| **Canada** | 111 327 | 12 | 127 199 | 14 |

### *Fonctions et valeurs des milieux humides*

Par le passé, les milieux humides étaient perçus comme des terres inutilisables, incultes et nuisibles aux humains. Cependant, notre perception a beaucoup évolué. À l'état naturel, les milieux humides présentent diverses fonctions hydrologiques qui offrent des valeurs appréciables à la société (*idem*). Entre autres, ils servent de protection contre les inondations, favorisent l'apport d'éléments nutritifs, diminuent la pollution, offrent des sites propices à la recherche scientifique ainsi qu'aux activités récréatives et éducatives, tout en contribuant à la production agricole et forestière (tableau 3.2). Toutefois, ces fonctions et valeurs ne sont pas immuables. Tant les changements environnementaux qu'anthropiques peuvent accroître, diminuer ou éliminer ces fonctions, et donc modifier la valeur des milieux humides. Le changement climatique est un facteur qui pourrait transformer considérablement les fonctions et les valeurs des milieux humides.

Les marais présentent trois principales fonctions hydrologiques : la stabilisation du débit, l'alimentation et l'écoulement des eaux souterraines, et la lutte contre l'érosion. Les milieux humides conservent également l'eau en retenant la neige et en rechargeant l'humidité des sols (Fuller, 1997). Le drainage des milieux humides peut causer des inondations et l'eutrophisation des plans d'eau en aval, et réduire le taux d'alimentation des eaux souterraines. La végétation des milieux humides contribue également à limiter l'érosion en stabilisant les rives, en dispersant l'énergie des vagues et des courants et en piégeant les sédiments. La lutte contre l'érosion est particulièrement significative dans les marais de rivage, les marais côtiers et les vastes milieux d'eau peu profonde (NWWG, 1988). Les marais agissent également comme des filtres en captant et en éliminant les matières polluantes comme les sédiments, les métaux lourds, les éléments nutritifs et les pesticides, améliorant ainsi la qualité de l'eau (Mortsch, 1990).

De plus, les marais jouent un rôle crucial dans la chaîne alimentaire du fait de leur importante productivité primaire et de leur activité microbienne (NWWG, 1988). La productivité nette des marais et des marécages est plus élevée que celle des lacs, des cours d'eau et des terres agricoles (Mortsch, 1990). En outre, les milieux humides contribuent à la diversité biologique des Prairies canadiennes (Robarts et Waiser, 1998). Les milieux humides de prairie constituent l'aire de reproduction la plus importante d'oiseaux aquatiques sur le continent nord-américain. La prairie contribue annuellement pour 50 à 80 % à la production totale de canards (Poiani et Johnson, 1991), dont 20 des 34 espèces qui se reproduisent en Amérique du Nord (Covich *et al.*, sous presse). Les conditions hydriques de mai influent grandement sur le taux de reproduction des oiseaux aquatiques, et la production annuelle d'oiseaux ainsi que la densité de couples reproducteurs sont directement liées au nombre de milieux humides disponibles au printemps (Sorenson et Root, sous presse). La qualité des habitats de reproduction dépend de la variété des types de permanence dans un complexe de milieux humides (Larson, 1995; Poiani et Johnson, 1991) vu l'importance, pour la survie des oisillons, de la persistance des milieux humides au cours de la saison de croissance des oiseaux aquatiques. Les milieux humides temporaires et saisonniers fournissent une abondante nourriture en graines et en invertébrés et sont très fréquentés par les canards barboteurs au printemps. Ceux qui sont inondés à certaines saisons constituent également des aires de nidification et d'élevage, en plus d'offrir des sources de nourriture tant aux canards barboteurs qu'aux canards plongeurs, surtout durant les années où les niveaux d'eau sont élevés. Lorsque les milieux humides saisonniers s'assèchent, les oiseaux qui reviennent nicher trouvent

leur nourriture dans les zones d'eau libre des milieux semi-permanents et y élèvent leur couvée (Poiani et Johnson, 1991). Il existe également d'autres milieux humides ailleurs sur le continent qui offrent des habitats appréciables (p. ex., les milieux riverains des Grands Lacs, où se reproduisent une grande variété d'espèces et où font halte près de trois millions d'oiseaux aquatiques sur les grandes voies migratoires de l'Atlantique et du Mississippi).

**Tableau 3.2 Fonctions et valeurs des milieux humides** (adapté de Cox, 1993)

| Fonctions | Valeurs |
|---|---|
| Vitale | |
| Régulation et absorption de l'eau | |
| Régulation du climat | Stabilisation des débits |
| Absorption/adsorption de substances toxiques | Alimentation et rétention des eaux souterraines |
| Stabilisation des processus de la biosphère | Réduction des dommages causés par les tempêtes |
| hydrologie | Lutte contre l'érosion |
| Épuration des éléments nutritifs | Réduction des contaminants et absorption des déchets |
| Santé des écosystèmes | |
| Cycle des éléments nutritifs | Qualité de l'environnement |
| Maintien de la chaîne alimentaire, habitat | Maintien de l'intégrité des écosystèmes |
| Stockage de la biomasse | Conservation des espèces rares, menacées et en péril |
| Diversité génétique et biologique | |
| Sociale et culturelle | |
| Scientifique et informative | Meilleure compréhension du milieu naturel |
| Spécimens destinés à la recherche, aux zoos et jardins botaniques | Lieux propices à l'étude du milieu naturel, à la recherche, et aux activités éducatives ou d'interprétation de la nature |
| Écosystèmes représentatifs et uniques | |
| Esthétique et récréative | |
| Activités non commerciales comme l'observation de la nature, la photographie, l'ornithologie, la randonnée et la natation | Lieux de loisirs et de relaxation<br>Industrie du tourisme et retombées économiques locales |
| Culturelle et psychologique | |
| Utilisation des milieux humides pouvant s'inscrire dans certaines traditions communautaires, croyances religieuses ou activités culturelles | Cohérence sociale<br>Soutien de la culture<br>Valeurs à transmettre aux générations futures |
| Perspectives d'avenir | Valeurs à caractère symbolique |
| Production | |
| Production de subsistance | Nourriture, produits fibreux |
| Production naturelle d'oiseaux, poissons et plantes | Autonomie communautaire<br>Substitut à l'importation<br>Maintien des traditions |
| Production commerciale | |
| Aliments (poissons, récoltes), produits fibreux (bois, paille) et tourbe | Produits destinés à la vente, création d'emplois, source de revenus, contribution au PNB |

Bon nombre d'espèces végétales ou animales rares, menacées ou en péril survivent grâce à des habitats uniques qui se trouvent seulement dans les milieux humides. De plus, de nombreuses espèces à fourrure sont tributaires des habitats en milieux humides, tandis que d'autres mammifères les fréquentent périodiquement pour s'alimenter, s'abriter, se reproduire, se reposer, etc. Les milieux humides, qui sont essentiels au maintien de certains stocks de poissons, sont des sites de fraye et de reproduction pour une grande variété d'espèces de poissons qui y trouvent nourriture et abri. La diversité et l'abondance des espèces animales sont maximales là où les eaux libres sont entrecoupées de zones de végétation émergente et aquatique. La valeur d'un milieu humide pour ce qui est de l'habitat faunique dépend de son type et de sa taille; de sa structure et de la diversité des communautés végétales qu'il abrite; de la chimie de l'eau; de la présence de nourriture appropriée et d'un abri convenable; de l'absence de perturbations; et de l'utilisation des terres avoisinantes. Chacun de ces paramètres sera modulé par les changements climatiques (Larson, 1994). Ces habitats remplissent aussi des fonctions récréatives comme les activités d'ornithologie, de chasse, de randonnée, de canotage, de camping et de photographie de même que des activités commerciales comme la pêche et le piégeage (Mortsch, 1990).

Les tourbières présentent des habitats beaucoup moins variés et abritent une faune plus restreinte que les marais. Peu d'espèces sauvages y vivent toute l'année, mais beaucoup les fréquentent sur une base saisonnière ou occasionnelle pour s'abriter ou se nourrir. Les densités d'oiseaux aquatiques dans les tourbières sont également faibles par rapport à celles des marais et des zones d'eaux libres, mais la vaste région des tourbières produit toujours beaucoup d'oiseaux qui viennent s'ajouter aux populations continentales (NWWG, 1988).

Les tourbières de la forêt boréale sont d'importants puits de carbone, car l'accumulation des végétaux morts y est plus rapide que leur décomposition (Brown, sous presse). Les tourbières contiennent environ $500 \times 10^{15}$ g de carbone organique, qui s'est pour la plus grande partie accumulé au cours des 5 000 dernières années à un rythme d'environ 100 téragrammes par année (Tg/an) (Moore *et al*., sous presse). On estime qu'il s'accumule en moyenne 800 grammes de carbone par mètre carré ($gC/m^2$) dans la végétation de surface et $1 \times 10^5$ $gC/m^2$ dans la tourbe elle-même (Poschadel *et al*., sous presse), ce qui équivaut à environ un siècle de la combustion actuelle de combustibles fossiles et à une réduction d'environ 40 ppm de la concentration atmosphérique de $CO_2$ (Roulet *et al*., 1997). La tourbe extraite des tourbières est utilisée à des fins horticoles ou énergétiques. La mousse fibreuse (*sphaigne*) qu'on trouve dans les bogs est réservée à un usage horticole, et il existe de nombreuses usines de transformation de la tourbe dans la région des milieux humides de la forêt boréale du Canada. L'utilisation de la tourbe comme combustible est possible, mais la conjoncture économique actuelle ne porte pas à cet usage au Canada (NWWG, 1988).

Des interactions complexes se produisent entre les composantes air, eau, sol, végétation et les éléments fauniques des écosystèmes des milieux humides. Ces interactions peuvent être modifiées par les activités des milieux ou celles des terres adjacentes. L'hydrologie des milieux humides, par exemple, est liée aux flux entrants et sortants des eaux du bassin versant. Les activités humaines, qui ont un effet direct sur le bilan hydrique des milieux humides, influeront également sur l'hydrologie et les autres éléments de ces milieux, et pourraient avoir un impact sur le changement climatique. On y inclut les pratiques agricoles et forestières, de même que la construction de

routes et l'urbanisation. Outre les interactions entre les milieux humides et l'hydrologie, il existe également un lien complexe entre ces milieux et les hautes terres avoisinantes. La présence de milieux humides dans les bassins hydrologiques boisés modifie grandement le rejet de substances chimiques dans les cours d'eau de surface. Les milieux humides du Bouclier précambrien, par exemple, contribuent à atténuer les effets du dépôt acide en emmagasinant l'azote et les sulfates.

Les MOD constituent l'un des produits les plus importants des milieux humides. Dans les milieux aquatiques, elles sont une composante essentielle du réseau alimentaire, en plus de jouer un rôle de premier plan dans le transport et la toxicité des métaux en traces et d'autres contaminants, d'influer sur la pénétration de la lumière et de protéger les organismes aquatiques contre les effets du rayonnement ultraviolet (UV).

## IMPACTS POSSIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES MILIEUX HUMIDES

### *Hydrologie*

Les milieux humides devraient réagir rapidement au changement climatique. Un climat plus chaud et plus sec aura un impact sur l'hydrologie, la géochimie, les fonction écologiques, la qualité de l'eau, ainsi que sur l'alimentation de la nappe d'eau souterraine des milieux humides. En outre, le réchauffement de l'eau et de l'air influera sur l'équilibre énergétique des lacs et des milieux humides et pourrait réduire l'étendue de la glace en hiver à certains endroits (Mortsch et Quinn, 1996). Les fluctuations du niveau d'eau dans les zones semi-permanentes modifieront le rapport entre le couvert végétal émergent et les zones d'eau libre. Ainsi, les milieux semi-permanents pourraient être envahis par une végétation émergente au cours de longues sécheresses et demeurer en eau libre ou maintenir des conditions plus équilibrées au cours de périodes pluvieuses ou normales. Les résultats obtenus par la modélisation (Poiani *et al.*, 1995) semblent indiquer que les cycles naturels des périodes pluvieuses et sèches qui caractérisent les milieux semi-permanents pourraient subir des transformations considérables si le régime des précipitations était modifié et les températures plus élevées au cours de la saison de croissance. Dans ces simulations, l'hydrologie et la végétation des milieux humides ont été très sensibles aux changements saisonniers des précipitations et, dans les scénarios de réchauffement climatique, les niveaux d'eau maximums ont été nettement plus bas que ceux observés dans les conditions climatiques actuelles.

Poiani *et al*. (1995) ont mis à l'essai un certain nombre d'autres scénarios liés au changement climatique. Les résultats montrent que seule une augmentation des pluies printanières et du ruissellement de fonte de la neige équivalant à 10 % des précipitations totales de la saison de croissance pouvait compenser la perte accrue d'eau par évapotranspiration due au réchauffement du climat. Une diminution comparable de 10 % des précipitations au printemps a donné les niveaux d'eau les plus bas prévus par les scénarios de changement climatique, d'où l'importance des précipitations printanières et du ruissellement dans le bilan hydrique des milieux humides de prairie. De plus, ces simulations semblent indiquer qu'un milieu semi-permanent pourrait passer d'une zone essentiellement d'eau libre à un bassin complètement fermé avec végétation émergente, même dans le vaste éventail de changements des précipitations saisonnières projetés actuellement pour la région des Grandes Plaines.

La réaction écologique à de légères variations dans l'hydrologie pourrait être énorme. La perte d'une quantité même minime d'eau au cours d'années sèches permettrait une installation plus rapide des semis sur les vasières exposées. La sensibilité au changement de l'hydrologie pourrait avoir des répercussions à long terme sur la dynamique de la végétation et accélérer la disparition de zones d'eau libre. Un des résultats inattendus de l'étude de Poiani *et al.* (1995) a été la perte considérable de zones de prairies marécageuses et de marais peu profonds avec une hausse comme avec une baisse des précipitations au printemps.

Un autre effet important obtenu par la simulation d'une hausse des températures et d'une baisse des précipitations a été l'augmentation de la salinité due à la diminution du ruissellement de surface et de l'apport direct des précipitations pour la dilution; à l'augmentation de l'évapotranspiration et à la réduction de l'écoulement de surface (Covich *et al.*, sous presse). Les changements des régimes de précipitations pourraient modifier ceux de la décharge de la nappe d'eau souterraine et du ruissellement dû à la fonte des neiges dans les milieux humides des cuvettes des prairies, ce qui influera sur le transport des matières dissoutes et sur la qualité de l'eau dans les écosystèmes de milieux humides. Comme les milieux humides de prairie ne sont pas alimentés ni vidés par des cours d'eau de surface, leur salinité est très influencée par les eaux souterraines, elles-mêmes alimentées par l'eau de la fonte des neiges, qui contient des chlorures drainés des fermes avoisinantes (Hayashi *et al.*, 1997).

Les changements dans les méthodes de gestion des terres peuvent aussi altérer l'hydrologie des milieux humides de prairie. Les données montrent que, dans ces milieux, les niveaux d'eau baissent lorsque les terres cultivées sont transformées en prairies (Fuller 1997). La transformation des bassins versants en pâturages semble entraîner avec le temps l'assèchement des marais, contrairement aux bassins où l'on pratique une alternance culture-jachère. Par ailleurs, les pratiques agricoles ont entraîné une hausse des inondations en augmentant le ruissellement provenant des champs dénudés. (Hall *et al.*, 1997; Su *et al.*, 1997).

Le changement climatique aura également une incidence sur l'équilibre entre la photosynthèse et la décomposition dans les sols humides. On peut s'attendre à ce que la photosynthèse, la décomposition des végétaux et les émissions de $CH_4$ s'accroissent directement avec l'augmentation des températures et de la durée de la saison de croissance. Ces effets pourraient être fortement dépassés par ceux qu'entraîneront les changements hydrologiques, notamment les variations du niveau de la nappe phréatique. On peut s'attendre à un abaissement notable de la nappe phréatique et à une oxydation de la tourbe dans les régions du sud, du fait d'une plus grande évapotranspiration, et à la fonte du pergélisol plus au nord, où il pourrait y avoir davantage de précipitations. Le ruissellement rapide des eaux provenant de la fonte du pergélisol pourrait exacerber l'abaissement de la nappe phréatique qu'entraîneront très certainement la hausse des températures et l'augmentation de l'évapotranspiration due à celle de la végétation. L'abaissement de la nappe phréatique favorise la libération de $CO_2$ par oxydation de la tourbe, mais peut également restreindre les émissions de $CH_4$. Le degré d'oxydation de la tourbe induit par la baisse de la nappe phréatique, et indirectement par le réchauffement climatique, sera probablement élevé, mais aussi extrêmement difficile à prévoir. L'hydrologie des vastes tourbières est complexe et peut être influencée par la nature du couvert végétal tout comme par le processus de formation de la tourbe (Gorham, 1991).

### *Pergélisol*

Bien que le pergélisol soit caractéristique de climats très froids, on en trouve également dans le sud, où sa présence est fonction de la topographie locale, du type du sol, de l'hydrologie, de la végétation et de la fréquence des incendies. Une hausse des températures de 5 °C entraînerait à terme la fonte du pergélisol dans toutes les régions, sauf dans le Grand Nord (Gorham, 1995). Il y a environ 6 000 ans, pendant la période chaude de l'holocène, la température moyenne annuelle était supérieure d'environ 5 °C à la température actuelle, et la zone de pergélisol dans les tourbières se trouvait de 300 à 500 km plus au nord que maintenant (Zoltai, 1995). Un réchauffement de seulement 2 °C transformerait la majeure partie de la région des tourbières du Canada, et plus particulièrement les vastes basses terres des baies James et d'Hudson; d'une zone de pergélisol discontinu, elle deviendrait une zone de pergélisol sporadique, ce qui aurait des conséquences importantes sur son écologie et sa biogéochimie. Le réchauffement aurait également pour effet de repousser plus au nord la limite des arbres et de favoriser à nouveau l'accumulation de tourbe dans les tourbières subarctiques, où le refroidissement du climat et la formation de pergélisol continu y avaient mis fin (Gorham, 1991).

Les scénarios actuels de changement climatique prévoient une diminution de l'ordre de 43 à 23 % de la superficie de la zone de pergélisol du Canada, les écozones boréales et subarctiques étant les plus affectées par ce recul vers le nord (Kettles *et al*., 1997). Ces changements auront une incidence sur la vitesse de décomposition de la tourbe, sur les flux de $CO_2$ et de $CH_4$ et sur les quantités exportées de carbone organique dissous provenant des tourbières, qui altéreront ultérieurement la qualité de l'eau dans les bassins des tourbières.

À plus long terme, la fonte du pergélisol aura probablement deux effets contraires. D'une part, elle abaissera le niveau de la nappe phréatique dans les zones où le ruissellement mène à une érosion thermokarstique et à la formation de dépressions, ce qui entraînera un accroissement considérable des émissions de $CO_2$ et l'interruption des émissions de $CH_4$. D'autre part, les lacs formés par la fonte du pergélisol pourraient au début être davantage des sources de $CO_2$ que des puits, mais, à terme, avec la succession des plantes, ils deviendront des fens et des bogs et piégeront le $CO_2$. Cependant, à l'heure actuelle, il est impossible de déterminer l'équilibre global entre drainage et inondation qui s'établira avec la fonte du pergélisol (Gorham, 1995).

### *Répartition et abondance des milieux humides*

On peut avoir une idée de l'impact possible du changement climatique sur les milieux humides des cuvettes de prairie en évaluant l'incidence des sécheresses des années 80 (car il y en a eu plusieurs au cours de cette décennie) sur les projets en milieux humides gérés par Canards Illimités. L'évaluation a montré que 5 à 23 % de ces projets dans les Prairies étaient des milieux secs, et que seulement 58 à 75 % d'entre eux offraient un habitat de couvaison adéquat par rapport aux conditions qui prévalaient avant les sécheresses (tableau 3.3). Les milieux humides qui n'avaient pas une alimentation en eau garantie ont été le plus durement touchés (Coley, 1997). On peut, en outre, établir les conditions futures des milieux humides à partir des évaluations actuelles et passées des chutes de neige, données qui peuvent également servir à la prévision des inondations

dans ces milieux au printemps. Toutefois, la topographie et l'humidité des sols à l'automne peuvent fortement influer sur cette relation (Woo *et al.*, 1993).

Larson (1995) a mis au point des modèles pour lier le nombre de bassins de milieux humides et les variables climatiques dans la région des cuvettes des Prairies, et étudier les effets possibles des variations de température et de précipitations sur le nombre de bassins contenant de l'eau. La température était l'élément le plus déterminant dans la forêt-parc, où une hausse de 3 °C a entraîné une baisse de 56 % du nombre moyen de bassins humides (tableau 3.3). Les effets d'un changement similaire ont été moins importants dans la prairie canadienne, où l'on a observé une baisse de 15 % du nombre de bassins humides. Une augmentation de 10 % des précipitions seulement a entraîné une hausse de 11 à 12 % des bassins humides dans les régions étudiées. Une augmentation de 10 % du taux de précipitation a également atténué certains des effets du réchauffement, mais les résultats variaient d'une région à l'autre. Dans la prairie canadienne, une augmentation de 10 % des précipitations a presque compensé un réchauffement de 3 °C, tandis que les bassins humides de la forêt-parc continuaient d'accuser une baisse de 39 %. Dans ces régions, une diminution de 10 % des seules précipitations seulement a donné une baisse comparable du nombre de bassins humides. En appliquant ensemble la baisse des précipitations et une élévation des températures de 3 °C, les modèles mettaient encore une fois en évidence la sensibilité à la température des milieux humides des forêts-parcs par rapport à ceux de la prairie : le nombre de bassins humides dans la forêt-parc a diminué de 74 % et ceux de la prairie canadienne de 31 % (Larson, 1995). Johnson (1997) a également souligné que, selon un scénario où la température monterait de 3 °C et les précipitations baisseraient de 20 %, il y aurait une perte de 15 à 20 % du nombre de milieux humides dans les plaines du sud. La température était le facteur le plus important et une hausse de 20 % des précipitations était nécessaire pour compenser un réchauffement de 3 °C.

**Tableau 3.3 Projections des modèles avec un accroissement des températures et des précipitations** (Larson 1995)

| | **% moyen annuel de bassins humides** (% de changement entre parenthèses) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zone étudiée par les modèles** | % observé entre 1974-1987 | +3 °C | +6 ºC | +10 % précip. | +3 °C +10 % précip. | -10 % précip. | +3 °C et -10 % précip. |
| Forêt-parc | 51,5 | 22,4 (-56) | 4,5 (-91) | 57,2 (+13) | 31,2 (-38) | 36,3 (-28) | 13,4 (-74) |
| Prairie canadienne | 49,2 | 42,0 (-15) | 35,1 (-29) | 55,0 (+12) | 50,0 (+2) | 38,9 (-21) | 34,1 (-31) |
| Prairie américaine | 51,4 | 36,4 (-28) | 22,8 (-56) | 57,8 (+12) | 45,3 (-12) | 38,2 (-26) | 22,8 (-56) |

La sensibilité des milieux humides de la forêt-parc aux variations de la température et des précipitations peut s'expliquer par une plus grande évapotranspiration due à une biomasse et à des couches de végétation plus abondantes. La plus grande vulnérabilité de ces bassins a des

répercussions importantes sur les oiseaux aquatiques qui s'y reproduisent. La densité des bassins est de deux à trois fois plus élevée dans cette région que dans la prairie, ce qui en fait un important réservoir d'habitats de reproduction. Les études indiquent que de nombreuses espèces de canards arrivent dans ces aires de reproduction par le sud, s'arrêtant au premier habitat disponible (Sorensen *et al*., sous presse). Les oiseaux qui ne peuvent pas trouver d'habitat adéquat dans la prairie se dirigent plus au nord vers la forêt-parc. D'autres espèces, comme le fuligule à dos blanc, fréquentent la forêt-parc comme premier habitat de reproduction, et se dispersent plus au nord ou au nord-ouest si les conditions n'y sont pas propices à la nidification. Les différences géographiques dans la réaction des milieux humides à la température ont des conséquences importantes, notamment une baisse de la probabilité que les oiseaux aquatiques trouvent de meilleures conditions en migrant plus au nord. Il est donc essentiel de conserver les milieux humides de prairie qui pourraient être moins touchés par les changements climatiques (Larson, 1995).

Le changement climatique modifiera considérablement la répartition des tourbières du Canada. L'élévation des températures décalera les grandes régions de tourbières vers le nord, comme nous l'avons vu précédemment. Toutefois, en dépit de l'augmentation globale des précipitations, il semble probable que la fréquence des graves sécheresses estivales augmente de façon notable, ce qui entraînera une dégradation des tourbières du sud beaucoup plus rapide que leur migration vers le nord jusque dans les régions polaires, surtout si les incendies et les sécheresses y sont beaucoup plus fréquents. Il y aura donc probablement une diminution de la superficie totale de la région des tourbières (Gorham, 1994;1995).

### *Écosystèmes des milieux humides*

Oiseaux aquatiques

Entre 1955 et 1974, l'abondance de canards dans la prairie-forêt-parc du Canada était étroitement liée aux variations du climat et aux conditions ambiantes dans les milieux humides. Les populations de canard pilet, canard colvert, canard souchet, sarcelle à ailes bleues et de fuligule à tête rouge, en particulier, suivaient les changements de conditions des milieux humides (Bethke et Nudds, 1995). La modélisation (Larson, 1995; Poiani et Johnson, 1991) semble indiquer que les changements climatiques projetés pourraient entraîner à la fois une diminution du nombre et de la qualité des milieux humides disponibles pour la production d'oiseaux aquatiques, bien qu'aucune des études n'envisage la disparition possible des milieux humides temporaires, qui offrent un important habitat aux oiseaux aquatiques et de rivage migrateurs (Larson, 1995). En général, un climat plus chaud et plus sec pourrait faire baisser la production d'espèces aquatiques, car il y aura accroissement du nombre de bassins secs et le rapport eau-couvert végétal sera moins favorable (c.-à-d. végétation émergente dense avec peu ou pas de zones d'eau libre). Un accroissement du couvert végétal émergent pourrait avoir un impact négatif sur la production d'oiseaux aquatiques, surtout si leur dépendance à l'égard de ces milieux augmente (Poiani et Johnson, 1991).

Cette baisse possible de la production d'oiseaux aquatiques due au changement climatique arrive à un moment où l'on observe un déclin dramatique de leur population pour d'autres raisons comme

les maladies, la perte d'habitats et la chasse à outrance qui, conjuguées aux stress existants liés aux pratiques agricoles, pourraient contribuer encore plus à la disparition des valeurs et des fonctions qui caractérisent les milieux humides (Coley, 1997; Covich *et al*., sous presse). Un climat plus sec pourrait accroître la vulnérabilité des milieux humides peu profonds, temporaires et saisonniers. De plus, l'évolution du climat exacerbera très certainement le problème du déclin actuel des populations d'oiseaux aquatiques. Si c'était le cas, il faudrait redoubler les efforts prévus dans le Plan nord-américain de gestion de la sauvagine pour juguler le déclin des oiseaux aquatiques (Poiani et Johnson, 1991).

Canards Illimités gère plus de 2 000 projets en milieux humides et plus de 2 600 dans les hautes terres, sur une superficie de plus de 1 100 000 ha dans la prairie et la forêt-parc du Manitoba, de la Saskatchewan et de l'Alberta. Ces projets pourraient être menacés si l'impact du changement climatique réduisait le nombre et la profondeur des étangs, surtout des étangs saisonniers et temporaires, contenant de l'eau au printemps et en été. On s'attend à ce que de nombreux milieux humides gérés par Canards Illimités s'assèchent avec un climat plus sec, bien que les milieux humides qui ont un approvisionnement en eau lié aux systèmes d'irrigation soient moins menacés, à moins que l'approvisionnement global en eau ne devienne un enjeu (Coley, 1997).

Dans le bassin des Grands Lacs, Canards Illimités a mis au point 63 projets de marais, sur une superficie de 6 300 ha, dont la plupart sont indépendants et ont un approvisionnement de bassin versant limité. L'alimentation en eau est assurée par un système de pompage depuis les Grands Lacs. Si le niveau d'eau était bas dans les Grands Lacs, il faudrait ajuster la capacité de pompage afin d'alimenter chacun des marais. L'allocation de permis pour adduction en eau pourrait constituer un sérieux problème dans les nouvelles conditions climatiques, vu l'augmentation prévue de la compétition. Canards Illimités peut modifier ses programmes afin de minimiser les impacts, continuer de conclure des ententes avec les districts d'irrigation pour assurer l'alimentation en eau des milieux humides, en plus d'obtenir et de réserver des zones humides et des hautes terres à la limite entre la forêt et la forêt-parc (*idem*). Toutefois, les systèmes gérés ne représentent qu'un faible pourcentage des milieux humides du Canada.

Biodiversité

La transformation des communautés végétales est l'un des effets les plus importants du changement climatique (Gorham, 1995). Les milieux humides ont évolué en réaction au climat et au régime à long terme des niveaux d'eau. La position de chaque communauté de milieu humide par rapport aux autres est fonction du gradient de profondeur de l'eau et de l'inclinaison du rivage. Leur étendue s'agrandit ou se rétrécit selon les fluctuations des niveaux d'eau. Les inondations et les asséchements saisonniers et annuels, par exemple, maintiennent les milieux humides riverains des Grands Lacs à des stades de développement productifs (Mortsch, 1990). Les grands cours d'eau se caractérisent par un vaste continuum de milieux humides, allant de systèmes aquatiques saisonniers à constamment submergés (Hudson, sous presse). De plus, le niveau des crues, le niveau d'eau minimum, le régime saisonnier des hautes et basses eaux, le niveau d'eau moyen annuel ainsi que la variabilité à court et à long terme des niveaux d'eau contribuent à la diversité des espèces, en offrant une vaste gamme de conditions aux espèces opportunistes.

Un climat modifié forcera les milieux humides à s'adapter à un nouveau régime de fluctuation des niveaux d'eau (Mortsch, 1990; Mortsch et Quinn, 1996). En outre, la réaction de ces milieux aux bas niveaux annuels dépendra de leur type, de leur géomorphologie et de leur bathymétrie. La lisière intérieure des marais pourrait s'assécher, mais la végétation dominante (c.-à-d. carex, herbes, roseaux et plantes aquatiques) pourrait coloniser des sites appropriés découverts si la profondeur de l'eau est adéquate. Dans les milieux humides riverains ouverts, la végétation peut migrer et coloniser les nouveaux habitats disponibles. Cependant, ceux du Bouclier précambrien, où les pentes sont irrégulières et le substrat rocheux, le nombre de sites qui pourraient être recolonisés avec succès sera moins important (Mortsch, 1990).

Des études menées au marais Delta, au Manitoba, montrent la complexité des réactions de la végétation à différents niveaux d'eau ainsi qu'aux fluctuations de ces niveaux (Seabloom *et al*., 1997). Les espèces végétales réagissent aux conditions biotiques et abiotiques, de même qu'aux phénomènes actuels et passés. L'abondance de la végétation tient, entre autres, à la profondeur de l'eau, à la propagation végétative, aux conditions de germination, aux taux de survie lors de sécheresses ou d'inondations de même qu'aux mécanismes de dispersion. Les modifications les plus importantes dans la répartition des espèces surviennent immédiatement après des changements rapides de certains facteurs, comme la profondeur de l'eau.

Hudon (sous presse) a étudié les impacts des fluctuations du niveau d'eau sur les marais en bordure du Saint-Laurent sur un tronçon de 165 km. Le niveau d'eau semble exercer une influence déterminante sur la répartition de la végétation émergente et submergée, la profondeur de la biomasse maximale étant bien définie pour la plupart des espèces. Bien qu'en 1995 les faibles niveaux d'eau aient causé un assèchement variant entre 0 et 77 % de la superficie auparavant colonisée par une végétation submergée, l'abondance et la répartition de la végétation émergente n'ont pas souffert de la sécheresse. Les marais avec une végétation émergente occupaient 37 % de la superficie totale des milieux quand les niveaux d'eau étaient bas, 18 % avec les niveaux courants et 6% avec un niveau d'eau élevé. C'est ainsi que le lac Saint-Pierre est passé d'un vaste marais avec de faibles niveaux d'eau à un plan d'eau libre avec des niveaux d'eau élevés (*idem*).

Les systèmes souterrains bien développés de la végétation émergente lui permettent de résister aux fluctuations des niveaux d'eau, tandis que les plantes submergées avec peu des rhizomes souterrains ne pourraient survivre à des sécheresses. La baisse des niveaux d'eau, qui fait disparaître la végétation à la limite supérieure des marais et libère de l'espace dans la partie inférieure, pourrait favoriser l'invasion d'espèces opportunistes ou exotiques. Si l'on compare les espèces indigènes à de nombreuses espèces exotiques, ces dernières n'offrent malheureusement qu'un couvert sous-optimal et un potentiel alimentaire réduit. Des changements dans la composition en espèces végétales peuvent avoir un impact aussi important, si ce n'est plus, que ceux de la biomasse pour les habitants des marais riverains. La diversité des espèces, l'invasion par des espèces exotiques et la dominance d'une espèce en particulier pourraient être fortement influencées par les fluctuations saisonnières et interannuelles des niveaux d'eau, ainsi que par la très grande imprévisibilité des régimes de décharge et la réduction du débit lors des sécheresses (*idem*).

En outre, les changements climatiques auront aussi un impact profond sur la succession de la végétation des tourbières et donc sur leur biogéochimie. Dans les zones où il y a un abaissement important des nappes phréatiques, la végétation pourrait difficilement se réimplanter si les éléments nutritifs sont extrêmement limités (Gorham, 1995).

Les gaz à effet de serre (GES) ont également un effet direct sur la réaction des systèmes biotiques au changement climatique. La fertilisation par le $CO_2$ pourrait augmenter la productivité des écosystèmes des milieux humides, modifier la composition des communautés végétales des hautes terres et influer sur la qualité et la disponibilité des habitats de hautes terres pour diverses espèces d'oiseaux aquatiques. Les effets du $CO_2$ sur la croissance des plantes varient selon les espèces, ce qui modifie également les interactions entre espèces.

***Biogéochimie***

Gaz à effet de serre

Les tourbières emmagasinent dans leurs sols plus de carbone que tout autre écosystème terrestre, ce qui en fait des réservoirs particulièrement importants. Nous ne savons pas encore très bien comment elles répondront au changement climatique, à l'augmentation des concentrations de $CO_2$, ainsi qu'à d'autres facteurs comme les nouvelles utilisations des terres, mais cette question fait l'objet de recherches actives. Certaines études de modélisation suggèrent que le changement climatique entraînera une augmentation de la productivité nette des écosystèmes, ce qui améliorera donc les puits de carbone terrestres actuels. D'autres laissent penser que les limites de l'approvisionnement en éléments nutritifs nuiraient à l'augmentation nette des concentrations de carbone dans les écosystèmes (Environnement Canada, 1997).

Une étape importante du cycle du carbone dans les milieux humides est la décomposition aérobie et anaérobie de la tourbe, qui libère du $CH_4$ et du $CO_2$ dans l'atmosphère. L'oxydation de seulement 1 % du carbone emmagasiné dans les tourbières libérerait une quantité de $CO_2$ équivalente aux rejets anthropiques (Roulet *et al.*, 1997). L'établissement de conditions anaérobies dans la tourbe favorise la production de $CH_4$, et la formation postglaciaire des tourbières du nord pourrait avoir entraîné à l'échelle planétaire une augmentation des émissions de $CH_4$ de l'ordre de 10 à 30 x $10^{12}$ g/an et être responsable de la hausse des concentrations atmosphériques de $CH_4$, qui sont passées de 0,60 à 0,75 parties par milliard en volume (ppbv) sur la période allant d'il y a 6 000 ans jusqu'à il y a 200 ans (Moore *et al.*, sous presse). Les milieux humides naturels demeurent une source importante de $CH_4$ atmosphérique, qui constitue de 15 à 20 % du bilan mondial de méthane. Les milieux humides du Canada produisent environ 3,5 Tg/an de méthane (Moore *et al.*, sous presse), dont 66 % dans les tourbières de la région boréale moyenne. Il existe, cependant, d'importantes lacunes dans les évaluations aériennes des flux de carbone de même que dans la profondeur et la densité de la tourbe.

Du méthane est produit dans la totalité de la tourbe, mais la majeure partie de celui qui est produit dans le sol tourbeux s'oxyde en $CO_2$ avant d'atteindre l'atmosphère. Le méthane qui est produit dans les couches profondes du sol diffusera lentement vers les couches supérieures, où il s'oxydera. Toutefois, des quantités considérables de méthane sont emmagasinées dans les couches

inférieures, dans un réservoir, qui pourrait libérer le gaz si la tourbe se dégradait rapidement dans des conditions sèches (Brown, sous presse).

Bien que plusieurs études suggèrent que les milieux humides du nord pourraient devenir une source de carbone atmosphérique sous un climat plus chaud et plus sec, les résultats de l'étude de Waddington *et al*. (sous presse) indiquent qu'un changement dans la capacité de rétention des eaux souterraines entraînerait une augmentation du nombre total de milieux humides « humides », ce qui accroîtrait davantage les puits de carbone. Il est important de prendre en considération l'incidence de la hauteur de la nappe phréatique des milieux humides sur la respiration et la production nette des écosystèmes.

Les composantes qui influent le plus sur le bilan du carbone dans les milieux humides sont les communautés végétales, la température, l'hydrologie, surtout la hauteur de la nappe phréatique, et la chimie ou la qualité des tissus végétaux et de la tourbe. On a observé que la tourbe plus âgée, plus récalcitrante, produisait moins de $CH_4$ et de $CO_2$ que la jeune tourbe moins profonde. Le taux d'accumulation et de décomposition de la tourbe peut varier par endroits dans le même milieu, d'où des fluctuations de qualité du substrat (Poschadel *et al.*, sous presse). La stabilité des tourbières est fonction des conditions ambiantes (Roulet *et al*., 1997), car, d'un site à l'autre, la variabilité dépend probablement des différences de qualité du substrat. Le taux de production de gaz de la tourbe de surface est souvent plus élevé que celui de la tourbe des couches inférieures, ce qui est probablement attribuable à la présence de carbone labile (c.-à-d. biodégradable) apporté par la matière organique nouvellement déposée, qui peut se minéraliser facilement (Poschadel *et al*., sous presse).

D'autres études semblent indiquer que des printemps plus chauds et des étés plus humides pourraient favoriser une plus grande absorption de $CO_2$ par la végétation des tourbières vu l'accroissement possible de leur productivité (Brown, sous presse). Toutefois, selon Gorham (1991), une hausse des températures stimulerait beaucoup plus la respiration des végétaux que la photosynthèse, en plus d'accroître la respiration fongique et microbienne et, par conséquent, les rejets de $CO_2$ dans l'atmosphère. En revanche, l'assèchement des bogs ombrotrophes entraînera la disparition de la tourbe, et le carbone qui y est emmagasiné pourrait alors être rejeté dans l'atmosphère. Si la majeure partie des milieux humides tempérés du nord disparaissaient du fait de l'abaissement de la nappe phréatique, cela aurait un effet considérable sur la composition de l'atmosphère (Brown, sous presse) en raison de l'accroissement de la minéralisation en $CO_2$ de plus grandes quantités du carbone emmagasiné dans les sols des milieux humides.

La production de $CH_4$ tend à être plus variable que celle du $CO_2$ tant dans l'espace que dans le temps (Moore *et al*., sous presse). Si le profil de tourbe est à des températures élevées, il y aura probablement un accroissement des rejets de $CH_4$. Le pic estival prononcé des émissions de $CH_4$ semble également indiquer que la hausse des températures pourrait entraîner une augmentation substantielle des émissions. Sa production nette est aussi très sensible à la hauteur de la nappe phréatique (Roulet *et al*., 1997). La végétation et la nappe phréatique variant considérablement d'une zone à l'autre dans les milieux humides du nord, le changement climatique entraînera des réactions diverses à ces émissions. On observera probablement l'impact le plus grand sur les rejets de $CH_4$ dans le nord de la zone boréale et le sud de la région subarctique, où le pergélisol est dis-

continu. La fonte du pergélisol entraînera la formation de bogs et de fens dans des dépressions du sol avec des émissions de $CH_4$ beaucoup plus importantes que maintenant (Moore *et al*., sous presse). Le taux d'émission semble aussi être largement lié au type de végétation. Toutefois, les rejets des étangs peuvent être de 3 à 30 fois plus élevés que ceux des zones adjacentes, ce qui laisse supposer que la classification de la végétation au moyen de la télédétection pourrait servir d'indicateur dans l'évaluation des émissions totales de méthane sur de vastes étendues.

Les réservoirs qui se forment lors de l'inondation de zones humides naturelles rejettent souvent plus de $CH_4$ et de $CO_2$ que les milieux humides naturels (*idem*). L'inondation semble augmenter le taux de production de $CH_4$ et le rapport de production de $CH_4$ et de $CO_2$. La production totale de GES dans les tourbières inondées se compose d'environ 40 % de $CH_4$ et 60 % de $CO_2$. Les réservoirs artificiels pourraient être des sources de $CH_4$ et de $CO_2$ atmosphériques pendant très longtemps (Poschadel *et al*., sous presse). L'inondation a également entraîné la formation d'îlots de tourbière, où l'eau chaude provenant des étangs circule sous les tapis flottants de tourbe, augmentant ainsi la température dans les couches inférieures. La flottabilité des îlots de tourbière influe également sur les propriétés de la tourbe ainsi que sur son régime hydrochimique, et pourrait permettre à davantage d'éléments nutritifs d'alimenter sa population microbienne, et laisser diffuser les gaz et les déchets métaboliques à l'extérieur des îlots. Lorsque la température dans les îlots passe de 4 à 20-25 °C, le taux de production de $CH_4$ est quatre fois plus élevé (Poschadel *et al*., sous presse).

Kelly *et al*. (1997) ont observé des émissions quotidiennes de $CO_2$ et de $CH_4$ dans les étangs des milieux humides, même lorsqu'il y a photosynthèse. Les flux de carbone provenant des étangs étaient plus importants que ceux des tourbières environnantes où le carbone restait peut-être emmagasiné dans les couches de tourbe. Si l'évolution du climat entraîne une réduction du rapport étang/végétation ou l'abaissement des nappes phréatiques, les émissions de méthane diminueront considérablement. En revanche, les émissions de $CO_2$ pourraient augmenter par endroits, peut-être assez pour compenser largement les réductions de rejets de méthane dues au climat. Il est nécessaire d'avoir des modèles de succession pour évaluer ce type de rétroaction milieux humides-changement climatique, car les émissions semblent être fortement influencées par les perturbations et les changements de succession (Environnement Canada, 1997). Le rapport tourbe-eau comporte diverses répercussions selon les différents types de systèmes de milieux humides et d'étangs.

Composition chimique des milieux d'eau douce

Avec le réchauffement climatique, la modification des habitats d'eau douce dans les régions de tourbières ainsi que leur rôle dans le transport des MOD pourraient revêtir une importance considérable pour le biote de ces milieux (Gorham, 1991). De nombreuses études ont été menées afin d'établir la quantité de carbone qui est emmagasinée par diverses composantes de la biosphère et comment s'effectuent les transferts d'un compartiment à l'autre. Les vastes tourbières du nord sont généralement parsemées d'étangs, de lacs et de bassins peu profonds et on a démontré le rôle de ces habitats d'eau douce dans le transfert du carbone de la tourbe aux chaînes alimentaires aquatiques (Gorham, 1991).

Au total, entre 5 à 40 g/m$^2$/an de carbone organique dissous provenant des MOD sont transférés des tourbières dans les cours d'eau et les rivières. Le taux d'exportation par unité de superficie est plus grand dans les écosystèmes tempérés que dans les écosystèmes boréaux, bien que ces derniers exportent davantage de COD vu leur plus grande superficie. L'hydrologie influe tant sur la hauteur de la nappe phréatique que sur la vitesse de l'eau dans les voies d'écoulement et, par conséquent, sur les rejets de COD par les milieux humides. Clair et Ehrman (1996) ont noté que, dans le Canada atlantique, les principales variables qui régissent les exportations de C et N sont les précipitations annuelles totales et la topographie des bassins. Donc, plus les bassins sont plats et humides, plus la production et l'exportation de COD et d'azote organique dissous (AOD) seront importantes. Molot et Dillon (1996) ont également observé que les rejets de COD des tourbières dépendaient beaucoup du bassin de drainage d'où provient le carbone, et qu'ils étaient régis surtout par le balayage de l'eau et la proportion du bassin occupée par les tourbières.

La température et les précipitations ont un effet sur l'exportation de COD et d'AOD, en régissant un certain nombre de processus, dont le ruissellement, mais également la minéralisation des matières organiques et la croissance des plantes. La production de carbone dissous est généralement maximale dans les couches de tourbe de surface vu l'apport plus important de nouveaux déchets végétaux et de matières organiques labiles. Toutefois, les concentrations maximales de COD dans les eaux interstitielles se trouvent bien en dessous de la surface, parce que le flux souterrain est plus lent, ce qui permet l'accumulation de COD. Lorsque le sol contient peu d'humidité, l'écoulement est lent, mais les eaux peuvent quand même contenir de fortes concentrations de COD. L'élévation des niveaux d'eau permet l'écoulement des flux vers des surfaces peu profondes de sols riches en matières organiques, assurant ainsi le transport de faibles concentrations de COD près de la surface. Les concentrations de COD diminuent donc proportionnellement à l'augmentation de la décharge.

Selon les résultats des travaux de Clair et Ehrman (sous presse), les flux hydrologiques et géochimiques devraient subir des variations saisonnières très complexes sous l'effet des changements climatiques. En général, cependant, les scénarios des MCG prévoient que les exportations de carbone seront plus importantes dans l'avenir. Le modèle mis au point par Clair et Ehrman (1996) semble indiquer que des changements dans le régime des précipitations entraîneront une modification du ruissellement qui aura une incidence linéaire sur le transport des matières organiques contenues dans les sols.

Les MOD sont une importante source d'azote (Moore *et al*., sous presse) et de phosphore (P) (Molot et Dillon, 1996). Tant l'exportation que les concentrations totales annuelles de phosphore dans les cours d'eau sont une fonction linéaire du ruissellement; une réduction du ruissellement pourrait donc entraîner une diminution de la charge en phosphore des lacs. Facteur compliquant, l'acidification du bassin de captage aura des effets sur les tourbières et réduira les quantités de phosphore disponibles pour l'exportation (*idem*).

De plus, les MOD jouent un rôle déterminant dans la pénétration de la lumière, et agissent donc sur le bilan thermique et le régime de stratification, particulièrement dans les lacs du Bouclier précambrien et dans le Canada atlantique. Un climat plus sec réduira l'exportation des MOD terrestres et augmentera leur temps de séjour dans les lacs, ce qui laisse croire que l'eau des lacs

du Bouclier précambrien pourrait devenir plus claire (Moore *et al*., sous presse), laissant pénétrer davantage de rayons UVB, augmentant la profondeur de la thermocline, réduisant ainsi l'habitat des poissons d'eau froide. Il est possible que, dans les bassins versants où la composante de milieux humides est significative, les changements dans les flux hydrologiques entraînent moins de fluctuations des concentrations de COD dans les cours d'eau.

Les systèmes aquatiques de prairie peuvent être plus vulnérables à l'augmentation du rayonnement UVB vu leur faible profondeur, et parce que les types de MOD présentes ont des caractéristiques photochimiques différentes (Vaughan *et al*., 1997). Les MOD sont sujettes à la photolyse qui joue un rôle important dans le cycle du carbone dans les milieux humides (Robarts et Waiser, 1998). Tout comme dans le cas des tourbières, la source et la quantité de COD apporté dans les milieux humides sont tributaires de l'alimentation en eau (Vaughan, 1997), les chutes de neige en hiver et le ruissellement printanier ayant l'impact maximal sur cet apport (Clair et Ehrman, sous presse). Le changement climatique et les variations du régime hydrologique auront donc des impacts sur les quantités et les caractéristiques chimiques du COD dans les milieux humides de prairie.

***Incidence du climat sur les valeurs des milieux humides***

Tourisme

Les milieux humides et autres plans d'eau offrent un éventail d'activités récréatives et touristiques qui contribuent tant à leur conservation qu'à leur destruction. L'impact qu'aura le changement climatique sur le tourisme en milieux humides dépendra de la nature de l'activité. Le changement climatique influera sur la durée de la saison touristique, sur la façon dont les gens s'adonnent à une activité touristique et sur la qualité de l'expérience qu'ils en retireront. La plupart des activités se pratiquant directement sur les rives des cours d'eau, lacs et milieux humides ou dans leurs environs, l'impact du changement climatique dans ces régions a donc de sérieuses répercussions économiques.

L'impact du changement climatique sur le tourisme varie selon le type de milieu humide et la forme de son littoral. Une baisse des niveaux d'eau entraînera une concurrence plus importante entre la fonction hydrologique des milieux humides et leur utilisation récréative. Depuis longtemps, on procède à des ajustements chaque fois que les niveaux d'eau varient ou sont trop bas, mais le problème et la solution dépendent du lieu et de l'utilisation qui en est faite. Les gens s'adaptent assez facilement au changement et peuvent modifier en conséquence leurs habitudes récréatives et touristiques. Les entreprises commerciales, par contre, sont moins flexibles, vu les investissements en jeu (Wall, sous presse).

Gestion de l'eau

La Commission mixte internationale tient compte du changement climatique dans l'élaboration des nouveaux plans de gestion et d'opération du Saint-Laurent. Le lac Ontario est la source d'approvisionnement du Saint-Laurent et, dans l'éventualité d'un changement climatique, l'écoulement des Grands Lacs pourrait diminuer. Il est donc nécessaire de tenir compte de ces

scénarios de même que des intérêts de tous les utilisateurs et principaux intervenants dans l'élaboration de plans de gestion (Hudon, sous presse). L'un des grands impacts possibles en aval concerne les milieux humides aménagés du fleuve.

Barabe *et al*. (1997) montrent que les milieux humides du lac Saint-Pierre, près de Trois-Rivières, ont une importance économique considérable pour la région, en raison de leur rôle d'aires de repos et de reproduction des oiseaux aquatiques. Ces milieux contribuent également à l'économie en offrant des sites propices aux activités de pêche, d'ornithologie, de chasse et de piégeage. La région a toujours trouvé des solutions aux conflits entre l'agriculture et les milieux humides. Avec les changements des régimes de débit des cours d'eau, les utilisations par les espèces sauvages et par les humains qui ont évolué avec le temps devront être renégociées en fonction de stress plus grands.

## POLITIQUE DES MILIEUX HUMIDES AU CANADA

En juin 1987, le Comité fédéral-provincial sur l'utilisation des terres a présenté un rapport intitulé *Énoncé de politique sur les terres humides au Canada*. La même année, le Comité interministériel fédéral des terres constatait le besoin d'élaborer un énoncé de politique sur les terres humides qui compléterait les dispositions sur « l'utilisation judicieuse des terres » de la *Politique fédérale sur l'utilisation judicieuse des terres humides.* La *Politique fédérale relative aux eaux*, adoptée en 1987, a aussi déterminé que la conservation des terres humides était une question importante en matière de ressources en eau (Rubec, 1994).

La *Politique fédérale sur la conservation des terres humides* (Gouvernement du Canada, 1991) met l'accent sur l'utilisation judicieuse des milieux humides au Canada et s'applique à tous les organismes, politiques et programmes fédéraux. L'objectif principal du gouvernement en matière de conservation des milieux humides est de :

> *... favoriser la conservation des terres humides du Canada en vue du maintien de leurs fonctions écologiques et socio-économiques, pour le présent et l'avenir.*

Pour respecter cet objectif principal, le gouvernement fédéral, de concert avec les gouvernements des dix provinces et des deux territoires ainsi que le public canadien, s'est engagé à atteindre les objectifs secondaires suivants :

a) maintenir les fonctions et les valeurs associées aux terres humides dans l'ensemble du Canada;

b) prévenir toute perte nette de fonctions des terres humides sur toutes les terres et eaux fédérales;

c) mettre en valeur et restaurer les terres humides dans les secteurs où leur perte ou dégradation, ou celles de leurs fonctions, ont atteint des seuils critiques;

d) tenir compte des fonctions des terres humides dans la planification, la gestion et la prise de décisions économiques relatives aux ressources à l'égard de tous les programmes, politiques et activités du gouvernement fédéral;

e) protéger les terres humides d'importance pour les Canadiens;

f) assurer l'adoption de pratiques judicieuses de gestion durable dans des secteurs tels que l'exploitation forestière et l'agriculture afin à la fois de favoriser la conservation des terres humides et d'atteindre une utilisation judicieuse des ressources en terres humides;

g) exploiter les terres humides de manière à mettre en valeur leurs possibilités, assurant ainsi leur rendement durable et leur utilisation productive par les générations futures.

La politique fédérale sur la conservation des terres humides porte sur les zones de compétence fédérale et sur la gestion des milieux humides qui relèvent directement des autorités fédérales. La politique définit sept stratégies visant à tirer profit des réussites antérieures et à favoriser les partenariats dans le cadre des initiatives en cours en matière de conservation des milieux humides. Enfin, la politique mise sur une formule basée sur le partenariat sans cadre législatif. Les sept stratégies sont les suivantes :

a) sensibilisation du public;

b) gestion des terres humides sur les terres et les eaux fédérales et dans le cadre des autres programmes fédéraux;

c) promotion de la conservation des terres humides dans les régions fédérales protégées;

d) amélioration de la collaboration entre les gouvernements fédéral, provinciaux, territoriaux et autres partenaires non gouvernementaux;

e) conservation des terres humides d'importance pour les Canadiens;

f) établissement d'une solide base scientifique sur laquelle fonder la politique;

g) promotion des mesures internationales.

Pour que les décisions des gouvernements reposent sur une base solide, elles doivent tenir compte de l'évolution possible des conditions climatiques.

## LACUNES DES CONNAISSANCES

En 1991, un atelier sur l'hydrogéochimie des milieux humides et des besoins en matière de recherche sur l'habitat a déterminé les secteurs où des recherches étaient nécessaires afin d'accroître notre compréhension des processus hydrogéochimiques des milieux humides (Wedeles *et al*., 1992). Ces secteurs comprennent :

a) les effets des fluctuations de la nappe phréatique sur la fonction et l'intégrité des milieux humides;

b) l'interaction de la température et de l'humidité de la zone non saturée des milieux humides;

c) les effets des changements dans la quantité d'eau s'écoulant dans ou vers les milieux humides sur la qualité de l'eau dans ces milieux;

d) les effets de la fonte du pergélisol;

e) l'influence des concentrations atmosphériques de $CO_2$, de la température et de l'humidité sur la croissance des plantes;

f) la réaction des milieux humides aux changements dans la fréquence et l'intensité des incendies;

g) la capacité des milieux humides de s'adapter au changement climatique.

Ces besoins en matière de recherche existent toujours.

Dans la plupart des régions du Canada, on accorde moins d'attention aux milieux humides qu'à tout autre écosystème. Dans les Grands Lacs, par exemple, on n'a toujours pas évalué le nombre de milieux humides ni les changements dans la végétation causés par les fluctuations des niveaux d'eau. Il serait également nécessaire d'établir les nombreux liens entre les niveaux d'eau et les milieux humides; les interactions entre la végétation, les oiseaux, les mammifères, les poissons et la qualité de l'eau des milieux humides, de même que leur sensibilité individuelle et commune aux fluctuations des niveaux d'eau (Mortsch, 1990, Vaughan *et al*., 1997).

Il est primordial d'adopter une approche intégrée à long terme pour évaluer les principaux aspects de la structure et des fonctions écologiques des milieux humides, et établir des comparaisons à grande échelle entre des bassins versants de taille similaire et situés dans des régions comparables, mais où l'utilisation des terres est différente (Covich *et al*., sous presse). Avant d'établir des projections détaillées sur les conséquences du changement climatique dans le nord des Grandes Plaines, nous devons comprendre les mécanismes de base qui régissent les interactions entre les systèmes biotiques, le climat et les GES dans une région donnée (Larson, 1994). Il est également nécessaire de déterminer les effets directs qu'un environnement en évolution peut avoir sur le bien-être physique des oiseaux, en mettant en évidence les réactions à toute une gamme de stress environnementaux (Larson, 1994).

La perte probable de l'habitat des oiseaux aquatiques due à la modification du rapport couvert/eau dans les milieux humides semi-permanents et la disparition des étangs temporaires et saisonniers peuvent être significatives dans le cas d'un changement climatique. Des études quantitatives sur les nouvelles conditions hydriques de même que sur le changement qui en résulterait en fonction du nombre d'étangs et du rapport couvert/eau pourraient constituer la première étape d'un processus visant à déterminer les effets possibles du changement climatique sur les populations d'oiseaux aquatiques. Il est nécessaire d'effectuer d'autres simulations sur les changements d'habitat liés au réchauffement planétaire afin d'acquérir de nouvelles connaissances sur les interactions entre le climat, l'hydrologie et l'écologie. Pour améliorer la modélisation des milieux humides, il faudrait simuler les changements dans un complexe entier de milieux humides, comprenant des étangs de toutes les tailles et de tous les types de permanence d'eau, car ces autres classes, comme les milieux humides semi-permanents, jouent une rôle crucial pour que la production d'oiseaux aquatiques connaisse un succès global (Poiani et Johnson, 1991).

La nappe phréatique est souvent la variable la plus importante régissant la fonction et la répartition des milieux humides. Le degré d'interaction avec la nappe détermine le type de milieu humide, l'influence qu'il aura sur l'hydrologie des bassins en aval et sur la qualité de l'eau

(Wedeles *et al*., 1992). Les modèles de milieux humides pourraient être améliorés grâce à une meilleure connaissance des interactions entre le sol, les eaux souterraines et l'eau de surface, de même que des impacts du changement climatique sur les nappes phréatiques locales et régionales (Larson, 1994).

Par rapport aux autres écosystèmes, on est encore loin d'obtenir une modélisation adéquate des milieux humides, qui sont souvent exclus des études faites par les modèles planétaires des impacts du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes et le bilan du carbone (Moore *et al*., sous presse). Les modèles climatiques devraient être utilisés avec d'autres modèles qui simulent, par exemple, les précipitations, le ruissellement et la nappe phréatique, pour évaluer les éventuels changements dans les fonctions et les valeurs des milieux humides (Fuller, 1997).

L'impact du changement climatique sur les communautés de plantes aquatiques est complexe et difficile à prévoir. La quantité d'eau dans les bassins des milieux humides influe directement sur l'étendue de la végétation aquatique, mais la composition chimique des milieux humides, la durée de la saison de croissance, la fertilisation par le $CO_2$ et les effets des rayons UVB sur la croissance des plantes ont également une incidence sur la composition et la structure des communautés végétales des milieux humides. Ces effets sont peu connus et il serait important de se pencher sur les questions de biochimie et de physiologie fondamentales avant d'établir des projections sur les réactions de chaque espèce et sur l'ampleur des modifications dans les habitats des milieux humides (Larson, 1994).

La végétation subira d'importants déplacements dus aux changements induits par le climat dans la fréquence et l'intensité des incendies et des perturbations. Ces variations peuvent influer sur la dynamique des milieux humides de façon non prévue par les modèles qui étudient uniquement le climat. Il est également essentiel d'évaluer d'autres aspects du climat, comme les effets des rayons UVB sur l'habitat des milieux humides de prairie, la toxicité des pesticides accrue par la photosynthèse après l'exposition au rayonnement UVB, la vulnérabilité relative des plantes à l'accroissement des rayons UVB et les interactions entre les rayons UVB et la température, les précipitations et le $CO_2$ (Larson, 1994).

Il nous reste encore beaucoup à faire afin d'établir la région, la profondeur et les types de tourbières du Canada; et, en particulier, pour pouvoir établir leurs réactions passées au changement climatique, il faut mieux comprendre à quel moment elles ont commencé à se former dans différentes parties du pays et quels ont été par la suite les taux de formation du sol (Gorham, 1994). Étant donné la complexité des questions relatives aux milieux humides, l'impact possible du changement climatique sur le cycle du carbone dans les tourbières boréales et subarctiques mérite d'être étudié en profondeur (Gorham, 1991). Il est en outre essentiel de mieux établir la superficie, la profondeur et la densité des tourbières. Il sera particulièrement important de mesurer les changements dans la région des tourbières boréales et subarctiques, car le changement climatique pourrait avoir un effet dévastateur dans certaines régions et bénéfique dans d'autres.

D'autres études sont nécessaires sur les taux de libération de $CO_2$ et de $CH_4$ provenant des tourbières drainées, en relation avec la température et les précipitations régionales, ainsi que les impacts de l'abaissement des nappes phréatiques. Il sera également pertinent d'examiner

l'équilibre entre l'abaissement dû à la fonte possible du pergélisol par endroits et à la formation de lacs thermokarstiques (*idem*). En outre, il serait particulièrement intéressant d'établir des comparaisons entre les zones d'eau peu profonde voisines de fens humides où la végétation est composée de laîches et les bogs secs couverts de sphaigne, ainsi que la relation entre les émissions de $CH_4$ et la profondeur de la nappe phréatique (*idem*).

Il est essentiel d'effectuer d'autres recherches pour comprendre les interactions entre la nappe phréatique et l'eau de surface, de même que leurs effets sur les communautés végétales, le cycle des éléments, et les émissions de gaz à l'état de traces, de $CO_2$ et de $CH_4$. L'équilibre entre la productivité et la décomposition dans les bogs drainés présente également beaucoup d'intérêt, en plus d'améliorer notre compréhension de la façon dont le stockage et l'exportation de COD et d'AOD dans les effluents des cours d'eau seront influencés par les changements dans l'hydrologie.

Remerciements

Le présent rapport est basé sur les actes et les discussions tenues au cours du symposium organisé par l'Institut de recherche sur les terres humides et la sauvagine, au marais Oak Hammock, au Manitoba, en avril 1997. Le symposium et le présent rapport ont été rendus possibles grâce à la contribution d'un certain nombre d'organismes relevant d'Environnement Canada : l'Étude pan-canadienne, les régions de l'Atlantique, de l'Ouest et du Nord, l'Institut national de recherches hydrologiques (Saskatoon) et l'Institut national de recherche sur les eaux (Burlington), et de l'appui d'organismes non gouvernementaux, comme l'Institut de recherche sur les terres humides et la sauvagine, Canards Illimités (Oak Hammock, Manitoba) et le Centre de recherche sur les milieux humides de l'Université de Waterloo. Les auteurs désirent remercier les participants au symposium pour leur contribution, en particulier E. Gorham, T. Moore, N. Roulet et H. Vaughan pour les discussions subséquentes. Un certain nombre des travaux qui ont été présentés lors du symposium seront publiés dans la revue *Climatic Change* en 1998.

## RÉFÉRENCES

Barabe, A., Bourgeois, J. C. et Trudel, R. (1997). Sustainable tourism in the wetlands of national importance on the St. Lawrence River: the case of Baie-du-Febvre on Lake St. Pierre, Quebec, presentation to *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Bethke, R. W. et Nudds, T. D. (1995). Effects of climate change and land use on duck abundance in Canadian prairie-parklands, *Ecological Applications*, 5(3):588-600.

Brown, D. A. (sous presse). Wetland gas production – effect of climate change in the microbial ecology, *Climatic Change*.

Clair, T. A. et Ehrman, J. (sous presse). The influence of changing seasonal climates in modifying discharge, dissolved organic carbon and nitrogen export in wetland influenced rivers: a neural network approach, *Water Resources Research.*

Clair, T. A. et J. M. Ehrman (1996). Variations in discharge and dissolved organic carbon and nitrogen export from terrestrial basins with changes in climate: a neural network approach, *Limnology and Oceanography*, 41(5): 921-927.

Coley, D. (1997). Waterfowl habitat program development strategies and climate change, presentation to *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Covich, A. P., Fritz, S. C., Lamb, P. J., Marzolf, R. D., Matthews, W. J., Poiani, K. A., Prepas, E. E., Richman, M. B. et Winter, T. C. (sous presse). Potential effects of climate change on aquatic ecosystems of the Great Plains of North America, *Climatic change.*

Cox, K. W. (1993). *Wetlands. A celebration of life*, Canadian Wetlands Conservation Task Force, Sustaining Wetlands, Issue Paper, No. 1993-1, Ottawa (Ont.), 50 p.

Environnement Canada (1997). *1994-95 en revue : Nouveaux développements en matière de science du changement climatique, Rapport $CO_2$/Climat*, 97-1, Centre climatologique canadien (CCC), Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 52 p.

Fuller, G. (1997). Losses from present and future wetlands drainage in Saskatchewan, presentation to *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Gorham, E. (1995). « The biogeochemistry of northern peatlands and its possible responses to global warming », dans *Biotic feedback in the global climatic system. Will the warming feed the warming?*, G. M. Woodwell et F. T. MacKenzie (dir.), Oxford University Press, Oxford (G.-B.), p. 169-187.

Gorham, E. (1994). The future of research in Canadian peatlands: a brief survey with particular reference to global change, *Wetlands*, 14(3):206-215.

Gorham, E. (1991). Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climate change, *Ecological Applications*, 1(2):182-195.

Gouvernement du Canada (1991*). Politique du gouvernement fédéral sur la conservation des terres humides*, Ottawa (Ont.), 14 p.

Hall, R. I., Leavitt, P. R., Smol, J. P., Quinlan, R. et Dixit, A. (1997). « Effects of agriculture, urbanization and climate on water quality in the northern great plains », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Halsey, L. et Vitt, D. H. (sous presse). Climatic and physiographic controls on wetland type and distribution in Manitoba, Canada, *Climatic Change.*

Hayashi, M., van der Kamp, G. et Rudolph, D. L. (1997). « Hydrology and chloride transport cycle of a prairie wetland in Saskatchewan », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Hudon, C. (sous presse). Impact of water-level fluctuations on St. Lawrence River aquatic vegetation, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.*

Johnson, C. (1997). « Simulating interactions between prairie wetlands and climate using WETSCAPE », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Kelly, C., Roulet, N., Rudd, J. W. M., St. Louis, V., Hamilton, D. J., Scott, K., Schiff, S. L., Aravena, R., Edwards, G. et Warner, B. G. (1997). « Gas fluxes from wetland ponds of different origins », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Kettles, I. M., Tarnocai, C., Bauke, S. D. et Lacelle, B. (1997). « Estimate of sensitivity of Canadian peatlands to climate warming », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Larson, D. L. (1995). Effects of climate on numbers of northern prairie wetlands, *Climatic Change*, 30:169-180.

Larson, D. L. (1994). Potential effects of anthropogenic greenhouse gases on avian habitat and populations in the Northern Great Plains, *American Midland Naturalist*, 131:330-346.

Molot, L.A. et P.J. Dillon (1996). Storage of terrestrial carbon in boreal lake sediments and evasion to the atmosphere, *Global Biogeochemical Cycles*, 10:483-492.

Moore, T. C., Roulet, N. T. et Waddington, J. M. (sous presse). The effect of climate change on the carbon cycling in Canadian wetlands, *Climatic Change*.

Mortsch, L. et Quinn, F. (1996). Climate change scenarios for Great Lake basin ecosystem studies, *Limnology and Oceanography*, 41(5):903-911.

Mortsch, L. (1990). « Climatic Change and Variability: The effects of an altered water regime on Great Lakes coastal wetlands », dans *Climate Change. Implications for Water and Ecological Resources*, actes d'un symposium/atelier international, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 217-224.

National Wetlands Working Group (1988). *Wetlands of Canada*, Ecological Land Classification Series, No. 24, Sustainable Development Branch, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), et Polyscience Publications Inc., Montréal (Qué.), 425 p.

Poiani, K. A., Johnson, W. C. et Kittel, T. G. F. (1995). Sensitivity of a prairie wetland to increased temperature and seasonal precipitation changes, *Water Resources Bulletin*, 31(2):283-294.

Poiani, K. A. et Johnson, W.C. (1991). Global warming and prairie wetlands, *Bioscience*, 41(9): 611-618.

Poschadel, C., Schiff, S., Aravena, R., Kelly, C. et St. Louis, V. (sous presse). Effect of temperature on $CH_4$ and $CO_2$ production in a natural and flooded boreal forest wetland, *Climatic Change*.

Robarts, R.D. et M.J. Waiser (1998, sous presse). The effect of atmospheric change and agriculture on the biogeochemistry and microbial ecology of prairie wetlands, *Great Plains Res.*, 8.

Roulet, N., Bhardwaj, A., Comer, N., Letts, M., Moore, T. et Roehm, C. (1997). « Modelling biospheric-climatic feedbacks in peatland ecosystems », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Rubec, C. (1994). « The evolution of wetland policy in Canada », dans C. Rubec (dir.), *Wetland Policy Implementation in Canada*, actes d'un atelier national, Winnipeg et Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), North American Wetlands Conservation Council Report No. 94-1, p. 5-17, avril 1997.

Seabloom, E. W., van der Valk, A. G. et Moloney, K. A. (1997). « Modelling the response of plant distributions to change in water regime », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Schiff, S. L., Aravena, R., Elgood, R. et Dillon, P. (sous presse). Precambrian shield wetlands: hydrologic control of the geochemistry and the geochemical export of DOC and DON, *Climatic Change*.

Sorenson, L. G. et Root, T. L. (sous presse). Potential effects of global warming on waterfowl populations breeding in the Northern Great Plains, *Climatic Change.*

Su, M., Stolte, W. J. et van der Kamp, G. (1997). « Modelling land management impacts on the water balance of wetlands », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Vaughan, R., Bourbonniere, R., Bukata, B. et Day, K. (1997). « Identifying the threats posed to Canadian wetland ecosystems by atmospheric change », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Wall, G. (sous presse). Implications of global climate change for tourism and recreation in wetland areas, *Climatic Change*.

Waddington, J. M., Griffis, T. J. et Rouse, W. R. (sous presse). Northern Canadian wetlands: net ecosystem exchange and climatic change, *Climatic Change*.

Warner, B. G. (1997). « Detecting processes of change and climate effects on the long-term development of wetlands », présentation à *Impacts of Climate Change to Inland Wetlands: A Canadian Perspective*, Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall (Man.), avril 1997.

Warner, B.G. et Rubec, C.D.A. (dir.) (1997, sous presse). *The Canadian wetland classification system*, 2e éd., Wetlands Research Centre, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.).

Wedeles, C. H. R., Meisner, J. D. et Rose, M. J. (1992). *Wetland science research needs in Canada*, Wetlands Research Centre, Université deWaterloo, Waterloo (Ont.), 30 p.

Winter, T.C. (sous presse). Effects of extreme drought and deluge on prairie potholes: an example from a 20-year study of the Cottonwood Lake wetland complex in North Dakota, *Climatic Change*.

Woo, M., Rowsell, R. D. et Clark, R. G. (1993). *Hydrological classification of Canadian prairie wetlands and prediction of wetland inundation in response to climatic variability*, Occasional Paper No. 79, Service canadien de la faune, Hull (Qué.), 2 p.

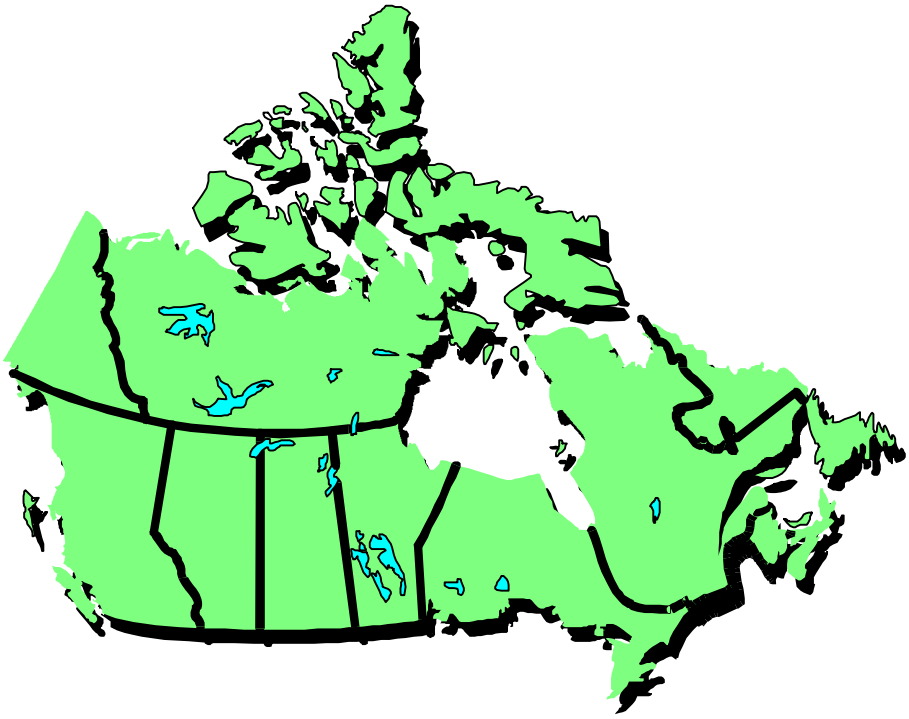
Zoltai, S. C. (1995). Permafrost distribution in peatlands of west-central Canada during the Holocene warm period 6000 years BP, *Géographie physique et Quaternaire*, 49(1):45-54.

# CHAPITRE QUATRE

# RÉPERCUSSIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL SUR L'AGRICULTURE CANADIENNE : REVUE ET ÉVALUATION DE LA RECHERCHE ENTRE 1984 ET 1997

## TOME 1 : SYNTHÈSE ET ÉVALUATION DES TRAVAUX NÉCESSAIRES

*M. Brklacich[1], C. Bryant[2], B. Veenhof[1] et A. Beauchesne[2]*



1 Département de géographie, Université Carleton, Ottawa (Ontario) K1S 5B6; téléphone : (613) 788-2600 poste 7553; télécopieur : (613) 788-2561; courriel : mbrklac@ccs.carleton.ca
2 Département de géographie, Université de Montréal, Montréal (Québec) H3C 3J7

## PRÉFACE

Le rapport Répercussions du changement climatique mondial sur l'agriculture canadienne : Revue et évaluation de la recherche entre 1984 et 1997 (Tome 1) a été préparé en application d'un contrat (n° KM170-7-6194) pour le compte du Groupe de recherche en adaptation environnementale du Service de l'environnement atmosphérique (Environnement Canada). Le projet était aussi financé par Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Le rapport a été rédigé dans le cadre de l'Étude pan-canadienne (ÉPC), étude en deux étapes coordonnée par Environnement Canada. La première étape s'inspire de l'actuelle base de connaissances et en fait l'analyse pour repérer les lacunes de la recherche et les priorités en la matière. De nouvelles initiatives de recherche sont prévues pour la seconde étape.

Le rapport est donc un produit de la première étape. Il a été préparé par des chercheurs de l'Université Carleton et de l'Université de Montréal. Il s'agit d'une revue et d'une évaluation des travaux de recherche sur l'agriculture au Canada et le changement climatique planétaire. Il présente une évaluation poussée de la recherche faite entre 1984 et 1997 et des recommandations sur la façon de poursuivre les travaux pour améliorer notre compréhension des interactions entre le changement climatique mondial et l'agriculture au Canada.

## RÉSUMÉ

## CONTEXTE ET OBJECTIF

1. Il s'est fait beaucoup de recherches au cours des quinze dernières années quant aux effets possibles du changement climatique mondial sur l'activité humaine, y compris l'agriculture. Cette recherche a considérablement évolué, en ce qui concerne surtout :

    a) Le centre d'intérêt, qui est passé des effets possibles sur les propriétés agroclimatiques aux effets possibles sur la productivité des récoltes et, plus récemment, sur l'importance d'adapter l'agriculture au changement climatique et à ses répercussions socio-économiques.

    b) Les méthodes employées, c.-à-d. les modèles qui mesurent les effets du phénomène sur la productivité des récoltes englobant un éventail toujours plus vaste de variables et, plus récemment, intégrant des méthodes d'adaptation fondées sur divers types de renseignements venant des agriculteurs.

2. Au Canada, la relation entre agriculture et changement climatique comporte une dimension d'importance particulière, soit la variété des conditions entourant la production agricole dans les différentes régions. Or, une grande partie de la recherche s'est faite dans un contexte régional particulier. En outre, le recours à des hypothèses et à des modèles différents empêche malheureusement de comparer les conclusions tirées pour chacune.

3. Étant donné cette situation dynamique et complexe, le présent rapport a été préparé dans le but de présenter une évaluation approfondie des résultats de la recherche faite de 1984 à 1997 sur l'agriculture canadienne et le changement climatique mondial.

4. Le rapport résume les principales conclusions tirées de l'ensemble de la recherche, relève les points forts et les limites de ces travaux et formule un ensemble de recommandations en vue de la recherche à venir, qui doit améliorer notre compréhension des effets du changement climatique mondial sur l'agriculture au Canada.

## REVUE ET ÉVALUATION

### *Changement climatique mondial : propriétés agroclimatiques et agriculture canadienne*

Les nombreux travaux d'élaboration de scénarios de changement climatique planétaire laissent croire à un réchauffement considérable dans tout le Canada. Les chercheurs prévoient un allongement de la saison sans gel plus propice à l'agriculture commerciale que les régimes de température actuels. La recherche n'a toutefois pratiquement pas abordé les répercussions du changement climatique sur les régimes hygrométriques. Qui plus est, les variations régionales des effets agroclimatiques possibles offrent un large spectre.

1. L'allongement prévu de la saison sans gel, par suite du changement climatique mondial, va d'une semaine à un maximum de neuf semaines. Pour les Prairies, l'Ontario et le Québec, la plupart des évaluations sont de trois à cinq semaines. L'allongement est un peu plus substantiel pour la région de l'Atlantique (quatre à huit semaines), mais de trois à quatre semaines seulement près de la limite géographique actuelle des terres cultivables.

2. L'élévation prévue de la température pendant la saison sans gel en Ontario et au Québec se situe dans une plage de 1,5 à 5,0 °C et est généralement beaucoup plus forte dans les secteurs les plus au nord de ces provinces. Le réchauffement prévu dans la région atlantique est plus faible (3,5 à 4,5 °C). Les chercheurs ne s'entendent pas tellement sur les hausses de température pour les Prairies et la région de la rivière de la Paix.

3. Les résultats relatifs aux régimes hygrométriques se caractérisent par une plage d'estimations plus large que celle des régimes de température. Ainsi, les changements prévus pour les précipitations dans les Prairies et la région de la rivière de la Paix vont d'une diminution d'environ 30 % à une augmentation pouvant atteindre 80 %.

4. En dépit des avantages possibles de l'allongement et du réchauffement de la saison sans gel, ainsi que de l'augmentation des précipitations, la plupart des scénarios comportent en outre une augmentation considérable de l'évapotranspiration possible. Ainsi, les chercheurs prévoient de plus gros déficits hydriques saisonniers pour toutes les régions, les plus graves devant toucher l'Ontario.

5. L'évaluation des répercussions du changement climatique mondial devrait tenir compte des effets négatifs et positifs sur les propriétés agroclimatiques.

***Changement climatique mondial : évolution et rendement des cultures au Canada***

Certes, les effets du changement climatique mondial sur l'évolution et le rendement des cultures ont retenu l'attention des chercheurs, mais pas autant que les altérations possibles des propriétés agroclimatiques. Par ailleurs, les travaux portent davantage sur la culture des céréales que sur d'autres importants groupes de culture (p. ex., graines oléagineuses, fourrage et pomme de terre). Enfin, la recherche s'est faite surtout dans les Prairies, en Ontario et au Québec.

1. La majeure partie des travaux effectués en Ontario précède l'apparition des derniers modèles d'évolution et de productivité des cultures, qui tiennent compte des avantages possibles de l'augmentation des teneurs en $CO_2$ pour le rendement des cultures. Les rapports disponibles surestiment donc probablement les impacts négatifs du changement climatique sur le rendement des récoltes, mais il est difficile d'évaluer cette lacune avec précision sans refaire la recherche à l'aide de la génération actuelle des modèles.

2. Les études donnent à croire que les saisons sans gel plus chaudes vont accélérer la croissance des céréales, tous scénarios confondus, réduisant le délai entre l'ensemencement et la récolte (d'environ une semaine et demie à trois semaines dans la plupart des régions du Canada, pour ce qui est des céréales de printemps et des céréales à gros grains).

3. Dans le nord, le raccourcissement prévu de la période de maturation réduirait le risque de meurtrissure, un avantage certain pour cette région. Par contre, dans les Prairies, en Ontario et au Québec, l'interaction entre les quelques variables agroclimatiques mesurées aurait pour effet net de diminuer les rendements.

4. Dans la région de la rivière de la Paix, les impacts positifs et négatifs tendent à s'annuler, réduisant l'ampleur des impacts positifs du changement climatique sur le rendement de certaines céréales.

5. Dans les Prairies, les impacts du changement climatique sur les rendements des récoltes céréalières sont plus prononcés et variables, le rendement des semailles printanières pouvant être réduit de 35 % dans l'ouest et augmenté de 66 % dans l'est.

6. Des résultats similaires sont envisagés pour l'Ontario et le Québec, sauf en ce qui concerne les impacts positifs plus généraux du changement climatique sur la production céréalière (surtout le maïs), dans le nord de ces deux provinces.

7. La recherche sur la modification possible des rendements d'autres cultures comme les graines oléagineuses, le fourrage et la pomme de terre est moins avancée; elle fait intervenir une gamme moins étendue de scénarios de changement climatique et concerne un nombre plus restreint de régions. Les résultats évoquent une réduction de la production de graines oléagineuses imputable à l'augmentation du stress hydrique. Il faudrait compter en outre sur un certain effet compensatoire attribuable à l'extension vers le nord de la région productrice de graines oléagineuses.

### *Changement climatique mondial : appropriation des terres à la culture et potentiel productif*

Il s'est fait très peu de recherches au Canada sur la sensibilité de l'appropriation des terres à la culture et du potentiel productif au changement climatique mondial. Les travaux portent principalement sur la région de la rivière de la Paix et sur l'Ontario.

1. Les études donnent à croire que, dans la région de la rivière de la Paix, la superficie convenant à la production commerciale s'étendrait considérablement. Des chercheurs arrivent à des conclusions similaires pour les régions agricoles du nord du Québec et de l'Ontario.

2. Les impacts du changement climatique sur le potentiel productif de l'agriculture au nord de 60°N sont généralement considérés comme peu substantiels.

3. Le changement climatique mondial devrait améliorer les chances de succès de cultures spéciales dans le sud de l'Ontario et du Québec. Ainsi, la production de fruits et de légumes pourrait s'étendre bien au-delà des terres à proximité des lacs.

### *Changement climatique mondial : économie agricole*

Les quelques études de l'impact économique du changement climatique mondial sur l'agriculture au Canada concernent surtout les Prairies et l'Ontario. Elles sont fondées sur des enquêtes limitées, faites à l'échelle régionale ou au niveau de l'exploitation agricole, et ne font intervenir qu'un sous-ensemble des scénarios de changement climatique.

1. L'impact économique envisagé pour les Prairies est mineur. Toutefois, cette conclusion occulte des variations substantielles à l'échelle subprovinciale ou subrégionale.

2. Les études qui portent sur l'Ontario laissent croire à des résultats similaires. Selon une étude consacrée à une ferme commerciale " typique " du sud-ouest de la province, l'augmentation prévue des profits serait fonction d'une réaffectation des ressources à l'échelle de l'exploitation. Cette étude met également en évidence la possibilité d'une plus grande variabilité des profits annuels de l'activité agricole.

3. Les travaux faits à ce sujet ne fournissent pas une information de base qui permette de généraliser les évaluations économiques à d'autres régions ou à un plus vaste éventail de cultures.

### *Changement climatique mondial : adaptation de l'agriculture canadienne*

Les impacts possibles du changement climatique sur l'agriculture obligent les agriculteurs à choisir entre résultats souhaitables et résultats indésirables. Même si certaines des études à caractère économique portent implicitement sur cette notion de choix, puisque les chercheurs évaluent la redistribution possible des ressources de l'exploitant, le domaine du changement climatique et de l'adaptation de l'agriculture est une sphère de recherche secondaire relativement

nouvelle, dont les méthodes évoluent rapidement. Ces méthodes comprennent l'évaluation des conséquences qu'il y aurait à intégrer à la conception des modèles des possibilités d'irrigation, des enquêtes au niveau de l'exploitation et des groupes de discussion avec des agriculteurs.

1. Au départ, ce type de recherche et de réflexion portait sur le recensement des stratégies d'adaptation. Or, beaucoup des options répertoriées dans la littérature ont trait à la prévention ou au ralentissement possible du changement climatique mondial, entre autres choses en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES) par l'adoption d'autres cultures et d'autres méthodes.

2. On parle en outre d'adopter des stratégies permettant aux agriculteurs de composer avec les changements et de s'y adapter. Il s'agirait de répartir les risques, de réduire l'occurrence et l'ampleur des impacts négatifs possibles, de tirer parti des nouvelles possibilités ouvertes par le changement climatique et d'élaborer des programmes de recherche et de formation appropriés.

3. Depuis peu, la recherche a un autre objetif, qui consiste à évaluer les stratégies d'adaptation agricole aux changements environnementaux. Des études de ce type ont eu lieu en Ontario, dans les Prairies et dans les régions situées à proximité de l'actuelle limite climatique de l'agriculture canadienne. On note l'absence d'études en la matière pour le Canada atlantique et la Colombie-Britannique.

4. Les travaux ont mis en évidence divers points : l'utilisation de cultivars de céréales printanières adaptés à une saison plus longue a des effets variables dans les Prairies, mais arrive dans certains endroits à compenser partiellement la réduction des rendements attribuable au changement climatique; la culture du blé d'automne améliore les rendements dans le sud des Prairies mais, étant donné la limite climatique actuelle, elle favoriserait peu la production de céréales hivernales; les stratégies d'irrigation réduisent les impacts négatifs du changement climatique et améliorent les rendements; enfin, le changement climatique pourrait favoriser certaines plantes de grande culture et de grande valeur comme le maïs et le soja dans quelques régions du nord de l'Ontario et du Québec.

5. Toutefois, les études n'ont généralement pas abordé l'applicabilité des stratégies d'adaptation sur le plan économique, ni la volonté de la communauté agricole de les adopter.

***Changement climatique mondial : agriculture canadienne dans un contexte international***

Malgré tous les travaux évoqués ci-dessus et la position du Canada parmi les principaux exportateurs de produits agricoles dans le monde, peu de chercheurs ont évalué explicitement les impacts du changement climatique mondial sur l'agriculture canadienne par comparaison à celle d'autres régions du monde. Du reste, les travaux menés à cet égard aboutissent à des résultats contradictoires.

1. Plusieurs scénarios de changement climatique laissent croire à des élévations de température assez importantes dans la majeure partie du Canada, du nord de l'Europe et de l'ex-URSS et à des hausses beaucoup plus faibles dans les régions tempérées. Les opinions divergent quant à la variation des précipitations si ce n'est pour une tendance à la sécheresse à l'intérieur des continents situés plus au nord. On n'a toutefois pas de signes probants en ce qui concerne les répercussions nettes de ces changements sur la position comparative du Canada et des autres nations en matière d'agriculture.

2. La nature peu convaincante des études est encore aggravée par les résultats contradictoires quant au blé, la principale culture d'exportation du pays. Les conclusions vont de l'émergence de nouvelles possibilités d'exportation à une chute des prix du blé dans le monde, ce qui réduirait notre avantage comparatif sur les marchés céréaliers.

3. Étant donné l'inquiétude suscitée par la mondialisation de l'économie depuis une dizaine d'années, l'absence de rapports intégrant le changement climatique aux économies internationales représente une grave lacune des connaissances.

## RECOMMANDATIONS

Les travaux sur les relations entre le changement climatique mondial et l'agriculture canadienne ont été nombreux du début au milieu des années 80. Cependant, la recherche a ciblé davantage les impacts possibles du phénomène sur les propriétés agroclimatiques et surtout les régimes de température que sur la productivité des cultures. Elle est aussi plus concentrée sur l'Ontario, les Prairies et, dans une moindre mesure, le Québec. Par ailleurs, les premiers travaux effectués en Ontario n'ont pas été vérifiés à l'aide des nouveaux modèles de productivité des cultures. La recherche est très limitée en ce qui concerne les répercussions du changement climatique sur l'économie agricole. Récemment, elle a porté davantage sur le phénomène de l'adaptation des exploitations et de l'agriculture, sans qu'il y ait encore d'approche généralement acceptée quant aux stratégies d'adaptation.

À la lumière de l'évaluation de l'ensemble de la recherche, il est recommandé :

1. De s'attacher à appuyer des travaux de recherche fondés sur un ensemble commun de modèles du climat et de la productivité pour toutes les régions du pays, afin d'obtenir des résultats comparables quant aux impacts possibles du changement climatique sur les rendements.

2. De faire de la recherche sur les impacts économiques du changement climatique, soit des travaux qui tiennent compte de scénarios inspirés des différentes stratégies d'adaptation et qui établissent des liens entre :
   a) les différentes échelles (exploitation, région, pays) et
   b) les activités relatives aux cultures et à l'élevage.

3. D'encourager la recherche concernant les impacts du changement climatique sur l'agriculture canadienne dans le contexte de l'évolution des avantages comparatifs ainsi

que des marchés mondiaux des produits agricoles. Il est recommandé en outre d'améliorer les communications entre les spécialistes qui analysent ces impacts sur l'agriculture et ceux qui étudient l'économie et les échanges commerciaux internationaux, de manière à utiliser de façon crédible les évaluations les plus récentes et les plus fiables;

4. De mieux comprendre l'adaptation des exploitations agricoles et de l'agriculture. C'est probablement là le domaine qu'il importe le plus d'approfondir, puisque la crédibilité des évaluations des impacts socio-économiques du phénomène sur l'agriculture (y compris les impacts économiques à l'échelle régionale, nationale et internationale) en dépend. La recherche sur l'adaptation doit également porter sur les moyens d'intégrer efficacement aux scénarios de changement climatique les indicateurs agroclimatiques sur lesquels les agriculteurs fondent essentiellement leurs décisions, par exemple davantage d'information sur la variabilité des changements estimatifs des paramètres agroclimatiques;

5. De concevoir un programme national de recherche qui
   a) facilite l'intégration des dimensions biophysique et socio-économique du changement climatique et de l'agriculture canadienne et
   b) cerne les causes profondes des degrés différents de sensibilité.

Ce programme de recherche devrait permettre de préciser quels types d'agriculture et quelles régions sont le plus sensibles au changement climatique mondial. Le tout devrait constituer une base plus cohérente et systématique d'information pour l'élaboration de politiques et de programmes de nature à atténuer les stress qui pourraient s'exercer sur les systèmes agricoles les plus sensibles au changement climatique mondial.

## INTRODUCTION

### *Cadres de recherche : changement climatique et agriculture*

La recherche sur les impacts possibles du changement climatique mondial sur l'activité humaine s'est intensifiée au cours des quinze dernières années, l'objet étant souvent la relation entre le phénomène et l'agriculture. Bon nombre des études sur le changement climatique mondial et l'agriculture canadienne sont fondées sur des méthodes de recherche établies pour étudier les relations entre la production alimentaire, la température et le climat.

Le point de départ habituel de ces études est lié à un ou des scénarios de changement climatique mondial. Ces derniers sont élaborés à l'aide de diverses approches, dont :

- l'application de modèles de circulation générale (MCG) aux hausses de concentrations de $CO_2$ dans l'atmosphère terrestre,
- les analogues temporels et spatiaux et
- les changements graduels par rapport aux données météorologiques observées.

L'étape subséquente de l'évaluation des impacts est généralement un passage de l'échelle planétaire à une échelle régionale et de propriétés climatiques standard (p. ex., les profils de

température) à des propriétés agroclimatiques (p. ex., la durée de la saison sans gel). Combinés à des modèles de productivité des cultures et à d'autres méthodes d'évaluation des impacts, ces scénarios régionaux de changement agroclimatique à long terme servent à estimer :

- la sensibilité du rendement des cultures au changement climatique,
- les impacts du changement sur l'appropriation des terres à l'agriculture et sur le potentiel productif, et
- l'évolution de l'économie agricole aux échelles de l'exploitation et de la région.

Cette " méthode comparative statique " de la recherche sur les impacts du changement climatique permet d'évaluer la sensibilité d'attributs particuliers de l'agriculture canadienne (p. ex., rendement des cultures, appropriation des terres à l'agriculture) à différents scénarios de changement climatique.

Récemment, ce cadre de recherche a été élargi et restructuré pour tenir compte explicitement de la capacité des systèmes agricoles canadiens à reconnaître le changement climatique mondial et, au besoin, à s'y adapter. Les cadres révisés ne sont pas aussi bien développés que les cadres traditionnels résumés ci-dessus. Ils se caractérisent toutefois par la capacité qu'ils confèrent :

- de répertorier et d'évaluer diverses stratégies d'adaptation,
- d'évaluer les perceptions qu'ont les agriculteurs des changements (climatique ou autres),
- d'évaluer l'importance du changement climatique par rapport à d'autres facteurs d'influence sur le processus décisionnel en matière d'agriculture (environnementaux, économiques, politiques et socioculturels, entre autres) et
- de faire des études comparatives de la vulnérabilité aux conditions changeantes dans l'ensemble du secteur agricole.

***Objet du présent rapport***

Le rapport est une revue et une évaluation des recherches faites sur l'agriculture canadienne et le changement climatique mondial. C'est une étude approfondie des travaux effectués entre 1984 et 1997. Il comprend :

a) un résumé des principales conclusions de ces recherches,
b) une liste des forces et des limites des travaux actuels et
c) des suggestions de travaux pouvant améliorer la compréhension des impacts du changement climatique mondial sur l'agriculture canadienne.

***Structure du rapport***

Le rapport compte deux tomes.

Le tome 1 en est le corps et présente une synthèse de l'abondante littérature concernant les impacts du changement climatique mondial sur l'agriculture canadienne. Il met en évidence les principaux résultats de la recherche et les différences entre les divers attributs et secteurs du

système agricole canadien, ainsi qu'entre les régions du pays. Surtout, cette synthèse sert de fondement à l'élaboration de recommandations en vue de travaux de recherche à venir.

Le tome 1 repose sur la structure des cadres de recherche utilisés pour évaluer les relations entre le changement climatique et l'agriculture canadienne. Après une brève description de la mise en œuvre des projets, on présente un sommaire des travaux axés sur la dimension biophysique de l'agriculture canadienne qui se divise en sous-sections consacrées aux impacts du changement climatique mondial sur :

- les propriétés agroclimatiques,
- l'évolution et le rendement des cultures et
- l'appropriation des terres à l'agriculture et le potentiel productif des régions.

Les perspectives socio-économiques sont abordées par la suite dans les sous-sections sur les liens entre le changement climatique mondial et :

- l'économie agricole,
- l'adaptation et
- l'agriculture canadienne en contexte international.

Le tome 1 conclut par une série de recommandations de nature à orienter la prochaine génération de travaux sur les relations entre l'évolution du climat mondial et l'agriculture canadienne.

Le tome 2 est un ensemble d'annexes où sont réunis les documents de référence du premier tome. On y trouve le résumé de plus de soixante-dix études sur l'évolution du climat mondial et l'agriculture canadienne. Il se divise en six parties, chacune reprenant les sous-sections du tome 1.

## CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNÉES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL ET L'AGRICULTURE CANADIENNE

### *Survol de la littérature*

La recherche portant explicitement sur les liens entre le changement climatique mondial et l'agriculture canadienne a commencé au milieu des années 80. Elle englobe un vaste éventail de thèmes connexes, par exemple :

- les cadres et méthodes d'évaluation des impacts du changement climatique mondial sur l'agriculture,
- l'émission de GES résultant de l'agriculture au Canada et la capacité des terres agricoles de séquestrer le carbone,
- la sensibilité des ressources agricoles du Canada au changement climatique et
- des études de cas sur quelques sous-secteurs de l'agriculture ou régions du pays.

Étant donné l'ampleur du domaine, il n'est pas surprenant que la recherche sur le changement climatique mondial et l'agriculture canadienne soit documentée en plusieurs endroits (documents

gouvernementaux, journaux scientifiques et actes de colloques) et fasse l'objet de rapports dans différentes sphères d'activité (publications sur les sciences physiques et de la vie, la sociologie rurale, le changement environnemental et l'économie agricole).

Le tableau 4.1 donne un aperçu des dix bases de données consultées et des mots clés de ce domaine de recherche. Cette consultation avait globalement pour but de trouver les travaux axés sur la sensibilité des ressources agricoles canadiennes au changement climatique et des études de cas sur certains sous-secteurs de l'agriculture ou certaines régions du Canada. Les publications qui n'avaient pas directement trait au projet ont été rejetées. Les synthèses et les résumés présentés dans les tomes 1 et 2 sont tirés des publications retenues, dont le nombre dépassait 70 (voir la bibliographie).

## RÉSUMÉS DES RAPPORTS DE RECHERCHE

Les résumés des publications retenues pour ce projet sont présentés dans le tome 2. Ce dernier est divisé en six parties (propriétés agroclimatiques, rendement des cultures, productivité des terres et des régions, économie agricole, adaptation et agriculture canadienne dans un contexte international). Pour faciliter l'interprétation, chaque partie a été subdivisée en fonction des régions suivantes : la partie continentale inférieure de la Colombie-Britannique, la rivière de la Paix et la limite géographique des terres cultivables, les Prairies, l'Ontario, le Québec et le Canada atlantique.

Chaque résumé de publication du second tome comprend titre, sommaire de la couverture spatiale, description du climat de base, scénario de changement climatique, méthodes de recherche, hypothèses, résultats et conclusions associés principalement à chaque publication. Dans les cas où deux publications ou plus portent sur des études connexes ou similaires, l'entrée renvoie à la " famille " de publications et ces dernières sont présentées en une rubrique unique.

### *Guides et hypothèses d'interprétation*

La recherche sur les liens entre le changement climatique mondial et l'agriculture canadienne a beaucoup évolué depuis le milieu des années 80. De nouvelles générations de MCG ont vu le jour et ont entraîné une révision des scénarios de changement climatique mondial.

Beaucoup de méthodes ont été employées pour évaluer la sensibilité de différents aspects de l'agriculture canadienne à ce changement. Certaines comportent des schémas de classification des ressources, des modèles de productivité des cultures et des modèles économiques locaux et régionaux de production agricole. Ces méthodes ont aussi évolué. Ainsi, certains modèles de productivité des récoltes du milieu des années 80 ne tenaient compte que du climat et de facteurs pédologiques; ils étaient typiquement fondés sur un pas de temps lié à la saison sans gel. Les modèles de la génération actuelle sont plus perfectionnés. Ils permettent d'évaluer le rendement en fonction des régimes de température et d'humidité, des concentrations atmosphériques de $CO_2$ et de toute une gamme de données relatives à la gestion. Ils utilisent un pas de temps quotidien plutôt que saisonnier.

**Tableau 4.1 Résumé de la revue de la littérature**

**a) Bases de données consultées**

| Nom de la base | Années |
|---|---|
| • Au courant (CC) | 1988 à ce jour |
| • Carleton University Bibliographic Enquiry (CUBE) | 1988 à ce jour |
| • Science Citation Index (SCI) | 1994-1996 |
| • GeoBase (comprend résumés analytiques en géographie humaine et physique, en écologie, en minéralogie, en développement international et en géologie et revue de la littérature océanographique) | 1990 à ce jour |
| • Offices du CAB-International (CAB) | 1985 à ce jour |
| • Agricultural Sciences Database (AGRICOLA) | 1990 à ce jour |
| • Environmental Periodical Index (EPI) | 1985 à ce jour |
| • Index de périodiques canadiens (IPC/CPI) | 1988 à ce jour |
| • Swets and Zeitlinger Inc. Electronic Table of Contents (SWETSCAN) | 1993 à ce jour |
| • Internet : nombreux sites gouvernementaux et universitaires | 1990 à ce jour |

**a) Mots clés[1]**

| Thème | Termes connexes |
|---|---|
| Climat | agroclimat, agroclimatique, changement climatique, changement mondial, climat, climatique, modification de l'environnement, réchauffement, température, variabilité climatique, variabilité du climat. |
| Agriculture | adaptation, agricole, agriculture, blé, céréales, culture, exploitation, fourrage, impacts, maïs, modèles de croissance, récolte, rendement, saison sans gel, socio-économique. |
| Lieu | Alberta, Amérique du Nord, Atlantique, Canada, Centre du Canada, Colombie-Britannique, Est du Canada, Île-du-Prince-Édouard, Lower Mainland, Manitoba, Maritimes, Nouveau-Brunswick, nord, Nord du Canada, Nouvelle-Écosse, Ontario, Prairies, Québec, Saskatchewan, Terre-Neuve, Territoires du Nord-Ouest, Yukon. |

[1] Les recherches ont été effectuées à partir de différents termes liés au climat, à l'agriculture et au lieu, liés par les opérateurs " et ", " ou " et " avec ". Pour que toutes les formes d'un mot soient incluses, la fonction " * " a été utilisée autant que possible (ainsi, la forme " climat* " permet de trouver tous les termes commençant par les lettres " climat ").

L'absence d'uniformité et l'évolution permanente des méthodes d'évaluation font que les paramètres de temps et de lieu varient d'une étude à une autre. Pour réduire au minimum l'incidence possible de ces différences sur les interprétations et les généralisations issues des

travaux antérieurs, le présent projet accorde plus de poids aux travaux les plus récents. Quand les données les plus accessibles dataient de plusieurs années, des efforts ont été déployés pour réinterpréter les conclusions à la lumière des résultats des études les plus récentes.

## PERSPECTIVES BIOPHYSIQUES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL ET L'AGRICULTURE CANADIENNE

### *Impacts sur les propriétés agroclimatiques*

Les travaux concernant les impacts possibles de plusieurs scénarios de changement climatique mondial sur les conditions agroclimatiques sont assez abondants pour toutes les régions du Canada, sauf le sud de la Colombie-Britannique (tableau 4.2). Plusieurs scénarios ont été envisagés de même que leurs répercussions sur un vaste éventail de propriétés agroclimatiques, dont la saison de croissance et la saison sans gel (SC/SG), les valeurs saisonnières de la température (T), les degrés-jours (DJ), l'unité thermique du maïs (UTM), les précipitations (PRÉC) et le déficit hydrique (DH). Chose certaine, les impacts du phénomène sur les régimes de température ont été plus amplement étudiés que les impacts sur les régimes hygrométriques.

Tous les scénarios et toutes les études du changement climatique mondial laissent entrevoir un réchauffement considérable dans tout le Canada. La saison sans gel devrait donc être plus longue, plus chaude et plus propice à l'agriculture commerciale que les régimes de température existants, qui se caractérisent par une saison sans gel brève et froide dans beaucoup de régions du pays. L'évaluation de l'allongement de la saison sans gel n'est toutefois pas uniforme pour tout le Canada et va d'un minimum d'une semaine à un maximum de neuf semaines. Pour les grandes régions agricoles que sont les Prairies, l'Ontario et le Québec, la plupart des estimations donnent à croire que la saison sans gel serait prolongée de trois à cinq semaines. L'allongement prévu de la saison sans gel dans le Canada atlantique est un peu supérieur, plusieurs chercheurs l'estimant entre quatre et huit semaines. Ces chiffres contrastent avec les résultats d'études sur la région de la rivière de la Paix et d'autres régions à proximité de la limite actuelle des terres cultivables où l'allongement estimé de la saison sans gel se limite à environ trois ou quatre semaines.

L'évaluation des changements possibles des températures moyennes pendant la saison sans gel varie aussi beaucoup d'une région à l'autre et en fonction des scénarios de changement climatique mondial. Ainsi, selon le UKMO, les augmentations les plus extrêmes toucheraient la région des Prairies. Dans cette région et pour ce scénario, en effet, la limite inférieure des élévations de température serait d'environ 5,0 °C, ce qui dépasse la limite supérieure calculée par la plupart des autres scénarios pour les autres régions du Canada. Dans l'ensemble, ce résultat donne à croire que les études fondées sur des scénarios dérivés du MCG du UKMO doivent être considérées avec prudence, vues comme atypiques et reposant sur des hausses de température qui s'écartent trop d'autres scénarios de changement climatique.

## Tableau 4.2 Impacts prévus de divers scénarios de changement climatique sur certaines propriétés agroclimatiques

| PROP. | SCÉNARIO | C.-B. ET LOWER MAINLAND | RIV. DE LA PAIX/ LIM. TERRES CULT. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC | CANADA ATLANTIQUE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SC/SG | T↑1 à ↑3 °C | ↑14 (↑10) | ↑14 (↑14) | ↑12 (↑12) | ↑10 (↑ 7) | | ↑11 (↑ 7) |
| | | ↑42 (↑31) | ↑37 (↑38) | ↑32 (↑31) | ↑39 (↑33) | | ↑47 (↑38) |
| jours | CCC | | ↑13 (↑10) | | | ↑33 (↑20) | |
| | | | ↑18 (↑14) | | | ↑42 (↑38) | |
| (%) | GFDL | | ↑29 (↑22) | | ↑35 (↑23) | ↑24 (↑22) | ↑64 (↑43) |
| | | | | | ↑45 (↑31) | ↑34 (↑28) | ↑85 (↑68) |
| | GISS | | ↑25 (↑25) | ↑48 | ↑49 (↑36) | ↑42 (↑38) | ↑41 (↑31) |
| | | | ↑32 (↑40) | | ↑68 (↑49) | ↑46 (↑43) | ↑61 (↑49) |
| | OSU | | | | | | ↑34 (↑25) |
| | | | | | | | ↑46 (↑37) |
| | OP. EXP. | | | (↑20) | ↑40 | | ↑41 |
| | | | | (↑30) | ↑60 | | ↑61 |
| T °C | CCC | | ↑1,0 | ↑2,6 | ↑5,1 | ↑2,3 | |
| | | | ↑4,1 | ↑8,3 | | ↑2,8 | |
| | GFDL | | ↑4,0 | ↑2,0 | ↑1,5 | ↑1,4 | ↑4,6 |
| | | | ↑6,0 | ↑5,5 | ↑5,1 | ↑3,3 | ↑5,5 |
| | GISS | | ↑0,8 | ↑2,5 | ↑1,5 | ↑3,1 | ↑3,3 |
| | | | ↑1,6 | ↑4,6 | ↑3,6 | ↑4,5 | ↑4,1 |
| | UKMO | | | ↑5,0 | | | |
| | | | | ↑9,5 | | | |
| | OSU | | | | | | ↑3,0 |
| | | | | | | | ↑3,2 |
| | OP. EXP. | | ↑7,0 | ↑3,0 | ↑1,5 | | ↑3,3 |
| | | | | ↑8,0 | ↑1,9 | | |
| DJ | T↑1 à ↑3 °C | | | | | | ↑180 (↑13) |
| | | | | | | | ↑680 (↑57) |
| Unités | CCC | | ↑600 (↑63) | | | ↑ 762 (↑51) | |
| | | | ↑635 (↑79) | | | ↑1103 (↑70) | |
| (%) | GFDL | | ↑800 (↑85) | | | ↑443 (↑38) | ↑1095 (↑ 73) |
| | | | | | | ↑582 (↑43) | ↑1215 (↑102) |
| | GISS | | ↑420 (↑42) | | ↑1075 (↑38) | ↑660 (↑58) | ↑742 (↑50) |
| | | | ↑486 (↑79) | | | ↑819 (↑67) | ↑811 (↑75) |
| | OSU | | | | | | ↑595 (↑43) |
| | | | | | | | ↑691 (↑55) |
| | OP. EXP. | | | | | | ↑750 |
| | | | | | | | ↑800 |

NOTES

1. Les chiffres du tableau 4.2 sont tirés de : Arthur, 88a; Arthur, 88b; Arthur et Abizadeh, 88; Bootsma *et al.*, 84; Brklacich *et al.*, 89; Brklacich et Tarnocai, 91; Brklacich *et al.*, 92; Brklacich et Stewart, 93; Brklacich et Curran, 94; Brklacich *et al.*, 94; Brklacich et Stewart, 95; Brklacich *et al.*, 96; Brklacich *et al.*, 97a; Delcourt et van Kooten, 95; DPA Group, 89; Hall et Burkholder, 93; Land Evaluation Group, 85; Land Evaluation Group, 86; Lilley et Webb, 90; Maybank *et al.*, 95; Mills, 92; Mills, 94; Parker et Cowan, 93; Parry et Carter, 89; Roots, 93; Schweger et Hooey, 91; Singh *et al.*, 87; Singh et Stewart, 91; Singh *et al.*, 96; Singh *et al.*, 97; Smit, 87; Smit *et al.*, 89; Stewart *et al.*, 88a; Stewart *et al.*, 88b; Stewart, 89; Stewart, 90; Stewart et Muma, 90; Stewart, 91; Toure *et al.*, 95; Viau et Mitic, 92; Wheaton *et al.*, 92; Wheaton, 94; Williams *et al.*, 88.

## Tableau 4.2 (*suite*)

| PROP | SCÉNARIO | C.-B. ET LOWER MAINLAND | RIV. DE LA PAIX/ LIM. TERRES CULT. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC | CANADA ATLANTIQUE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| UTM | T↑1 à ↑3 °C | ↑ 377 (↑15)<br>↑1171 (↑46) | ↑335 (↑21)<br>↑987 (↑62) | ↑310 (↑17)<br>↑915 (↑49) | ↑ 289 (↑24)<br>↑1125 (↑52) | | ↑ 307 (↑12)<br>↑1173 (↑55) |
| Unités | CCC | | | | | ↑1217 (↑43)<br>↑1631 (↑66) | |
| (%) | GFDL | | | | ↑ 900 (↑36)<br>↑1200 (↑45) | ↑671 (↑34)<br>↑867 (↑40) | ↑1796 (↑66)<br>↑1863 (↑75) |
| | GISS | | | (↑48)<br>(↑75) | ↑1300 (↑48)<br>↑1610 (↑65) | ↑1057 (↑53)<br>↑1240 (↑63) | ↑1147 (↑45)<br>↑1333 (↑73) |
| | OSU | | | | | | ↑ 974 (↑38)<br>↑1063 (↑53) |
| | OP. EXP. | | | | ↑1300<br>↑1600 | | ↑1100<br>↑1300 |
| PRÉC. | T↑1 à ↑3 °C | | | | | | (↑ 3)<br>(↑39) |
| mm | CCC | | (↓ 25)<br>(↑ 25) | (↓ 30)<br>(↑ 70) | (↓ 35)<br>(↓ 6) | (↑ 20)<br>(↑ 36) | |
| (%) | GFDL | | (↓ 25)<br>(↑100) | (↓ 20)<br>(↑ 82) | (↓ 52)<br>(↑ 40) | (↑ 4)<br>(↑ 34) | ↑249 (↑63)<br>↑367 (↑90) |
| | GISS | | ↑63 (↑ 40)<br>↑81 (↑131) | ( 0)<br>(↑ 30) | (↓ 34)<br>(↑ 42) | (↑ 28)<br>(↑ 48) | ↑138 (↑33)<br>↑255 (↑62) |
| | UKMO | | | (↓ 20)<br>(↑ 58) | | | |
| | OSU | | | | | | ↑128 (↑33)<br>↑176 (↑43) |
| | OP. EXP. | | Augmentation | (↓ 30)<br>(↑ 80) | ↑100<br>↑150 | | (↑38)<br>(↑62) |
| DH | CCC | | ↑40 (↑17)<br>↑57 (↑33) | | | ↓84 (↓50)<br>↑48 (↑72) | |
| mm | GFDL | | ↑ 5 (↑ 2) | | ↑ 92 (↑122)<br>↑146 (↑230) | | |
| (%) | GISS | | ↑75 (↑29)<br>↑80 (↑44) | (↑40)<br>(↑60) | ↑ 95 (↑112)<br>↑170 (↑235) | | |
| | OSU | | | | | | |
| | OP. EXP. | | | Augmentation | | ↑125 | |

NOTES :

2. Les estimations de T (température), DJ (degrés-jours), UTM (unité thermique du maïs), PRÉC (précipitations) et DH (déficit hydrique) s'appliquent à la saison de croissance sans gel.
3. Ces chiffres représentent une plage estimative pour le changement climatique employé et les régions étudiées. Le rapport des changements estimés aux valeurs absolues est suivi du pourcentage estimé entre parenthèses.

Les élévations de température prévues pour la saison sans gel en Ontario et au Québec se situent en général dans une plage de 1,5 à 5,0 °C, la plus forte étant associée aux régions les plus au nord. Pour le Canada atlantique, la plage est plus restreinte, soit 3,5 à 4,5 °C. Ces chiffres diffèrent considérablement de ceux qui ont été obtenus pour les régions des Prairies et de la rivière de la Paix, où les chercheurs s'entendent moins sur les hausses de température prévues. Des tendances similaires se dessinent pour d'autres propriétés des régimes de température, y compris les degrés-jours et les unités thermiques du maïs.

Les impacts estimés du changement climatique mondial sur les régimes hygrométriques agricoles se caractérisent par une gamme de résultats plus large que les impacts évalués du phénomène sur les régimes de température. Pour les Prairies et la rivière de la Paix, les changements estimés dans les précipitations vont de diminutions d'environ 30 % à des augmentations de 80 %. Les estimations du scénario du GFDL pour les Prairies englobent tout ce spectre avec une diminution prévue des précipitations pour la portion ouest des Prairies et une augmentation dans la portion est. Des augmentations et des diminutions de précipitations sont prévues pour l'Ontario mais, en comparaison avec les Prairies, les diminutions s'annoncent plus spectaculaires et les augmentations seraient, typiquement, de l'ordre de 40 %. Il y a consensus quant à une augmentation des précipitations saisonnières au Québec et au Canada atlantique, ce dernier risquant les plus fortes augmentations.

Si la possibilité d'une saison sans gel plus longue et plus chaude et, dans bon nombre d'endroits, de précipitations plus abondantes pendant la saison des récoltes laisse entrevoir un climat plus favorable à la production agricole commerciale dans beaucoup de régions du Canada, la plupart des scénarios de changement climatique mondial impliquent également une augmentation substantielle de l'évapotranspiration. Ces augmentations devraient plus que compenser l'augmentation prévue des précipitations dans la plupart des régions et réduire par conséquent les réserves d'humidité nécessaires à la production agricole. Les déficits hydriques saisonniers devraient s'aggraver dans toutes les régions, la plus durement touchée étant l'Ontario.

En résumé, les chercheurs s'entendent généralement pour dire que le changement climatique mondial va entraîner l'allongement et le réchauffement des périodes sans gel au Canada et, partant, améliorer les régimes de température en faveur de l'agriculture commerciale. Cette évolution des conditions agroclimatiques ne devrait pas être uniforme dans toutes les régions. Ainsi, le plus fort allongement de la saison sans gel devrait se produire dans le Canada atlantique. Toutefois, l'action bénéfique de l'allongement et du réchauffement des saisons sans gel sera très probablement contrée en partie par l'augmentation des déficits hydriques saisonniers dans toutes les régions et pour tous les scénarios de changement climatique. Il est donc crucial d'arriver à évaluer les impacts du changement climatique mondial sur l'agriculture canadienne en tenant compte de la possibilité d'impacts négatifs et positifs sur les propriétés agroclimatiques.

### *Impacts sur l'évolution et le rendement des cultures*

Si les chercheurs ont beaucoup analysé les impacts du changement climatique mondial sur l'évolution et le rendement des cultures, le sujet n'a tout de même pas été aussi approfondi que les évaluations agroclimatiques. Les cultures céréalières, y compris le maïs grain, le blé de printemps

et d'automne, l'avoine et l'orge (tableau 4.3) ont été plus analysées que d'autres grandes cultures comme les graines oléagineuses, le fourrage et la pomme de terre (tableau 4.4). Par ailleurs, tous groupes de cultures confondus, les études ont davantage porté sur les Prairies, l'Ontario et le Québec.

Bon nombre des études faites en Ontario ont été terminées avant la mise en œuvre de la génération actuelle des modèles d'évolution et de productivité des cultures. Elles aident à comprendre les impacts du changement climatique sur le rendement des cultures, mais ne tiennent pas compte des avantages possibles de fortes teneurs en $CO_2$. Dans l'ensemble, les études les plus récentes sur l'Ontario surestiment probablement la possibilité d'impacts négatifs du changement climatique sur le rendement des cultures, surtout en ce qui concerne les céréales, mais il est difficile de déterminer l'ampleur de cette surestimation. Les avantages potentiels de l'augmentation des concentrations de $CO_2$ dépendent de nombreux facteurs, dont le type de culture et le degré de tension hydrique. Il ne convient donc pas d'introduire de simples coefficients d'ajustement.

Toutes les études compilées laissent croire que le réchauffement de la saison sans gel, combiné à toute la gamme des scénarios de changement climatique mondial, va accélérer la croissance des cultures céréalières et, partant, réduire le temps entre l'ensemencement et la récolte (tableau 4.3a). Les estimations fondées sur divers scénarios de changement climatique et l'usage continu des cultivars actuels montrent que la période de maturation des céréales printanières et des céréales à gros grains va diminuer d'environ une semaine et demie à trois semaines dans la plupart des régions du pays. Par ailleurs, l'arrivée hâtive des jours sans gel et la hausse de la température printanière hâteraient le mûrissement des céréales d'hiver et pourraient faire avancer la date de la récolte, peut-être de quatre semaines.

Près de la limite septentrionale actuelle de l'agriculture au Canada, il arrive que le gel survienne à l'automne avant qu'une culture soit parvenue à maturité. La réduction du temps de maturation des cultures pourrait donc réduire le risque de meurtrissure. Cet avantage potentiel pour les régions les plus au nord contraste fortement avec les conclusions de plusieurs études axées sur les régimes climatiques des Prairies, de l'Ontario et du Québec. Pour ces régions, en effet, les signes indiquent qu'un raccourcissement de la période de maturation implique celui de la phase de remplissage des grains, ce qui tendrait alors à faire baisser les rendements. Les interactions entre le changement climatique et la croissance des cultures seront complexes et auront des impacts à la fois positifs et négatifs. Qui plus est, les impacts nets seront probablement fonction de nombreux facteurs tels que l'ampleur du changement climatique estimé, le lieu et le type de culture.

## Tableau 4.3 Impacts prévus du changement climatique mondial sur les cultures céréalières[1]

a) Croissance des cultures céréalières[2]

| SCÉNARIO | MODÈLE DE CULTURE | C.-B. ET LOWER MAINLAND | RIV. DE LA PAIX-LIM. TERRES CULT. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC | CANADA ATLANTIQUE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ↑T,↓↑P[3] | FAO | | | | | | PC : 0,5-2,5 |
| CCC | FAO | | | | | PC : 0,5-3,0<br>GG : 1,0-3,5 | |
| | CERES | | PC : 1,5-3,5 | | | | |
| | REG. REND. WX | | | PC : diminution | | | |
| GFDL | FAO | | | | | | PC : 0,5-2,5 |
| | CERES | | PC : 0,5-2,5 | PC : 1,5-4,0 | BA : 0,5-3,0 | | |
| | MABHS | | | PC : diminution | | | |
| | REG. REND. WX | | | PC : diminution | | | |
| GISS | FAO | | | PC : 0,5-2,0 | | | PC : 0,5-3,5 |
| | CERES | | | PC : 1,5-3,0 | BA : 3,5-4,5 | | |
| | MABHS | | | PC : diminution | | | |
| UKMO | CERES | | | PC : 3,0-4,5 | | | |

[1] Tiré de : Arthur, 88b, Arthur et Abizadeh, 88; Bootsma *et al.*, 84; Brklacich *et al.*, 89; Brklacich, 90; Brklacich *et al.*, 92; Brklacich et Stewart, 93; Brklacich *et al.*, 94; Brklacich et Stewart, 95; Brklacich *et al.*, 96; Brklacich *et al.*, 97a; Delcourt et van Kooten, 95; DPA Group, 89; El Mayaar *et al.*, 97; Land Evaluation Group, 85; Lilley et Webb, 90; Mooney et Arthur, 90; Parry et Carter, 89; Savdie, 89; Singh *et al.*, 87; Singh et Stewart, 91; Singh *et al.*, 96; Singh *et al.*, 97; Smit *et al.*, 89; Stewart *et al.*, 88a; Stewart *et al.*, 88b; Stewart, 89; Stewart, 90; Stewart et Muma, 90; Stewart, 91; Toure *et al.*, 95; Tubiello *et al.*, 95; Viau et Mitic, 92; Wheaton *et al.*, 92; Wheaton, 94; Williams, 85; Williams *et al.*, 88.

[2] Pour les petites céréales (PC) et les céréales à gros grains (GG), les estimations aboutissent à des raccourcissements (mesurés en semaines) de la période de maturation. Pour le blé d'automne (BA), les effets prévus sont un devancement (en semaines) de la date de récolte.

[3] Tiré d'études fondées sur ↑T de 1 °C et 2 °C et ↓↑PRÉC de 80 % et 120 %.

a) Rendements céréaliers (% de changement p/r à la situation actuelle)

| SCÉNARIO | MODÈLE DE CULTURE | C.-B. ET LOWER MAINLAND | RIV. DE LA PAIX-LIM. TERRES CULT. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC | CANADA ATLANTIQUE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ↑T,↓↑P[3] | FAO | PC : ↓45-0<br>GG : ↓73-↑10 | PC : ↓46-↑18 | PC : ↓48-↑18 | PC : ↓28-↑11<br>GG : ↓31-↑4 | | PC : ↓17-0 |
| CCC+ $\uparrow CO_2$ | FAO | | | | | PC : ↓15-↑40<br>GG : ↓7-↑45 | |
| | CERES | | PC : ↓24-↑4 | PC : ↑15 | | | |
| | MABHS | | | | GG : ↓14 | | |
| | REG. REND. WX | | PC : ↑7-↑14 | | | | |
| GFDL | FAO | | | | PC[4] : ↓23-↑25<br>GG[4] : ↓15-↑66 | PC : ↓43-↑9<br>GG[4] : 0-↑859 | |
| | MABHS | | | PC : ↑4-↑28 | GG : ↓12 | | |
| | REG. REND. WX | | | PC : diminution | | | |
| GFDL+ $\uparrow CO_2$ | CERES | | PC : ↓12-↑12 | PC : ↓35-↑66 | BA : ↓19-↓2 | | |
| GISS | FAO | | | PC : ↓18<br>GG : ↓9-↓5 | PC : ↓31-↑17<br>GG[4] :↓14-↑53 | PC : ↓75-↑73<br>GG[4] : 0-↑1200 | |
| | MABHS | | | PC : augmentation | GG : ↓6 | | |
| GISS+ $\uparrow CO_2$ | FAO | | | PC : ↓14-↓6 | | | |
| | CERES | | | PC : ↓2-↑50 | BA : ↓18-↓2 | | |
| UKMO+ $\uparrow CO_2$ | CERES | | | PC : ↓40-↓20 | | | |

[4] Les changements rapportés en ce qui concerne les récoltes touchent les régions de l'Ontario et du Québec où il y a actuellement production céréalière. Dans le nord de l'Ontario et du Québec, il est impossible de produire du blé et du maïs dans les conditions climatiques actuelles, mais les chercheurs ont estimé que les conditions biophysiques résultant du changement climatique indiqué conviendraient à la production de ces céréales.

## Tableau 4.4 Impacts prévus du changement climatique mondial sur la culture des graines oléagineuses, du fourrage et de la pomme de terre (% de changement p/r à la situation actuelle)

a) Graines oléagineuses[5]

| SCÉNARIO | MODÈLE DE CULTURE | SUD-OUEST DE LA C.-B. | RIV. DE LA PAIX-LIM. TERRES CULT. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC | CANADA ATLANTIQUE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ↑T,↓↑P[6] | FAO | ↓59-0 | ↓39-↑13 | ↓50-↑25 | ↓31-↑11 | | ↓24-0 |
| CCC+↑$CO_2$ | FAO | | | | | ↓21-↑49 | |
| GFDL | FAO | | | ↓40-↓4 | ↓41-↑33[7] | ↓40-↑21[3] | |
| GISS | FAO | | | | ↓32-↑30[3] | ↓43-↑89[3] | |

b) Fourrage[8]

| SCÉNARIO | MODÈLE DE CULTURE | SUD-OUEST DE LA C.-B. | RIV. DE LA PAIX-LIM. TERRES CULT. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC | CANADA ATLANTIQUE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ↑T, ↓↑P | FAO | ↓43-↑3 | ↓39-↑2 | ↓43-↑19 | ↓13-↑3 | | ↓8-↓4 |
| GFDL | FAO | | | | ↓20-↑7 | | |
| GISS | FAO | | | | ↓15-↑24 | | |

c) Pomme de terre[9]

| SCÉNARIO | MODÈLE DE CULTURE | SUD-OUEST DE LA C.-B. | RIV. DE LA PAIX-LIM. TERRES CULT.. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC | CANADA ATLANTIQUE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T↑,↓↑P | FAO | ↓50-0 | ↓25-↑23 | ↓45-↑24 | ↓29-↑25 | | ↓15-↓5 |
| GFDL | FAO | | | | ↓27-↑360 | ↓27-↑178 | |
| GISS | FAO | | | ↓21-↑9 | ↓23-↑344 | ↓42-↑31 | |

[5] Tiré de : Bootsma *et al.,* 84; Brklacich *et al.,* 89; Brklacich, 90; El Mayaar *et al.,* 97; Land Evaluation Group, 85; Mooney et Arthur, 90; Singh *et al.,* 87; Singh et Stewart, 91; Singh *et al.,* 96; Singh *et al.,* 97 Smit *et al.,* 89; Smit et Brklacich, 92; Stewart, 90; Wheaton, 94; Williams *et al.,* 88.

[6] Tiré d'études fondées sur ↑T de 1 ◦C et 2 ◦C et ↓↑PRÉC de 80 % et de 120 %.

[7] Les changements indiqués en ce qui concerne les rendements touchent les régions de l'Ontario et du Québec où il y a actuellement production de graines oléagineuses. Dans le nord de l'Ontario et du Québec, il est impossible de produire ces graines dans les conditions climatiques actuelles, mais les chercheurs ont estimé que les conditions biophysiques résultant du changement climatique indiqué conviendraient à cette production.

[8] Tiré de : Bootsma *et al.,* 84; Brklacich *et al.,* 89; Land Evaluation Group, 85; Lilley et Webb, 90; Mooney et Arthur, 90; Smit *et al.,* 89; Stewart, 90.

[9] Tiré de : Bootsma *et al.*,84; El Mayaar *et al.,* 97; Land Evaluation Group, 85; Mooney et Arthur, 90; Singh *et al.,* 87; Singh et Stewart, 91; Singh *et al.,* 96; Singh *et al.,* 97; Stewart, 90.

Des chercheurs ont évalué les impacts positifs et négatifs nets du phénomène sur les rendements céréaliers (tableau 4.3b). L'action combinée d'une élévation des concentrations de $CO_2$ et du changement climatique dans la région de la rivière de la Paix devrait être relativement minime. Les rendements devraient augmenter de 14% au plus et la baisse pourrait atteindre 24 % dans certains endroits. Le réchauffement des températures et l'élévation des concentrations de $CO_2$ créeraient des conditions plus favorables, mais il a été estimé que ces avantages potentiels seraient contrés par l'augmentation du stress hydrique subi par les cultures et l'accélération de la maturation. En fin de compte, donc, les impacts positifs et négatifs tendraient à s'annuler et à réduire l'ampleur des impacts positifs du changement climatique sur les rendements céréaliers dans cette région.

Dans les Prairies, les impacts prévus du changement climatique sur les rendements céréaliers seraient plus prononcés et variables, ce que le scénario du GFDL rend particulièrement manifeste. Dans l'ouest de cette région, l'action combinée de la diminution prévue des précipitations, de l'augmentation du stress hydrique subi par les cultures et de l'accélération de la maturation l'emporterait sur les avantages de l'élévation des températures et des concentrations de $CO_2$. Il a d'ailleurs été estimé que ces conditions entraîneraient à la baisse le rendement des céréales printanières, d'un facteur qui pourrait atteindre 35 %. Dans l'est des Prairies, toujours selon le scénario établi par le GFDL, l'augmentation envisagée des précipitations renverserait cette tendance et les rendements céréaliers pourraient augmenter d'un facteur de 66 %.

En Ontario et au Québec, les tendances qui se dessinent dans la réaction des rendements céréaliers au changement climatique seraient similaires aux tendances décrites pour la région des Prairies à une différence près, assez substantielle. Les strictes limites qu'impose le climat actuel à la production de céréales dans la zone argileuse du nord de l'Ontario et du Québec seraient considérablement allégées dans plusieurs des scénarios élaborés, ouvrant de nouvelles perspectives à la production céréalière, et surtout à la production de maïs.

Par comparaison avec l'évaluation de la sensibilité des rendements céréaliers au changement climatique, il se trouve que les effets de ce dernier sur d'autres cultures comme les graines oléagineuses, le fourrage et la pomme de terre n'ont pas fait l'objet d'une étude poussée (tableau 4.4). Les travaux à ce sujet sont beaucoup moins nombreux et ne tiennent compte que d'un nombre relativement restreint de scénarios de changement climatique et de moins de régions dans le pays.

Des signes préliminaires indiquent que l'augmentation du stress hydrique imposé aux cultures de graines oléagineuses va limiter les rendements dans beaucoup de régions où ces graines sont actuellement produites. Selon tous les scénarios de changement climatique envisagés à ce jour, cette incidence négative serait quelque peu contrebalancée par une expansion vers le nord de la zone où les conditions biophysiques permettent cette culture. Pour ce qui est du fourrage et de la pomme de terre, les quelques études faites jusqu'ici permettent peu ou pas de tirer des conclusions fermes, mais les indications préliminaires suggèrent que les rendements suivraient des tendances semblables à celles qui ont été décrites pour les graines oléagineuses; l'augmentation prévue des rendements de la pomme de terre dans les régions du Québec et de l'Ontario est

attribuable aux conditions plus favorables aux récoltes plutôt qu'à l'allongement et au réchauffement de la saison sans gel.

***Impacts sur l'appropriation des terres à la culture et le potentiel productif***

L'estimation de l'appropriation des terres à l'agriculture et du potentiel productif se fait en intégrant les données agroclimatiques et celles sur le rendement aux estimations de l'étendue du domaine agricole. Pour évaluer dans quelle mesure une terre convient à l'agriculture, il existe plusieurs moyens, généralement fondés sur la sommation de scores factoriels assignés aux conditions climatiques, pédologiques et topographiques. Des méthodes plus complexes font appel à des modèles de programmation mathématique pour intégrer ces données et déterminer la meilleure façon d'utiliser les ressources.

Au Canada, il y a eu peu d'études sur la sensibilité de l'appropriation des terres à l'agriculture et du potentiel productif au changement climatique mondial (tableau 4.5). Les rapports publiés portent essentiellement sur l'Ontario et la région de la rivière de la Paix; il n'y en a pas beaucoup sur les Prairies et le Québec. Aucune ne concerne l'ampleur des impacts du changement climatique mondial sur l'appropriation des terres à l'agriculture et le potentiel productif de la partie continentale inférieure de la Colombie-Britannique et du Canada atlantique.

Les recherches effectuées récemment donnent à croire que les avantages de l'allongement et du réchauffement de la saison sans gel seraient plus prononcés dans la région de la rivière de la Paix, où la superficie propre à la production de cultures commerciales devrait augmenter considérablement. Les études portant sur les régions agricoles du nord du Québec et de l'Ontario mènent à des conclusions similaires et laissent entrevoir de nouvelles possibilités pour la production de plantes de grande culture dans ces régions.

L'impact du phénomène sur le potentiel productif au nord du 60ºN (c.-à-d. dans la vallée du Mackenzie) ne devrait toutefois pas se faire autant sentir. Selon la plupart des scénarios, le réchauffement le plus prononcé devrait survenir pendant les mois d'hiver, de sorte que l'allongement de la saison sans gel et l'élévation des températures estivales dans les régions les plus au nord ne seraient pas aussi importants qu'on pouvait d'abord le croire. Les chercheurs ont également estimé que les avantages d'un régime de température plus favorable seraient quelque peu contrebalancés par la diminution des précipitations estivales et l'augmentation concomitante des déficits hydriques. Dans les régions au-delà de la limite septentrionale de la production agricole, il semble peu probable que le changement climatique entraîne une expansion substantielle de la superficie des terres convenant à l'agriculture.

Le changement climatique mondial devrait améliorer la possibilité de pratiquer des cultures spéciales dans le sud de l'Ontario et du Québec. Dans le sud de l'Ontario, la superficie où les conditions physiques se prêtent à la production de fruits et de légumes devrait s'étendre au-delà de l'entourage des lacs. Il semble en outre que la culture des pommes au sud de Montréal pourrait bénéficier de nouvelles possibilités.

## Tableau 4.5 Impacts prévus du changement climatique mondial sur l'appropriation des terres à l'agriculture et sur le potentiel productif[10]

| SCÉNARIO | MÉTHODE | RIV. DE LA PAIX-LIM. TERRES CULT. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC |
|---|---|---|---|---|---|
| T↑ | FAO | | | Chaque ↑1 °C repousse limite maïs de 60-100 km vers le nord. | |
| CCC | SCC | ↑ terres cult. 2x10$^6$ha (↑1 %)<br>↑ approp. moyenne de catég. 5.2 à 3.5 | | | |
| | APPROP. TERRES | Bassin du Mackenzie : ↑31 % | | | |
| GFDL | APPROP. TERRES | Bassin du Mackenzie : ↑41 % | | | |
| | APPROP. ÉCON. | | | Maïs ↑14 %; blé ↓17 %; graines oléag. ↓5 %. | |
| GISS | CLASS. CLIM. | Cours infér. Mackenzie : pas de chang.<br>Cours centr. et sup. Mackenzie : ↑ETP contrebalance ↑T | Approp. des terres ↑28 % | Possib. dans le nord ont. maïs sucré et pommes. Possib. fruits et lég. ↑ au-delà de la région des lacs. | Nouv. possib. au sud de Montréal pour pommes. Nouv. poss. pour plantes de grande culture en Abitibi-Témiscamingue |
| | FAO | | | Terres présentant déficit hydrique grave : maïs ↑29 %, graines oléag. ↑55 %; pas de chang. pour PC et foin. | |
| | APPROP. ÉCON. | | | Maïs ↑21 %; blé ↓16 %; graines oléag. ↓6 %. Nouvelles possib. dans nord contrées par pertes dans sud. | |
| | POT.PROD. | | ↑ céréales dans le nord des Prairies et ↑ graines oléag. dans le sud du Man. | Pot. prod. prov. ↓4 % | |

[10] Tiré de : Arthur, 88a; Arthur, 88b; Bootsma *et al.*, 84; Brklacich *et al.*, 89; Brklacich et Tarnocai, 91; Brklacich et Smit, 92; Brklacich et Curran, 94; Brklacich *et al.*, 96; Brklacich *et al.*, 97a; Goos, 89; Land Evaluation Group, 85; Land Evaluation Group, 86; Mills, 92; Mills, 94; Mooney et Arthur, 90; Parker et Cowan, 93; Parry et Carter, 89; Roots, 93; Singh et Stewart, 91; Smit *et al.*, 89; Smit et Brklacich, 92; Stewart, 90.

## ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL ET DE L'AGRICULTURE AU CANADA

### *Impacts sur l'économie agricole*

L'impact économique du changement climatique sur le secteur agricole au Canada a donné lieu à beaucoup de spéculation, mais seules quelques études ont été faites et elles portaient toutes exclusivement sur les Prairies et l'Ontario (tableau 4.6). Ces études comportaient un nombre restreint d'estimations à l'échelle régionale et de l'exploitation, et seules les répercussions des scénarios du GFDL et du GISS ainsi que les années " sèches " ont été envisagées. Cette modeste base de données ne permet pas de conclusions ou de généralisations solides, mais elle aide tout de même à comprendre le type d'analyses économiques auxquelles il faudrait maintenant se livrer.

À l'échelle régionale, les conséquences économiques globales du changement climatique dans les Prairies sont jugées relativement peu importantes. Ainsi, les effets prévus sur les recettes découlant de l'agriculture en Alberta sont de l'ordre de -7 à +5 %. Des résultats similaires ont été estimés pour la Saskatchewan et le Manitoba. Ces conclusions provisoires sont toutefois fondées sur plusieurs adaptations à l'échelle subprovinciale, y compris une intensification de la production agricole dans le centre de l'Alberta pour compenser le déclin pouvant survenir ailleurs dans la province, et l'augmentation de la production de cultures de grande valeur commerciale. Cette comparaison entre les impacts envisagés aux échelles provinciale et subprovinciale met en lumière la nécessité de jauger les conséquences économiques du changement climatique à de multiples échelles. Les signes provisoires décelés au moyen de ces études de cas donnent à croire que des effets en apparence mineurs à certains niveaux peuvent masquer des changements assez considérables à d'autres. Ces changements pourraient être positifs dans quelques régions et sous-secteurs agricoles, mais il n'en demeure pas moins qu'il faut évaluer toute la gamme des résultats possibles.

Les résultats des études effectuées en Ontario évoquent des tendances similaires à celles qui se dessinent pour l'Alberta. L'augmentation potentielle (selon un scénario de changement climatique) des profits dans une exploitation céréalière commerciale " typique " du sud-ouest de l'Ontario dépend de la réaffectation des ressources à l'échelle de l'exploitation. Les chercheurs ont également conclu que, selon le scénario du GISS, la variabilité des profits des exploitants d'une année à l'autre pourrait augmenter, accentuant les risques économiques. Il n'est pas sûr que cette étude puisse s'appliquer de même à d'autres types d'exploitations, à d'autres scénarios de changement climatique et à d'autres régions, mais elle montre bien à quel point il faut établir des liens entre évaluations économiques et changement climatique.

### *Changement climatique et adaptation de l'agriculture*

Le sommaire des estimations relatives aux impacts du changement climatique mondial sur les propriétés agroclimatiques, le rendement des cultures, le potentiel productif et les économies agricoles présenté dans les sections précédentes montre bien que le phénomène aura probablement des répercussions à la fois négatives et positives sur l'agriculture au Canada. Dans ce contexte, ces dernières peuvent être envisagées comme l'obligation de faire des choix pour arriver à un

équilibre entre résultats souhaitables et résultats indésirables. Les études de nature économique n'ont abordé qu'indirectement la notion de choix, par le recours à des méthodes analytiques fondées sur la réaffectation possible des ressources à l'échelle des exploitations.

**Tableau 4.6 Impacts prévus du changement climatique mondial sur l'économie agricole**[11]

| SCÉNARIO | MÉTHODE | PRAIRIES | ONTARIO |
|---|---|---|---|
| GFDL | Valeur des cult. prov. | | Valeur totale des cultures ↓12 % |
| | E-S écon. régionale | Recettes totales : Alb. ↓7 %, Sask. ↑3 %, Man. ↑2 % | |
| | Modèle écon. agric. | Revenu agric. en Sask. ↓7 %, emploi en agriculture : ↓1 % | |
| GISS | Valeur des cult. prov. | | Valeur totale des cultures ↓7 % |
| | OCC. écon. rég. | Marges brutes au Man. ↑53 % avec ↑ prod. grande valeur; terres les plus rentables : ↑ dans NO Man. | |
| | E-S écon. rég. | Recettes totales : Alb. ↑5 %, Sask. ↑7 %, Man. 0 % | |
| | Modèle écon. agric. | | Profits moyens des exploit. agric. commerciales du SO Ont. ↑24 %. Profits : ↑44 % années humides et ↓68 % années sèches. |

Si l'on accepte que le changement climatique mondial va très probablement avoir des impacts tant positifs que négatifs sur l'agriculture, on prône maintenant plus généralement la restructuration et l'élargissement du contexte de la recherche sur les impacts du climat et l'élaboration de méthodes qui tiennent compte explicitement du comportement humain et de l'incidence cumulative du changement climatique ainsi que de facteurs non climatiques. Ces facteurs suscitent un intérêt remarquable envers l'analyse de l'adaptabilité de l'agriculture canadienne aux multiples changements environnementaux et socio-économiques en général, et au changement climatique en particulier.

Le changement climatique et l'adaptation de l'agriculture constituent un champ de recherche secondaire relativement nouveau, peu exploré par rapport à l'étude des relations entre le changement climatique et la dimension biophysique de l'agriculture. La majeure partie de la

[11] Tiré de : Arthur, 88a; Arthur, 88b; Arthur et Abizadeh, 88; Arthur et van Kooten, 91; Arthur et van Kooten, 92; Brklacich *et al.*, 89; Goos, 89; Land Evaluation Group, 85; Land Evaluation Group, 86; Lilley et Webb, 90; Mooney et Arthur, 90; Parry et Carter, 89; Stewart *et al.*, 88a; Stewart *et al.*, 88b; Stewart, 89; Wheaton *et al.*, 92; Wheaton, 94, Williams *et al.*, 88.

recherche faite à ce jour sur le changement climatique et l'adaptation de l'agriculture au Canada a porté essentiellement sur deux thèmes :

1. Détermination des options d'adaptation (tableau 4.7a)
2. Étude de la faisabilité de chacune des options envisagées (tableau 4.7b).

Étant donné la relative nouveauté du volet, il n'est pas surprenant que la plus grande partie de la recherche se soit concentrée à reconnaître les options alors que peu de chercheurs se soient employés à évaluer systématiquement les forces et les limites des stratégies d'adaptation.

Bon nombre des moyens d'adaptation répertoriés consistent à empêcher ou tout au moins à retarder le début et à ralentir la vitesse du changement climatique mondial (tableau 4.7a). En ce qui concerne précisément l'adaptation de l'agriculture au Canada en vue de cet objectif global, les mesures envisagées comprennent la réduction des émissions de GES dans le secteur agricole et l'adoption de méthodes qui favoriseraient la séquestration du carbone par les sols consacrés à l'agriculture ou par les cultures.

Les autres possibilités évoquées au tableau 4.7a sont fondées sur une réaction à l'évolution du régime climatique et sont donc intrinsèquement différentes des stratégies visant à prévenir ou à retarder son action. Il s'agit donc de stratégies d'adaptation visant à :

- réduire les pertes individuelles en répartissant le risque sur de plus vastes régions ou entre un plus grand nombre de personnes;
- réduire la fréquence ou l'ampleur possibles des impacts négatifs;
- faciliter la concrétisation des nouvelles possibilités offertes par le changement climatique;
- élaborer des programmes de recherche et d'éducation qui tiennent compte explicitement du changement climatique et de ses impacts sur l'agriculture au Canada.

L'évaluation préliminaire des stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique a surtout porté sur les Prairies et les régions à proximité ou au-delà de la limite climatique actuelle de l'agriculture canadienne (tableau 4.7b). Aucune étude n'a porté explicitement sur les possibilités d'adaptation au Canada atlantique ou dans la partie continentale inférieure de la Colombie-Britannique. Les études faites à ce jour sont des évaluations techniques préliminaires de la possibilité que les mesures choisies contrebalancent les possibles impacts négatifs du changement climatique mondial. Les stratégies choisies visent entre autres à réduire la fréquence ou l'ampleur possibles des impacts négatifs ainsi qu'à concrétiser les nouvelles possibilités. Parmi les conclusions préliminaires de ces évaluations techniques, on note que :

- les effets sur le rendement du recours à des cultivars de céréales de printemps dont la saison est plus longue vont varier d'un endroit à l'autre dans les Prairies; en certains endroits, cette stratégie ne pourrait compenser que partiellement les réductions de rendement;
- le blé d'automne pourrait améliorer les rendements céréaliers dans le sud des Prairies; toutefois, à proximité et au-delà de la limite climatique actuelle de l'agriculture canadienne, le changement climatique pourrait ne pas modifier les conditions hivernales de façon propice à la production de ces céréales;

## Tableau 4.7 Adaptation de l'agriculture canadienne au changement climatique mondial[1]

a) Moyens recensés[2]

| | |
|---|---|
| Modifier le cours des événements (c.-à-d. empêcher ou retarder le changement climatique mondial) | • Amélioration de l'efficacité de la production agricole :<br>- améliorer l'efficience énergétique au niveau des exploitations (tracteurs, chauffage, etc.);<br>- améliorer l'alimentation du bétail pour diminuer la production de méthane.<br>• Conservation des ressources :<br>- laisser les terres agricoles peu productives retourner à l'état de prairies ou de forêts;<br>- recourir davantage aux mesures de conservation des sols;<br>- recourir davantage aux plantations brise-vent et aux méthodes de l'agroforesterie;<br>- réduire l'usage de pesticides et d'herbicides;<br>- accentuer l'utilisation des sources d'énergie renouvelable.<br>• Établissement du prix des aliments :<br>- restructurer les prix des aliments en fonction des coûts de la production et de la préservation de l'environnement et même, au besoin, des coûts de restauration des sols. |
| Répartir les pertes (c.-à-d. répartir le risque sur des régions plus vastes ou des populations plus nombreuses) | • Compenser par des moyens publics ou privés les pertes découlant :<br>- de la réduction des ressources en eau pour l'agriculture;<br>- de l'augmentation des risques de production. |
| Prévenir/éviter les impacts du phénomène (c.-à-d. réduire la fréquence possible des impacts négatifs) | • Adaptation ou modification des méthodes agricoles actuelles :<br>- étendre la culture de fourrage et de céréales vers le nord;<br>- accentuer la culture de produits commerciaux de grande valeur.<br>• Introduction de cultivars dont la saison de culture est plus longue ou de nouvelles cultures :<br>- tirer parti d'une plus longue saison sans gel grâce aux cultivars actuellement utilisés dans les régions plus chaudes, ou s'adonner à de nouvelles cultures;<br>- accentuer ou instaurer l'usage des céréales d'hiver.<br>• Stratégie relative à l'eau :<br>- intensifier l'irrigation des cultures;<br>- aménager des réservoirs d'eau sur les fermes;<br>- améliorer la rétention de la neige et mieux tirer parti de la fonte printanière;<br>- améliorer la gestion du ruissellement. |
| Nouvelles possibilités (c.-à-d. modifier les méthodes agricoles dans le contexte de l'évolution des paramètres de production) | • faire un marketing sélectif;<br>• utiliser des cultivars dont la saison de culture est plus longue ou pratiquer de nouvelles cultures;<br>• déplacer les activités agricoles. |
| Recherche et éducation (c.-à-d. recherche et développement pour faciliter la modification des méthodes agricoles) | • rétablir les stations de recherche agricole au nord de 60° N;<br>• produire des cultivars résistant à la chaleur et à la sécheresse;<br>• constituer des bases de données régionales exhaustives sur les réserves et l'utilisation de l'eau;<br>• améliorer le transfert de technologie aux exploitants. |

[1] Tiré de : Arthur, 88b; Arthur et Abizadeh, 88; Arthur et van Kooten, 91; Arthur et van Kooten, 92; Brklacich, 90; Brklacich et Tarnocai, 91; Brklacich et Stewart, 93; Brklacich *et al.*, 94; Brklacich et Stewart, 95; Brklacich *et al.*, 97a; Brklacich *et al.*, 97b; Bryant *et al.*, 97; Crosson, 89; Delcourt et van Kooten, 95; DPA Group, 89; Major *et al.*, 91; Maybank *et al.*, 95; Mooney et Arthur, 90; Ont. Round Table, 92; Parry *et al.*, 88; Parry et Carter, 89; Roots, 93; Savdie *et al.*, 91; Schweger et Hooey, 91; Singh *et al.*, 96; Singh *et al.*, 97; Smit, 93; Smit *et al.*, 96; Stewart *et al.*, 88a; Stewart *et al.*, 88b; Stewart, 89; Stewart, 91; Tubiello *et al.*, 95; Viau et Mitic, 92; Wheaton *et al.*, 92; Wheaton, 94, Williams *et al.*, 88.

[2] Les moyens répertoriés sont liés à des stratégies possibles d'adaptation de l'agriculture qui n'ont pas été explicitement évaluées dans le contexte du changement climatique mondial.

## b) Solutions possibles[12]

| SCÉNARIO | STRATÉGIE D'ADAPTATION | RIVIÈRE DE LA PAIX LIM. TERRES CULT. | PRAIRIES | ONTARIO | QUÉBEC |
|---|---|---|---|---|---|
| ↑T↓PRÉC. | Céréales d'hiver | | Pertes économiques ↓16 % | | |
| CCC | Irrigation | ↓TH, ↑ rendements du blé | | ↑ irrigation juin et août | |
| | Autres cultures | ↓ mais persistance des impacts nég. sur rendements | | | Maïs : compensation des impacts nég. Soya : ↑ rendement sud; nouvelles possibilités au nord |
| | Céréales d'hiver | Bassin infér. Mack.: persistance de la destruction par l'hiver | | | |
| GFDL | Irrigation | ↓TH; ↑ rendements du blé | ↓TH; ↑rendements du blé | ↑ irrigation juillet et août | |
| | Autres cultures | ↓ mineure des rendements | | | |
| | Céréales d'hiver | Bassin infér. Mack. : persistance de la destruction par l'hiver | N. Alb. : persistance de la destruction par l'hiver | | |
| | Ensemencement hâtif | | Impacts les plus sensibles dans régions les plus sèches. | | |
| GISS | Irrigation | Bassin infér. Mack. : pas de chang. Bassin supérieur : ↓TH | ↓TH; ↑rendements du blé | ↑ irrigation août efficace pour maïs mais non pour haricots et blé | |
| | Cultivars tolérant chaleur et sécheresse | | Rétablissement partiel de l'économie agricole du Manitoba | | |
| | Céréales d'hiver | | ↓ destr. par hiv.; possib. céréales hiv. | | |
| | Ensemencement hâtif | | Efficace à l'est, variable en Alb. | | |
| UKMO | Irrigation | | ↓TH; ↑rendements du blé | | |
| | Céréales d'hiver | | Nord : persistance de la destr. par hiv. | | |
| | Ensemencement hâtif | | ↓ mais persistance des impacts nég. sur le rendement | | |

[12] Les stratégies d'adaptation de cette catégorie ont fait l'objet d'une évaluation préliminaire sur le plan de la possibilité de contrer les effets négatifs envisagés du changement climatique mondial.

- bon nombre des scénarios de changement climatique impliquent une augmentation du stress hydrique des cultures; par conséquent, les mesures d'adaptation qui feraient augmenter le degré d'humidité au printemps et à l'été, y compris l'irrigation artificielle, réduiraient les impacts négatifs du changement climatique et hausseraient le rendement des cultures;
- s'il y a changement climatique, il sera peut-être possible d'instaurer des grandes cultures de plantes à forte valeur commerciale, comme le maïs et le soya, dans le nord du Québec et de l'Ontario.

Il faut préciser que ces évaluations préliminaires ont été faites en fonction de conditions biophysiques seulement. La viabilité économique et la volonté ou la possibilité réelles des agriculteurs d'adopter l'une ou l'autre de ces solutions ne sont pas connues. Les auteurs de certains des travaux les plus récents sur la capacité d'adaptation de l'agriculture au changement climatique soulignent le besoin pressant de faire participer davantage la communauté des agriculteurs à la recherche. Il serait dès lors plus facile de déterminer le bien-fondé des indicateurs agroclimatiques employés par les chercheurs pour les évaluations au niveau de l'exploitation et pour l'estimation de la vulnérabilité relative de divers types d'exploitations au changement climatique mondial.

***Impacts du changement climatique sur l'agriculture au Canada : perspective internationale***

Les travaux résumés dans les sections précédentes portent sur les répercussions du changement climatique mondial à l'échelle subnationale sans jamais placer le secteur agricole canadien dans une perspective internationale. Or, le Canada est un des principaux producteurs et consommateurs de produits agricoles à l'échelle internationale. Par conséquent, tout changement survenant à l'étranger peut avoir des répercussions aussi considérables sur l'agriculture que les changements touchant la production intérieure. Les grands changements dans la productivité du Canada, qu'ils soient positifs ou négatifs, auront forcément des conséquences à l'intérieur comme à l'extérieur des frontières du pays.

Plusieurs scénarios de changement climatique mondial suggèrent une augmentation assez substantielle des températures un peu partout au Canada et des élévations similaires sont prévues pour le nord de l'Europe et l'ex-URSS. Les changements estimés pour les régions tempérées sont en général beaucoup moindres. En revanche, les chercheurs s'entendent beaucoup moins quant aux tendances à long terme des précipitations, mais une tendance à l'assèchement se dessine pour la plupart des régions intérieures des continents situés plus au nord. Dans l'ensemble, toutefois, il est difficile de déterminer si l'évolution des propriétés agroclimatiques va favoriser le Canada par rapport aux autres pays.

Les études de l'évolution de la position relative du Canada comme producteur agricole en fonction du changement climatique ne sont pas probantes. Le blé, qui constitue la principale culture d'exportation du Canada, doit forcément être inclus dans les évaluations de la production et du commerce internationaux de produits agricoles. Malheureusement, les rapports font état de conclusions contradictoires, allant de nouvelles possibilités d'exportation du blé cultivé au Canada au déclin des prix du blé sur les marchés internationaux, ce qui réduirait forcément l'avantage comparatif du Canada sur les marchés céréaliers. Il est difficile d'expliquer ces résultats

divergents. Il y a probablement plusieurs facteurs en cause, dont les différences entre les données initiales et les méthodes analytiques.

La mondialisation des économies agricoles compte pour beaucoup dans la production et le commerce des aliments. La situation actuelle donne à croire que la mondialisation va continuer à court terme de façonner la production agricole à tous les échelons. Manifestement, il faut de toute urgence élaborer des normes et des protocoles de recherche qui facilitent la transmission ordonnée d'informations entre les chercheurs évaluant les répercussions du changement climatique sur les économies agricoles nationales et les personnes qui élaborent les procédures d'évaluation des marchés agricoles internationaux.

## RECOMMANDATIONS

Depuis le début ou le milieu des années 80, les chercheurs s'intéressent beaucoup aux relations entre le changement climatique mondial et l'agriculture au Canada. Toutefois, les travaux :

- concernent plus les impacts du phénomène sur les propriétés agroclimatiques et particulièrement les régimes de température que sur la productivité des cultures;
- portent davantage sur l'Ontario, les Prairies et, dans une moindre mesure, le Québec; par ailleurs la majeure partie des travaux sur l'Ontario n'ont pas été vérifiés à l'aide des nouvelles générations de modèles de productivité des cultures;
- sont très limités en ce qui concerne les conséquences économiques du changement climatique pour l'agriculture;
- sont orientés depuis peu sur l'adaptation des exploitations et de l'agriculture sans pour le moment veiller à l'élaboration d'une méthode généralement acceptée d'évaluation des stratégies d'adaptation.

Étant donné les résultats de l'évaluation de ces travaux, il est recommandé :

1. que l'on s'attache à appuyer les travaux fondés sur un ensemble commun de modèles climatiques et de modèles de productivité des cultures pour toutes les régions du pays afin d'obtenir des résultats plus aisément comparables en ce qui concerne les impacts du changement climatique sur les rendements;
2. que l'on affecte des recherches pour élaborer une évaluation de l'impact économique du changement climatique qui tienne compte de différentes stratégies d'adaptation et permette d'établir des liens entre :
   a) des échelles différentes (exploitation , régionale, nationale), et
   b) différentes opérations et entreprises de culture et d'élevage;
3. que l'on favorise les travaux portant sur les impacts du changement climatique mondial sur l'agriculture canadienne dans le contexte de l'évolution des avantages comparatifs et des marchés mondiaux des produits agricoles. Que soient améliorés les liens entre les spécialistes qui analysent les répercussions du changement climatique sur l'agriculture et

ceux qui se concentrent sur l'économie et les échanges internationaux pour que tous emploient l'information la plus récente et la plus fiable de manière crédible;

4. que soit améliorée la compréhension de l'adaptation des exploitations et de l'agriculture. C'est probablement le champ de recherche le plus important dans les années à venir, puisque la crédibilité des évaluations de l'impact socio-économique du changement climatique sur l'agriculture en dépend, tant à l'échelle régionale ou nationale que dans le contexte du marché international. La recherche sur l'adaptation doit faire découvrir des moyens d'intégrer efficacement aux scénarios de changement climatique les indicateurs agroclimatiques sur lesquels les agriculteurs fondent leurs décisions, par exemple une information plus précise sur la variabilité des changements prévus pour les variables agroclimatiques essentielles et, enfin

5. que le programme national de recherche vise :
   a) à intégrer davantage les dimensions biophysiques et économiques du changement climatique et de l'agriculture canadienne;
   b) à déterminer les causes profondes des degrés différents de vulnérabilité.

Ces travaux devront permettre de déterminer les types d'agriculture et les régions les plus sensibles au changement climatique mondial. Il en résultera une information de base plus cohérente et plus systématique sur laquelle il deviendra possible d'asseoir des politiques et des programmes spécifiques, destinés à atténuer les tensions qui peuvent s'exercer sur les systèmes agricoles les plus vulnérables au changement climatique mondial.

## RÉFÉRENCES

Arthur, L.M. et G.C. van Kooten (1992). Climate change impacts on agribusiness sectors of a Prairie economy, *Prairie Forum*, 17:97-109.

Arthur, L.M. et G.C. van Kooten (1991). " Climate impacts on agribusiness ", dans *Symposium on the Impacts of Climatic Change and Variability on the Great Plains,* G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 143-145.

Arthur, L.M. (1990). Potential adjustments to climate change, *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 38:711-716.

Arthur, L.M. (1988a). " Socio-economic impacts of climatic change on Prairie agriculture: the greenhouse effect ", dans les actes d'un symposium/atelier sur *Impact of Climate Variability and Change on the Canadian Prairies,* tenu du 9-11 septembre 1997 à Edmonton (Alb.), B.L. Magill et F. Geddes (dir.), Alberta Environment, Edmonton (Alb.), p. 187-202.

Arthur, L.M. (1988b). *Les répercussions du changement climatique sur l'agriculture dans les provinces des Prairies,* Sommaire du changement climatique SCC88-01, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsiew (Ont.).

Arthur, L.M. et F. Abizadeh (1988). Potential effects of climate change on agriculture in the Prairie region of Canada, *Western Journal of Agricultural Economics*, 13:216-224.

Bootsma, A. (1997). " A review of impacts of climate variability and change on agriculture in Atlantic Canada ", dans *Climate Change and Climate Variability in Atlantic Canada,* R.W. Shaw (dir.), procès-verbal de l'atelier, 3-6 déc. 1996. Occasional Report No. 9, Environnement Canada, Sackville (N.-B.), p. 79-98.

Bootsma, A. et J. Boisvert (1987). " Climatic variability and change now and in the future, and its impact on soil moisture problems in Atlantic Canada ", dans *Soil Moisture Workshop Technical Session Proceedings,* 16 oct. 1987, Atlantic Committee on Soil and Climate, Fredericton (N.-B.), p. 1-24.

Bootsma, A., W.J. Blackburn, R.B. Stewart, R.W. Muma et J. Dumanski (1984). *Possible effects of climatic change on estimated crop yields in Canada*, Research Branch Technical Bulletin 1984-9E, Agriculture Canada, Ottawa (Ont.), 26 p.

Bornhold, Brian D. (1991). *The Costs and Benefits of Change - the Implications of Global Change for Canadian Agriculture*, National Defence College, Kingston (Ont.), 71 p.

Brklacich, M., P. Curran, D., Brunt et D. McNabb (1997a). " $CO_2$-induced climatic change and agricultural potential in the Mackenzie Basin ", dans *Mackenzie Basin Impact Study Final Report,* S.J. Cohen (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 242-246.

Brklacich, M., D. McNabb, C. Bryant et J. Dumanski (1997b). " Adaptability of agriculture systems to global climate change: a Renfrew County, Ontario, Canada pilot study ", dans *Agricultural Restructuring and Sustainability,* B. Ilbery, Q. Chiotti et T. Rickard (dir.), CAB International, Wallingford (G.-B.), p. 185-200.

Brklacich, M., P. Curran et D. Brunt (1996). The application of agricultural land rating and crop models to $CO_2$ and climate change issues in northern regions: the Mackenzie Basin case study, *Agricultural and Food Science in Finland*, 5:351-364.

Brklacich, M. et R.B. Stewart. (1995). " Impacts of climate change on wheat yields in the Canadian Prairies ", dans *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts,* Special Publication No. 59, American Society of Agronomy, Madison (Wis.), p. 147-162.

Brklacich, M. P. et Curran (1994). " Climate change and agricultural potential in the Mackenzie Basin ", dans *Mackenzie Basin Impact Study: Interim Report #2,* S.J. Cohen (dir.), *Proceedings of the Sixth Bienniel AES/DIAND Meeting on Northern Climate & Mid Study Workshop of the Mackenzie Basin Impact Study held April 10-14, 1994, Yellowknife, NWT,* Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 459-464.

Brklacich, M., R.B. Stewart, V. Kirkwood et R. Muma. (1994). " Effects of global climate change on wheat yields in the Canadian Prairie ", dans *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modelling Study,* C. Rosenzweig et A. Iglesias (dir.), United States Environmental Protection Agency, Washington (D.C.), p. CAN 1-23.

Brklacich, M. et R.B. Stewart (1993). " Wheat yield sensitivities in the Canadian Prairies to climate change ", dans *The Third Symposium on the Impact of Climatic Change on Agricultural Production in the Pacific Rim,* Central Weather Bureau (dir.), p. 65-88.

Brklacich, M., R. de Jong et A. Bootsma, A. (1992). " Estimated impacts of global warming on seeding dates and soil moisture at seeding on the Canadian Prairies ", dans *Soil Moisture: Modelling and Monitoring for Regional Planning,* F.J. Eley, R. Granger et L. Martin (dir.), NHRI Symposium No. 9, Environnement Canada, Saskatoon (Sask.), p. 97-103.

Brklacich, M. et B. Smit (1992). Implications of changes in climatic averages and variability on food production opportunities in Ontario, Canada, *Climatic Change,* 20:1-21.

Brklacich, M. et C. Tarnocai (1991). " Agricultural potential and climate change in the Mackenzie Valley ", *Proceedings of the Fourth Meeting on Northern Climate held on October 17-18, 1990, Yellowknife, Northwest Territories,* dans G. Wall et L. Weber (dir.), Climate Change Program, Environnement Canada, Toronto (Ont.), p. 83-90.

Brklacich, M. (1990). " Climatic warming and potential demands for irrigation water in southwest Ontario ", dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources,* G. Wall et

M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 269-274.

Brklacich, M., B. Smit, C. Bryant et J. Dumanski (1989). Impacts of environmental change on sustainable food production in southwest Ontario, Canada, *Land Degradation and Rehabilitation*, 1:291-303.

Bryant, C.R., P. André, D. Provençal, B. Singh et M. El Maayar (1997). L'adaptation agricole aux changements climatiques: le cas du Québec, *Le Climat*, 14:81-97.

Castonguay, Y. (1990). Atelier sur les prospectives climatiques en agriculture, *Le Climat*, 8 spécial (ACFAS-ACLIQ): 33-36.

Cohen, S.J. (1990). Répercussions du réchauffement prévu du globe au Québec, *Le Climat*, 8 spécial (ACFAS-ACLIQ):6-12.

Couillard, J-Y. (1990). Les impacts économiques d'un éventuel changement climatique sur le secteur agricole, *Le Climat*, 8 spécial (ACFAS-ACLIQ):13-17.

Crosson, P. (1989). Climate change and mid-latitudes agriculture: perspectives on consequences and policy responses, *Climatic Change*, 15:51-73.

Delcourt, G. et G.C. van Kooten (1995). How resilient is grain production to climatic change? Sustainable agriculture in a dryland cropping region of western Canada, *Journal of Sustainable Agriculture*, 5:37-57.

DPA Group Inc. (1989). *Le changement climatique causé par le $CO_2$- en Ontario : interdépendance et stratégies en matière de ressources*, Sommaire du changement climatique SCC88-09, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Easterling, W.E. (1996). Adapting North American agriculture to climate change in review, *Agricultural and Forest Meteorology*, 80:1-54.

El Maayar, M., B. Singh, P. André, C.R. Bryant et J.P. Thouez (1997). The effects of climatic change and $CO_2$ fertilization on agriculture in Québec, *Agricultural and Forest Meteorology*, 85(3-4):193-208.

Goos, T.O. et G. Wall (1994). *Résumé du colloque relatif aux effets du changement climatique sur la gestion des ressources du Nord*, Sommaire du changement climatique SCC94-02, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Goos, T.O. (1989). *Les effets du climat et du changement climatique sur l'économie de l'Alberta*, Sommaire du changement climatique SCC89-05, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Green, C. (1993). The economic impact of global warming on Québec, *Le Climat*, 11 (special):4-18.

Hall, J.A. et R. Burkholder (1993). " The impact of climate change on agriculture ", dans *The Impact of Climate Change on Water in the Grand River Basin, Ontario*, M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 69-91.

Hare, F.K. " Future climate and the Canadian economy ", dans *Climate Change in Canada 3*, C.R. Harington (dir.), Musée national des sciences naturelles, Ottawa (Ont.), p. 15-49.

Kane, S.M., J. Reilly et J. Tobey (1992a). An empirical study of the economic effects of climate change on world agriculture, *Climatic Change*, 21:17-35.

Kane, S.M., J.M. Reilly et J. Tobey (1992b). " A sensitivity analysis of the implications of climate change for world agriculture ", dans *Economic Issues in Global Climate Change*, J.M. Reilly et M. Anderson (dir.), Westview Press, Boulder (Col.), p. 117-131.

Kane, S., J. Reilly et J. Tobey (1991). *Climate Change: Economic Implications for World Agriculture*, Agricultural Economic Report No. 647, United States Department of Agriculture, Washington (D.C.), 21 p.

Kiniry, J.R., D.J. Major, R.C. Izaurralde, J.R. Williams, P.W. Gassman, M. Morrrison, R. Bergentine et R.P. Zentner (1995). EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the northern Great Plains region, *Revue canadienne de phytotechnie*, 75:679-688.

Land Evaluation Group (LEG) (1987). *Implications of climatic warming for Canada's comparative position : in agricultural production and trade*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 59 p.

Land Evaluation Group (LEG) (1986). *Implications of climatic change and variability for Ontario's agri-food sector*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 110 p.

Land Evaluation Group (LEG) (1985). *Socio-economic assessment of the implications of climatic change for food production in Ontario*, Service de l'environnement atmposhérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 114 p.

Lilley, J. et C. Webb (1990). *Climate warming? Exploring the answers*, Environment Council of Alberta, Edmonton (Alb.), 73 p.

Maybank, J., B. Bonsal, K. Jones, R. Lawford, E.G. O'Brien, E.A. Ripley et E.E. Wheaton (1995). Drought as a natural disaster, *Atmosphere-Ocean*, 33:195-222.

McGinn, S.M. et W.O. Akinremi. (1995). " How climate may alter Prairie farms in the next century ", dans *Weekly Letter*, Agriculture and Agri-Food Canada, Lethbridge Research Centre, Lethbridge (Alb.), 1 p.

McGinn, S.M., O.O. Akinremi et A.G. Barr. (1995). *Response of drought and agroclimatic indices to a regional change in climate*, Agriculture and Agri-Food Canada, Lethbridge Research Centre, Lethbridge (Alb.), 87 p.

Mills, P.F. (1994). The agricultural potential of northwestern Canada and Alaska and the impact of climatic change, *Arctic*, 47:115-123.

Mills, P.F. (1992). " The potential soil resources of northwestern Canada and the United States and the impact of climatic change ", dans *Proceedings of the 1st Circumpolar Agricultural Conference held September 1992*, C.A. Scott Smith (dir.), Bureau des mappes du Canada, Bureau des affaires du Nord, Whitehorse (Yu), p. 195-204.

Mooney, S. et L.M. Arthur (1990). The impacts of climate change on agriculture in Manitoba, *Revue canadienne d'économie rurale*, 38:685-694.

Ontario Round Table on Environment and Economy (1992). *Sectoral task force report: agriculture and food*, Queen's Printer for Ontario, Toronto (Ont.), 40 p.

Parker, N. et C. Cowan (1993). " Impacts on the Yukon and the Mackenzie Valley ", dans *Impacts of Climate Change on Resource Management in the North*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 16, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 153-166.

Parry, M.L. et T.R. Carter (1989). An assessment of the effects of climatic change on agriculture, *Climatic Change*, 15:95-116.

Parry, M.L. (1985). " The impact of climatic variations on agricultural margins ", dans *Climate Impact Assessment: Scope 27*, R.W. Kates, J.H. Ausubel et M. Berberian (dir.), John Wiley and Sons, Chicester, p. 351-367.

Roots, F. (1993). " Climate change - Its possible impact on the environment and the people of northern regions ", dans *Impacts of Climate Change on Resource Management in the North*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 16, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 127-151.

Rosenzweig, C. et M.L. Parry (1994). Potential impact of climate change on world food supply, *Nature*, 367:133-138.

Rosenzweig, C., M.L. Parry, G. Fischer et K. Frohberg (1993). *Climate Change and World Food Supply*, Research Report No. 3, Environmental Change Unit, Université d'Oxford, Oxford (G.-B.), 28 p.

Savdie, I., R. Whitewood, R.L. Raddatz et D.B. Fowler (1991). Potential for winter wheat production in western Canada: a CERES model winterkill risk assessment, *Revue canadienne de phytotechnie,* 71:21-30.

Savdie, I. (1989). *Climate change and winter wheat yield in Ontario*, Sommaire du changement climatique SCC89-4, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Schweger, C. et C. Hooey (1991). " Climate change and the future of Prairie agriculture ", dans *Alternative Futures for Prairie Agricultural Communities,* J. Martin (dir.), Faculty of Extension, Université de l'Alberta, Edmonton (Alb.), p. 1-37.

Singh, B., M. El Mayaar, P. André, C.R. Bryant et J.P.Thouez (1998). Impacts of a GHG-induced climate change on crop yields: effects of acceleration in maturation, moisture stress and temperature, *Climatic Change*, 38(1):51-86 .

Singh, B., M. El Maayar, P. André, J.P. Thouez, C-R. Bryant et D.Provençal (1996). Influence d'un changement climatique dû à une hausse de gaz à effet de serre sur l'agriculture au Québec, *Atmosphere-Ocean*, 34:379-399.

Singh, B. et R.B. Stewart (1991). Potential impacts of a $CO_2$-induced climate change using the GISS scenario on agriculture in Québec, Canada, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 35:327-347.

Singh, B., L. Gregoire, D. Skiadas, G. Renaud, A. Viau et R. Morasse (1987). *Prospectives d'un changement climatique dû à un doublement de $CO_2$ atmosphérique pour les resources naturelles du Québec*, rapport spécial, Environnement Canada, Québec (Qué.), 291 p.

Smit, B., D. McNabb et J. Smithers (1996). Agricultural adaptation to climatic variation, *Climatic Change*, 33:7-29.

Smit, B. (1994). " Climate, compensation and agriculture ", dans *Proceedings of a Workshop on Improving Responses to Atmospheric Extremes, The Role of Insurance and Compensation, held October 3-4, 1994, Toronto, Ontario*, J. McCulloch et D. Etkin (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 29-37.

Smit, B. (dir.) (1993). *Adaptation to climatic variability and change: report of the Task Force on Climate Adaptation*, Direction de l'adaptation climatique, Bulletin 93-04, Programme climatologique canadien, Downsview (Ont.), 53 p.

Smit, B. et M. Brklacich (1992). Implications of global warming for agriculture in Ontario, *Le Géographe canadien*, 36:75-78.

Smit, B. (1989). *Le réchauffement climatique et la position relative du Canada en agriculture*, Sommaire du changement climatique SCC89-01, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Smit, B., M. Brklacich, R.B. Stewart, R. McBride, M. Brown et D. Bond (1989). Sensitivity of crop yields and land resource potential to climatic change in Ontario, *Climatic Change*, 14:153-174.

Smit, B., L. Ludlow et M. Brklacich (1988). Implications of a global climatic warming for agriculture: a review and appraisal, *Journal of Environmental Quality*, 17:519-527.

Smit, B. (1987). *Les répercussions du changement climatique sur l'agriculture en Ontario*, Sommaire du changement climatique SCC87-02, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Stewart, R.B. (1991). " Climatic change and agricultural production in the Canadian Prairies ", *Symposium on the Impacts of Climatic Change and Variability on the Great Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 131-138.

Stewart, R.B. (1990). " Possible effects of climatic change on estimated crop yields in Canada: a review ", dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 275-284.

Stewart, R.B. et R. Muma (1990). " Climatic change: some implications for agriculture in the Atlantic region ", dans R.J. Gordon (dir.), *Preprints of Workshop on the Application of Climate and Weather Information to the Farm*, Nova Scotia Agricultural College, Truro (N.-É.), p. 136-161.

Stewart, R.B. (1989). *Climatic change: Some implications for Prairie agriculture in Canada*, Agriculture Canada, Ottawa (Ont.), 20 p.

Stewart, R.B., K.H. Jones et E.E. Wheaton (1988a). " Estimating effects of climatic variability and change on Prairie agriculture in Canada ", dans *Proceedings of the Symposium and Workshop on the Impact of Climate Variability and Change on the Canadian Prairies, held September 9-11, 1987, Edmonton, Alberta*, B.L. Magill et F. Geddes (dir.), Alberta Environment, Edmonton (Alb.), p. 129-144.

Stewart, R.B., K.H. Jones, E.E. Wheaton et G.D.V. Williams (1988b). *L'évaluation des effets du changement climatique sur l'agriculture en Saskatchewan au Canada*, Sommaire du changement climatique SCC88-06, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Timmerman, P. et A.P. Grima (1988). *Les perspectives économiques liées aux répercussions de la variabilité et du changement climatique : rapport sommaire*, Sommaire du changement climatique SCC88-04, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada Downsview (Ont.).

Toure, A., D.J. Major et C.W. Lindwall (1995). Sensitivity of four wheat simulation models to climate change, *Revue canadienne de phytotechnie*, 75:69-74.

Toure, A., D.J. Major et C.W. Lindwall, C.W. (1994). Comparison of five wheat simulation models in southern Alberta, *Revue canadienne de phytotechnie*, 75:61-68.

Tubiello, F.N., C. Rosenzweig et T. Volk (1995). Interactions of $CO_2$, temperature and management practices: simulations with a modified version of CERES-wheat, *Agricultural Systems*, 49:135-152.

Tyrchniewicz, E.W. (1986). " The interaction of domestic and foreign agricultural policy: a Canadian view ", dans *The Future of the North American Granary: Politics, Economics and Resource Constraints in North American Agriculture*, C.F. Runge (dir.), Iowa State University Press, Ames (Iowa), p. 28-36.

Viau, A.A. et C.M. Mitic (1992). Potential impacts of $CO_2$-induced climate change using the GISS, GFDL and CCC scenarios on corn yields in the Essex County region of Ontario, Canada, *Climatological Bulletin*, 26:79-105.

Wheaton, E.E. (1994). *Impacts of a variable and changing climate on the Canadian Prairie provinces: a preliminary integration and annotated bibliography*, Publication No. E-2900-7-E-93, Saskatchewan Research Council, Saskatoon (Sask.), 140 p.

Wheaton, E.E., V. Wittrock, G.D.V. Williams, G.C. van Kooten, S.R. Shewchuk et T.P. Hanley (1992). *Saskatchewan in a warmer world: Preparing for the future - Executive summary*, Publication No. E-2900-19-E-92, Saskatchewan Research Council, Saskatoon (Sask.), 13 p.

Williams, G.D.V., R.A. Fautley, K.H. Jones, R.B. Stewart et E.E. Wheaton (1988). " Estimating effects of climatic change on agriculture in Saskatchewan, Canada ", dans *The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Volume 1: Assessments in Cool Temperate and Cold Regions*, M.L. Parry, T.R. Carter et NT. Konijn (dir.), Kluwer, Dordrecht (Pays-Bas), p. 222-375.

Williams, G.D.V. (1985). Estimated bioresource sensitivity to climatic change in Alberta, Canada, *Climatic Change*, 7:55-69.

## ANNEXE 4A : GLOSSAIRE

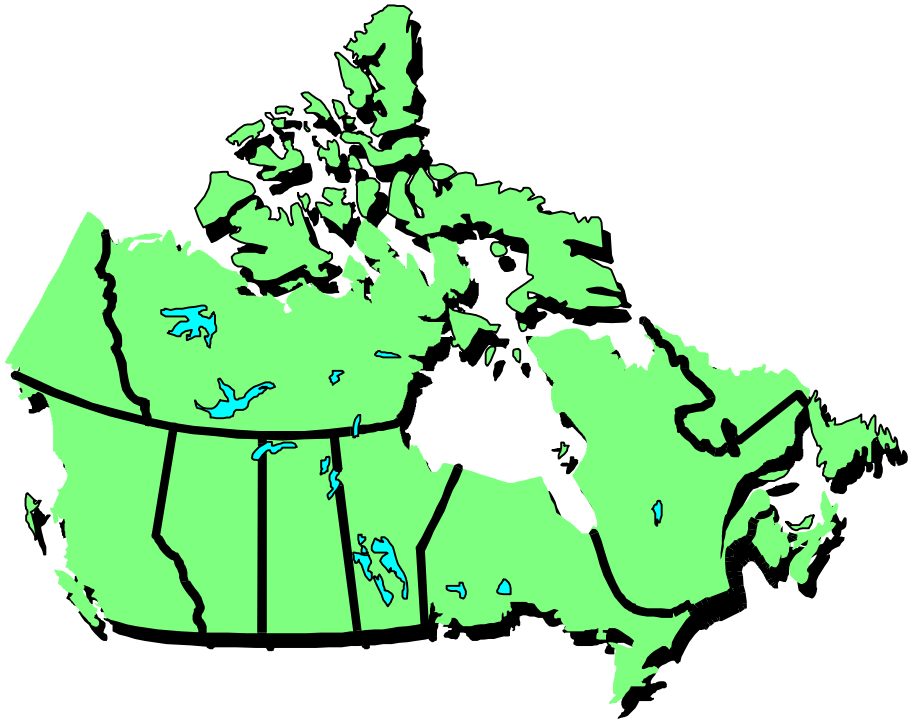
SEA = Service de l'environnement atmosphérique
CanSIS = Système d'information sur le sol du Canada
CCC = Centre climatologique canadien
SCC = système de classification climatique
UTM = unités thermiques du maïs
TH = tension hydrique
CV = cultivar
E = est
est. = estimation
FAO = sigle de Food and Agriculture Organization/Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
SSG = saison sans gel
MCG = modèle de circulation générale
DJ = degrés-jours (plus de 5 $^{o}$C)
GFDL = sigle de *Geophysical Fluids Dynamics Laboratory*
GISS = sigle de *Goddard Institute for Space Studies*
ha = hectares
h = heures
E-S = entrées-sorties
DH = déficit hydrique
min. = minimum
mm = millimètres
N = nord
OSU = sigle de *Oregon State University*
PRÉC. = précipitations
ETP = évapotranspiration potentielle
Potprod = potentiel productif
S = sud
std = standard
T = température
UKMO = sigle de *United Kingdom Meteorological Office*
Var. = variabilité
MABHS = modèle adaptatif du bilan hydrique des sols
O = ouest
av. = avec
↑ = augmentation
↓ = diminution

# CHAPITRE CINQ

# ÉTUDE PAN-CANADIENNE SUR LA VARIABILITÉ ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUES -

# SECTEUR DES PÊCHES

*Brian J. Shuter[1,3], Charles K. Minns[2], Henry A. Regier[3] et James D. Reist[4]*



1. Section de la science des écosystèmes aquatiques, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, troisième étage nord, 300, rue Water, Peterborough (Ontario) K9J 8M5; téléphone : (905) 832-7139, télécopieur : (905) 832-7149; courriel : shuter@zoo.utoronto.ca
2. Pêches et Océans Canada, Laboratoire des Grands Lacs pour les pêches et les sciences aquatiques, C.P. 5050, 867 Lakeshore Road, Burlington (Ontario) L7R 4A6
3. Aquatic Ecology Group, Université de Toronto, Département de Zoologie, Université de Toronto, Toronto (Ontario) M5S 3G5
4. Pêches et Océans Canada, Région du Centre et de l'Arctique, 501, University Crescent, Winnipeg (Manitoba) R3T 2N6

## SOMMAIRE

### *Caractéristiques des secteurs*

Les écosystèmes aquatiques canadiens où l'on trouve des poissons et où l'on pratique la pêche occupent une superficie de 5,38 millions de $km^2$, ce qui équivaut à 58 % de la superficie des terres fermes du pays. Les pêches sont une source importante de nourriture, de loisirs et d'emplois. On distingue trois catégories : la pêche commerciale, la pêche récréative et la pêche de subsistance. En 1994, les prises commerciales totales, surtout en provenance des océans, se sont chiffrées à 1 070 kilotonnes (kt); leur valeur au débarquement s'élevait à 1,78 milliard de dollars. Maintenant, l'aquaculture représente un secteur en développement rapide qui fait concurrence à la pêche commerciale. En 1994, la production a atteint 54 kt de poissons, principalement du saumon, d'une valeur de 300 millions de dollars. La pêche récréative, pratiquée par un Canadien sur cinq, se fait surtout en eau douce; elle a permis de récolter 70 kt en 1990 et suscité des dépenses et des investissements de 5,9 milliards de dollars. La pêche de subsistance est pratiquée dans tout le pays, mais elle est particulièrement importante dans le nord. Au milieu des années 80, environ 300 000 pêcheurs la pratiquaient pour subsister; leur consommation se chiffrait à 15 kt. Les chiffres représentant les captures et leur valeur en dollars reflètent uniquement les aspects évidents de la valeur de l'activité de pêche pour ceux qui la pratiquent. Dans de nombreuses parties du Canada, les structures sociales sont fondées sur la pêche, qui est la principale activité de la population adulte. La " valeur " de ces modes de vie pour les gens qui en sont adeptes ne peut être quantifiée efficacement. De même, l'incidence des activités de pêche sur les écosystèmes naturels sur lesquels elles sont fondées est difficile à quantifier, mais des recherches sont en cours pour trouver des méthodes scientifiques qui permettront de le faire.

### *Répercussions du changement climatique sur les poissons et les pêches*

Les poissons sont des poïkilothermes - c'est-à-dire des animaux dont la température corporelle est essentiellement égale à celle de l'eau dans laquelle ils vivent. Les activités quotidiennes qui maintiennent la vie des individus (p. ex., s'alimenter, éviter les prédateurs, entretenir son corps et croître) et les activités saisonnières qui assurent la survie des populations (p. ex., le développement des gonades, la reproduction, les soins parentaux) subissent toutes fortement l'effet des caractéristiques annuelles de la température de l'eau où vivent les poissons. Chez les poissons, les zones de tolérance thermiques nécessaires à la survie, à la croissance et à la reproduction sont des caractéristiques particulières aux espèces. Chaque espèce a une température préférée caractéristique : la température à laquelle les individus choisiront de vivre, lorsqu'ils en ont la possibilité. Les taux de survie et de croissance sont maximum aux températures situées près de la température préférée et diminuent à mesure qu'elles s'en éloignent. Les températures préférées varient entre des valeurs bien inférieures à 10 °C et supérieures à 25 °C. Étant donné l'importance que joue la température dans la détermination des activités vitales des poissons, les populations sauvages de poissons devraient réagir fortement aux variations climatiques naturelles qui induisent des changements systématiques des températures de l'eau. Ces réactions ont été documentées chez de nombreuses populations d'eau douce et d'eau salée. Elles se classent dans deux grandes catégories :

1. Changements dans la production de poissons d'un lieu particulier :

   - changements dans la productivité globale de communautés entières de poissons;
   - changements dans la productivité relative de populations particulières au sein d'une communauté.

2. Changements dans la distribution spatiale des poissons :

   - changements dans les centres et les limites zoogéographiques d'espèces particulières ou groupes d'espèces définis selon de grandes échelles géographiques;
   - changements dans la distribution locale de membres d'une population particulière, définis selon de petites échelles géographiques.

Ces catégories illustrent la majorité des impacts prévus du changement climatique dû à l'accumulation de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère sur les populations de poissons. Ces impacts auront deux effets principaux sur les pêches :

Le niveau global durable de la récolte de poissons s'élèvera et s'abaissera selon les changements dans la productivité aquatique. Le niveau durable de la récolte dans une population particulière en un lieu donné pourra s'accroître substantiellement ou tomber à zéro selon la façon dont les nouvelles conditions climatiques et les caractéristiques thermiques particulières à l'espèce interagissent et déterminent la part de la production de chaque population qui peut être prélevée.

Si l'on considère l'hypothèse selon laquelle l'accumulation de GES entraînera un climat plus chaud et plus sec dans la plupart des régions du Canada, ses répercussions possibles sur les pêches régionales comprennent :

*Pêches marines du Pacifique* ***:*** Récoltes durables plus faibles et plus variables en ce qui concerne les populations de saumons du sud; récoltes durables plus abondantes et plus uniformes pour ce qui est des populations de saumons du nord - le saumon rouge étant le plus touché.

*Pêches marines de l'Atlantique :* Diminution de la récolte durable globale dans les populations côtières et estuariennes due à la réduction des apports d'eau douce et à la chute résultante de la productivité des écosystèmes; changements étendus touchant la récolte durable, les emplacements des lieux de pêche et l'efficacité des engins de pêche pour de nombreuses populations en raison de bouleversements complexes et probablement imprévisibles des systèmes de courants océaniques qui sculptent les habitats marins extracôtiers.

*Pêches marines de l'Arctique* ***:*** Augmentation de la récolte durable pour la plupart des populations de poissons en raison de l'accroissement de la productivité des écosystèmes, car la réduction de la couverture glacielle permettra un recyclage accru des éléments nutritifs; répercussions négatives sur certaines populations de phoques et d'ours blancs qui sont adaptés aux variations saisonnières et géographiques actuelles de la couverture glacielle.

*Pêches dans les eaux douces du sud :* Chute de la récolte durable en ce qui concerne de nombreuses populations en raison des niveaux d'eau à la baisse dans les lacs, des débits décroissants des rivières et d'un apport et d'un recyclage réduits des nutriments dans de nombreux lacs et cours d'eau du Bouclier canadien; diminution de la proportion de la récolte durable globale fournie par les poissons d'eaux froides et augmentation réciproque de la proportion de la récolte provenant des espèces d'eau fraîche et tempérée.

*Pêches dans les eaux douces du nord :* Augmentation des récoltes durables pour la plupart des espèces de poissons en raison de saisons de croissance plus longues et plus chaudes et de changements relativement faibles des niveaux d'eau; accroissement possible de la diversité des espèces de poissons qui peuvent faire l'objet d'une récolte durable étant donné l'accroissement de la diversité des habitats thermiques capables d'accueillir de nouvelles espèces, lesquelles étendront leur territoire à partir du sud; resserrement possible du territoire des espèces adaptées à l'Arctique (p. ex., l'omble chevalier).

Dans tous ces systèmes, les facteurs climatiques primaires que sont la lumière solaire, la pluie et le vent interagissent avec les courants pour définir des habitats dynamiques à la fois dans le temps et dans l'espace. Les caractéristiques et l'emplacement de ces habitats définissent les niveaux durables de récolte et les endroits où cette récolte peut être prélevée le plus efficacement. De nos jours, les variations dans l'habitat suscitées par le climat peuvent se produire selon différentes échelles de temps allant de l'année au millénaire. Les changements d'un état à l'autre peuvent être rapides, et la persistance des nouveaux états prolongée. Dans la plupart des méthodes d'estimation de la récolte durable, on ne considère pas de façon singulière ce régime de variation. Actuellement, la science n'est pas capable de prédire l'impact du réchauffement climatique sur ces régimes de variation. Toutefois, cet impact aura une grande importance pour les pêches touchées.

### *Options d'adaptation*

Les options d'adaptation possibles d'une pêche au changement climatique ne sont pas uniques. De nomreuses approches ont été proposées, dont certaines ont été mises en oeuvre en réaction à d'autres types de changement environnemental. Toutes ont leurs propres limites. Les concepts actuels d'adaptation du secteur au changement climatique supposent des changements ordonnés, bien qu'une plus grande imprévisibilité semble plus probable pour les pêches. Lorsqu'on évalue les options d'adaptation applicables à une pêche particulière, il faudrait tenir spécialement compte du genre et des niveaux globaux d'utilisation durable qui sont prévus pour l'écosystème particulier touché. L'échelle de l'évaluation sur les plans humain et spatial influe sur l'envergure des pertes et des gains nets. À petite échelle, il y a des gagnants et des perdants; à plus grande échelle, la mise en commun et l'établissement de moyennes dissimulent les inégalités. Dans l'élaboration de stratégies d'adaptation, il serait bon d'insister sur :

- la réduction au minimum des répercussions négatives au niveau local;
- les régimes de gestion robustes qui dépendent moins de la prédiction à court terme des stocks de poissons;
- une stratégie " sans regrets " axée sur l'écosystème, dans laquelle toutes les agressions sont réduites.

***Lacunes de la recherche***

Au lieu d'insister sur la prévision du climat, il faudra mettre l'accent sur l'évaluation des réactions des écosystèmes et de leurs conséquences possibles. Dans le secteur des pêches, plusieurs domaines de recherche ne reçoivent pas suffisamment d'attention ou sont en déclin à cause des efforts généralisés de réduction des effectifs. Trois types de projets de recherche sont requis.

**Projets d'acquisition de connaissances :**

*Programmes de surveillance (pour éviter les surprises) :* Établir ou maintenir des programmes à long terme visant à surveiller les réactions biologiques et les indicateurs écologiques du climat dans les écosystèmes aquatiques représentatifs où les pêches sont importantes. Les résultats documenteront les réactions aux variations climatiques en cours et aideront ainsi à définir les réactions probables aux futurs changements climatiques.

*Études comparatives* ***:*** Entreprendre des études sur les écosystèmes et les populations qui traversent des gradients de latitude et d'altitude. Les résultats aideront à définir les réactions probables de ces systèmes au changement climatique.

*Distributions spatiales des populations et des espèces* ***:*** Entreprendre des études conçues pour déterminer les facteurs qui établissent les limites de la distribution zoogéographique actuelle d'espèces aquatiques d'importance économique. Les résultats de ces études accroîtront les efforts visant à prévoir les impacts du changement climatique sur les invasions et les disparitions d'espèces.

*Salmonidés* ***:*** Les stocks de salmonidés des eaux salées et des eaux douces sont très prisés et particulièrement vulnérables au changement climatique. L'accroissement des connaissances de leur cycle biologique et une surveillance internationale concertée sont nécessaires pour mettre au point des prévisions fiables des impacts.

*Effets interactifs d'autres agressions environnementales* ***:*** Le changement climatique aggravera de nombreuses agressions existantes touchant les écosystèmes. Il faudra une meilleure compréhension de ces interactions si l'on veut maintenir des écosystèmes sains.

*Conception d'écosystèmes et espèces exotiques* ***:*** Dans les régions pauvres en espèces, il faudra améliorer les lignes directrices applicables aux nouvelles possibilités de création et d'amélioration des pêches afin d'éviter les erreurs passées. On a actuellement besoin de nouvelles lois et de nouveaux règlements pour mettre un frein aux invasions d'espèces exotiques indésirables.

**Projets liés aux écosystèmes** :

*Milieu marin* ***:*** Accroître la compréhension des variations actuelles de faible fréquence et de grande amplitude dans la production marine et du rôle du climat dans la production de ces fluctuations.

*Milieu d'eau douce :* Dans les lacs, accroître la compréhension du rôle relatif des nutriments, de la lumière et des régimes thermiques et de mélange dans la détermination de la production de poissons. Dans les cours d'eau, procéder à des évaluations plus approfondies de la production totale de poissons et des facteurs qui la déterminent.

*Milieu arctique :* La connaissance de base des cycles vitaux et des niveaux de production des biotes marins et d'eau douce est insuffisante en ce qui concerne les régions où l'on prévoit des changements climatiques relativement importants.

*Milieu estuarien :* La baisse des apports fluviatiles et l'élévation du niveau des océans agiront en synergie pour déplacer les limites entre l'eau salée et l'eau douce vers l'intérieur des terres. Par conséquent, les estuaires pourraient constituer les indicateurs les plus sensibles de la réaction des écosystèmes au changement climatique; il faudrait concevoir des programmes de surveillance pour en tirer avantage.

**Projets institutionnels** :

*Nouvelles pratiques de gestion :* Nous avons besoin de systèmes de réglementation nouveaux et plus robustes pour faire face aux variations tant dans la dynamique des populations de poissons exploitées que dans la réaction de ces populations à l'exploitation et à d'autres agressions anthropiques. Ces systèmes devraient dépendre moins de l'exactitude des prévisions à court terme.

*Établissement de la valeur des pêches :* Nous avons besoin de meilleures mesures et évaluations de la pêche de subsistance et de la pêche pratiquée par les Autochtones, ainsi que de systèmes d'évaluation comparables entre eux pour toutes les pêches.

*Limites supérieures pour des pêches durables :* Il nous faut des estimations des capacités des écosystèmes et des pêches pour placer les niveaux de récolte actuels ou attendus dans un contexte plus vaste d'utilisation durable.

## INTRODUCTION

Les poissons sont importants pour les Canadiens, du fait qu'ils constituent une source d'aliments et de loisirs, du fait connexe qu'ils comportent des avantages pour l'économie et l'emploi, et du fait qu'ils représentent un symbole de la santé de nos écosystèmes aquatiques. Selon nous, et selon d'autres personnes, les poissons et les eaux qu'ils habitent sont un élément central du Canada. La pêche fait partie des industries sur lesquelles le Canada a été fondé, au même titre que la foresterie, l'agriculture, l'extraction minière et la fabrication. Au fur et à mesure de la croissance du Canada, l'impact économique relatif des pêches s'est affaibli, mais leur importance pour les Canadiens n'a pas diminué.

Avec une superficie de terre ferme de 9,22 millions de $km^2$, le Canada compte parmi les pays les plus étendus du monde. Les écosystèmes aquatiques canadiens où l'on trouve des poissons et où l'on pratique la pêche couvrent une superficie de 5,38 millions de $km^2$, ce qui correspond à 58 %

du territoire continental du pays. Les zones aquatiques comprennent les parties de trois océans qui se trouvent dans une bande de 200 milles le long des côtes canadiennes (zone économique exclusive du Canada - ZEE) ainsi que les nombreux lacs répartis dans tout le pays (figure 5.1). Un changement climatique important entraînera inévitablement des modifications substantielles à ces vastes écosystèmes aquatiques et aux pêches dont dépendent de nombreux Canadiens pour leur nourriture et leur subsistance. Dans le cadre du présent examen, nous portons notre attention sur les réactions probables de ces écosystèmes aux changements climatiques attendus par suite de l'accumulation des gaz à effet de serre (p. ex., le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux, les divers fluorocarbures) dans l'atmosphère. Afin de simplifier les choses, nous nommerons ce phénomène le réchauffement climatique lié au $CO_2$.

Les poissons sont des poïkilothermes - c'est-à-dire des animaux dont la température corporelle est essentiellement égale à celle de l'eau dans laquelle ils vivent. Les activités quotidiennes qui maintiennent la vie des individus (p. ex., s'alimenter, éviter les prédateurs, entretenir son corps et croître) et les activités saisonnières qui assurent la survie des populations (p. ex., le développement des gonades, la reproduction, les soins parentaux) subissent toutes fortement l'effet des variations annuelles de la température de l'eau où vivent les poissons. Habituellement, chaque espèce a une température préférée caractéristique - la température à laquelle les individus choisissent de vivre lorsqu'ils en ont la possibilité. Les taux de métabolisme actif et de croissance augmentent lentement à mesure que la température s'élève et s'approche de la température préférée et ils chutent rapidement une fois que cette température est dépassée. Les zones de tolérance à la température des divers processus vitaux sont également caractéristiques de chaque espèce. Toutes ces zones comprennent la température préférée, mais elles varient grandement en étendue, les zones applicables aux processus complexes (p. ex., ceux associés à la croissance et à la reproduction des individus) étant généralement plus étroites que les zones applicables aux processus plus simples (p. ex., ceux associés aux activités fondamentales de survie) (Regier *et al.*, 1996; MacDonald et Wood, 1997).

Étant donné l'importance de la température pour la détermination des activités vitales de chaque poisson, leurs populations devraient réagir fortement aux variations naturelles du climat qui induisent des changements systématiques des températures de l'eau. Ces réactions aux changements de température et à d'autres changements environnementaux (p. ex., les variations du niveau de la mer, les modifications des régimes des courants océaniques et des remontées d'eau) ont été documentées pour de nombreuses populations d'eau douce et marines (Shuter et Meisner, 1992; Beamish, 1995). Elles se divisent en deux grandes catégories :

A) Les changements dans la production de poissons d'un lieu particulier :
   i) les changements dans la productivité globale de communautés entières de poissons;
   ii) les changements dans la productivité relative de populations particulières au sein d'une communauté.

B) Les changements dans la distribution spatiale des poissons :
   i) les changements dans les centres et les limites zoogéographiques d'espèces particulières ou groupes d'espèces définis selon de grandes échelles géographiques;
   ii) les changements dans la distribution locale de membres d'une population particulière définis selon de petites échelles géographiques.

La plupart des prévisions des effets biologiques du changement climatique lié au $CO_2$ sur les populations de poissons appartiennent à ces deux catégories; nous nous en servirons pour structurer notre examen de la littérature y ayant trait.

Les changements biologiques exerceront probablement plusieurs effets sur les pêches (tableau 5.1) dont l'action fonctionnera de deux façons :

1. la récolte durable globale de poissons augmentera et diminuera en fonction des variations dans la productivité aquatique globale;

2. les récoltes durables tirées d'une population particulière provenant d'un lieu particulier pourront augmenter substantiellement ou être réduites à zéro selon la façon dont les nouvelles conditions climatiques et les caractéristiques thermiques particulières à l'espèce interagiront et détermineront quelle sera la part de la production à laquelle cette population aura accès.

**Tableau 5.1 Répercussions probables sur les pêches des changements dans l'écologie des poissons dus au climat**

| Changement dans l'écologie des poissons | Répercussion sur les pêches |
|---|---|
| a) Changement touchant la production globale de poissons dans des écosystèmes aquatiques particuliers | a) Changement dans la récolte durable de toutes les populations de poissons |
| b) Changement dans la productivité relative de populations particulières de poissons dans des écosystèmes aquatiques particuliers | b) Changement dans les niveaux d'exploitation relatifs qui peuvent être maintenus à l'égard des populations de poissons des écosystèmes touchés |
| c) Déplacements à grande échelle de la distribution géographique des espèces | c) Changement dans le mélange d'espèces qui peuvent être récoltées de façon durable à l'intérieur de zones géographiques particulières; déplacement des lieux de pêche rentables |
| d) Déplacements à petite échelle de la distribution spatiale des membres de populations particulières | d) Changement dans la récolte durable au sein des populations touchées; changement dans l'efficacité des engins de pêche entraînant des modifications des efforts de pêches soutenables applicables aux populations touchées; déplacement des lieux de pêches rentables |

Étant donné ces impacts, pour que les humains s'adaptent efficacement aux effets du changement climatique sur les pêches, il faudra réaffecter la récolte prélevée dans les populations qui subissent des effets négatifs à celles qui subissent des effets bénéfiques. Cependant, des forces d'inertie importantes qui touchent à la fois les systèmes écologiques et les systèmes de récolte compliquent ce tableau simple. Dans les systèmes écologiques, les variations simultanées de la production de base et des conditions thermiques causeront une restructuration importante de la communauté de poissons. Cette période de restructuration pourra être prolongée et sera caractérisée par une grande incertitude dans les niveaux de récolte durable que l'on pourra attribuer à l'un quelconque des membres de la communauté. Quel que soit le système de récolte, les préférences des consommateurs pour certaines espèces sont difficiles à modifier, et elles auront tendance à prolonger l'exploitation de populations qui devraient être protégées. Le risque associé à ces retards internes est que l'on continuera d'appliquer des niveaux d'exploitation non durables à des populations affectées, ce qui finira par faire effondrer à la fois la population et la pêche. Ces risques augmenteront à mesure que le changement climatique s'accélérera.

Dans le cas de nombreux systèmes marins et d'eau douce, les connaissances écologiques actuelles sont suffisantes pour permettre de classer grossièrement les pêches selon la probabilité qu'elles subissent des effets positifs ou négatifs dus à des changements climatiques particuliers. Il reste à mettre au point des outils qui viseront à produire des évaluations plus quantitatives des répercussions et à concevoir de meilleurs régimes de gestion.

## CARACTÉRISTIQUES PAR SECTEUR

Fournissons d'abord quelques données économiques sur la taille et l'importance relatives des divers types de pêche pour la vie sociale canadienne. Ces comparaisons sont difficiles à interpréter parce que chaque type de pêche est évalué différemment (Anderson, 1994). Par exemple, l'évaluation des pêches commerciales est fondée sur les captures au débarquement, tandis que celle des pêches récréatives est fondée sur les dépenses des pêcheurs sportifs par jour de pêche. Bien qu'ils soient intéressants, ces simples chiffres en dollars ne peuvent que refléter les aspects les plus évidents de la valeur des activités de pêche pour les gens qui s'y adonnent. Dans de nombreuses parties du pays, l'ensemble des structures sociales sont fondées sur l'activité de pêche, qui représente la principale activité de la population adulte; le but poursuivi peut comprendre l'acquisition de nourriture ou d'un revenu, ainsi que les loisirs. Il est difficile de bien quantifier la " valeur " des ces modes de vie pour les gens qui les adoptent.

De même, ces chiffres en dollars n'ont que peu à voir avec la valeur économique correspondant aux " services fournis par les écosystèmes " (Costanza *et al.*, 1997) aquatiques et par leurs ressources renouvelables exploitables ou avec la taille de " l'empreinte écologique " (Wackernagel et Rees, 1996; Pauly et Christensen, 1995), que des activités de prélèvement comme la pêche laissent sur les écosystèmes. Nous terminons cette partie en traitant brièvement de ces questions.

### *Perspective mondiale*

La FAO a récemment signalé (FAO, 1997) que la récolte mondiale de poissons, y compris l'aquaculture, a atteint 109,6 millions de tonnes (Mt) en 1994, une hausse de 7,6 Mt par rapport à 1993. De ce total, 34,7 Mt ont été utilisées à des fins non alimentaires, notamment pour en faire de la farine de poisson et de l'huile. Les hausses connues par l'exploitation marine et l'aquaculture en eau douce ont contribué respectivement pour 4,9 Mt et 1,7 Mt à l'augmentation totale survenue de 1993 à 1994. La majorité des pêches d'envergure, y compris celles du Canada, font l'objet d'une exploitation à des taux égaux ou supérieurs aux niveaux durables (FAO, 1992; Brown et Kane, 1994). La récolte mondiale de poissons semble se situer aux niveaux durables (ou au-delà), l'aquaculture devant remplacer dans l'avenir la récolte prélevée dans les populations sauvages plutôt que l'augmenter (*idem*). Ce processus de remplacement sera probablement autolimitatif, parce que la farine de poisson elle-même constitue une source primaire de nourriture pour l'aquaculture.

Les pêches canadiennes, y compris la pêche sportive, correspondent à environ 1 % des prises mondiales totales et présentent des tendances parallèles aux tendances et aux caractéristiques observées à plus grande échelle. Le Canada comprend de vastes étendues d'habitats marins et d'eau douce où la pêche est pratiquée. Pour la population et l'économie du Canada, la pêche commerciale et la pêche récréative ont une importance comparable. Les efforts de gestion ont été surtout axés sur le secteur commercial dans les écosystèmes marins, tandis qu'ils ont été dirigés de plus en plus vers les utilisations sportives dans le cas des écosystèmes d'eau douce. L'industrie naissante de l'aquaculture aura tendance à remplacer plutôt qu'à augmenter l'industrie commerciale de prélèvement et dépend elle-même de la fabrication d'aliments pour poissons à partir de la production aquatique naturelle. Comme d'autres ressources renouvelables, les pêches produisent une petite portion du produit intérieur brut (PIB), mais elle jouent un rôle important comme source de nourriture, d'emplois et de loisirs pour les Canadiens.

### *Habitats aquatiques canadiens où l'on pratique la pêche*

Les ressources des écosystèmes marins et d'eau douce du Canada, fondement de nos pêches, sont étendues. Le Canada a la responsabilité d'une superficie de 4,62 millions de $km^2$ répartie dans trois océans à l'intéieur des limites de la ZEE de 200 milles marins (Jake Kean, comm. pers., Service hydrographique canadien, Ottawa, 1997). Les zones marines mesurent respectivement 2,33, 1,87 et 0,42 millions de $km^2$ dans les océans Atlantique, Arctique et Pacifique. Le Canada a une ligne de côte qui mesure 243 792 km, dont les deux tiers se trouvent dans les Territoires du Nord-Ouest. En ce qui concerne les espèces dont le territoire est étendu comme les salmonidés, la portée des intérêts du Canada se prolonge beaucoup plus loin dans les océans Atlantique et Pacifique.

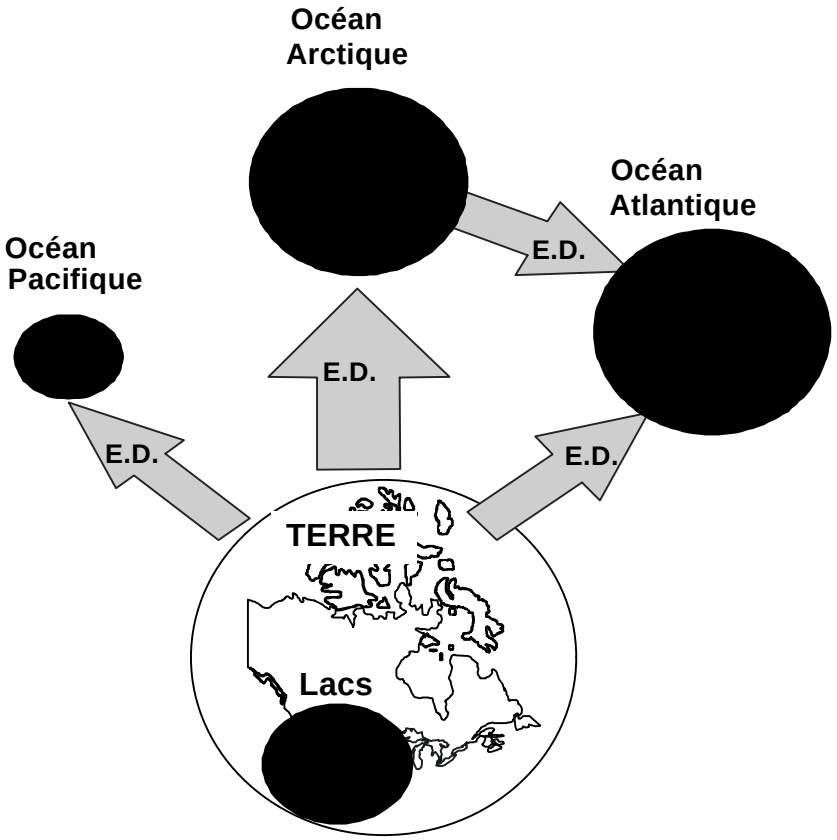
Quant aux écosystèmes d'eau douce, le territoire canadien génère 7,1 % de l'écoulement mondial, ce qui comprend 43 % des zones humides d'importance déterminées à Ramsar (c.-à-d. les milieux humides identifiés dans le cadre de la Convention sur les zones humides d'importance internationale, Ramsar, Iran, 1971), ainsi qu'une grande partie de la superficie mondiale des lacs

et des cours d'eau (Minns et Moore, 1995). L'apport d'eau douce vers les systèmes côtiers marins est important et varie énormément d'un océan à l'autre (figure 5.1).

Les lacs et l'écoulement sont inégalement répartis dans tout le pays. C'est dans les provinces centrales, du Québec à la Saskatchewan, que la fraction de la superficie constituée par des lacs est la plus grande (figure 5.2). Les niveaux unitaires d'écoulement sont plus élevés dans les bassins hydrographiques côtiers du Pacifique et de l'Atlantique et plus faibles dans les bassins du centre des Prairies et du Haut-Arctique (figure 5.2). Ces différences dans la superficie des lacs et dans l'écoulement correspondent aux différences régionales dans l'importance relative des pêches effectuées dans les lacs et les rivières. Elles semblent même se refléter dans certains aspects de la biologie d'espèces particulières. Par exemple, le nombre de lacs est élevé à Terre-Neuve comparativement à celui des autres provinces de l'Atlantique, et l'on sait que le saumon de l'Atlantique se sert davantage des lacs de cette province pour l'élevage des saumoneaux que de ceux des autres provinces de l'Atlantique.

**Figure 5.1 Proportions relatives des terres et de l'eau au Canada**

La surface des cercles est proportionnelle aux superficies des plans d'eau et de la terre ferme identifiées. Les océans sont représentés par la superficie des zones qui se trouvent entre les côtes et la limite de 200 milles. La superficie de la baie d'Hudson a été incluse dans celle de l'océan Arctique. La surface des flèches est proportionnelle à l'écoulement d'eau douce du continent vers les océans. La flèche qui va de l'océan Arctique à l'océan Atlantique représente l'apport d'eau douce en provenance de la baie d'Hudson, dont l'effet sur la salinité des eaux du plateau continental de Terre-Neuve a été démontré empiriquement (Myers *et al*., 1990).



### *Pêches commerciales*

Sur le plan national, notre industrie de la pêche commerciale est petite. En effet, en 1986, la pêche et la transformation du poisson n'ont représenté que 1,78 milliard de dollars, ou 1,1 % du PIB imputable aux industries canadiennes de production de denrées; en 1985, elles employaient 111 000 personnes, ou 3,2 % de la main-d'oeuvre travaillant dans l'industrie de la production de denrées (Parsons, 1993). Cependant, les pêches représentent un élément majeur sur la côte Atlantique. Parsons (1993) a écrit que : " Parmi les 600 000 personnes de l'Atlantique qui vivent dans des communautés de pêcheurs, environ 200 000 vivent dans des collectivités où l'activité de pêche est la source principale d'emploi, sinon la seule. "

**Figure 5.2 Pourcentage de la superficie de chaque province couverte par des lacs. Écoulement annuel par province (**Toutes les valeurs sont tirées de Laycock, 1987)

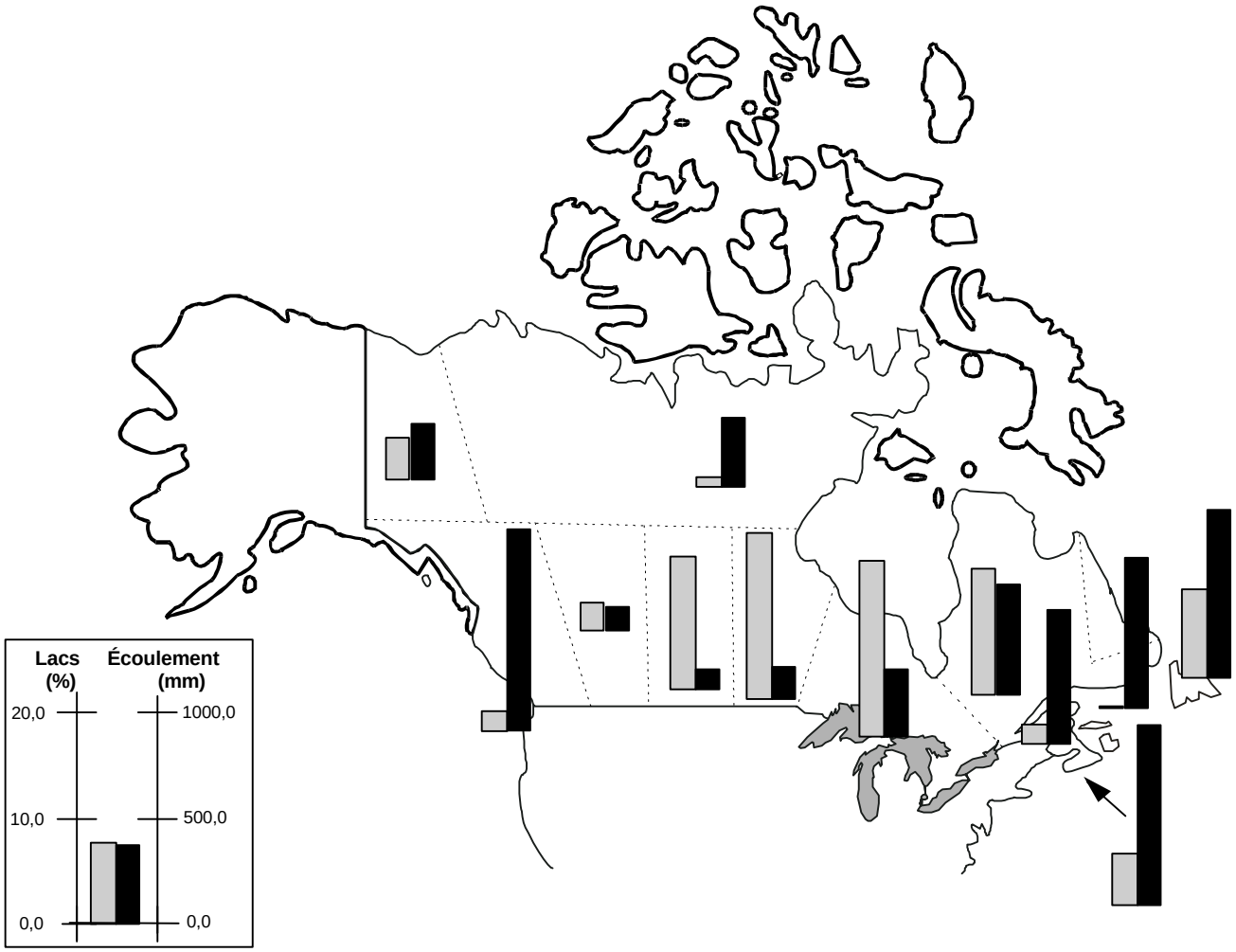


Tableau 5.2 Aperçu des pêches commerciales canadiennes - statistiques sur les captures et la valeur au débarquement pour 1990 et 1994 (Statistique Canada, 1997)

| Pêche | 1990 | | 1994 | |
|---|---|---|---|---|
| | Quantité (kt) | Valeur en millions de dollars | Quantité (kt) | Valeur en millions de dollars |
| Atlantique | 1342 | 954 | 718 | 1123 |
| Poissons de fond | 646 | 386 | 144 | 124 |
| Morue | 395 | 243 | 22 | 30 |
| E. pélagiques | 423 | 85 | 251 | 74 |
| Hareng | 260 | 38 | 207 | 28 |
| Capelan | 127 | 17 | 2 | <1 |
| Crustacés et coquillages | 230 | 474 | 291 | 912 |
| Pétoncle | 83 | 87 | 91 | 139 |
| Homard | 48 | 232 | 41 | 354 |
| Crabe | 26 | 49 | 60 | 270 |
| Autres | 43 | 9 | 32 | 15 |
| Pacifique | 304 | 480 | 281 | 473 |
| Poissons de fond | 139 | 85 | 147 | 101 |
| Flétan | 5 | 21 | 5 | 34 |
| Merluche | 79 | 13 | 104 | 15 |
| E. pélagiques | 142 | 340 | 107 | 261 |
| Hareng | 41 | 73 | 39 | 64 |
| Saumon | 96 | 263 | 65 | 195 |
| Crustacés et coquillages | 21 | 46 | 26 | 94 |
| Mye | 7 | 16 | 4 | 37 |
| Crabe | 2 | 9 | 6 | 24 |
| Autres | <1 | 8 | <1 | 17 |
| Eau douce | 45 | 66 | 36 | 70 |
| Total | 1 690 | 1 500 | 1 070 | 1 776 |

Les prises commerciales canadiennes ont chuté énormément entre 1990 et 1994 alors que leur valeur au débarquement a augmenté (tableau 5.2) (Statistique Canada,1997). L'importance de la pêche de l'Atlantique était deux fois supérieure à celle du Pacifique, et celle de la pêche commerciale en eau douce était très petite en comparaison des deux autres. En ce qui concerne les pêches de l'Atlantique, le principal facteur de déclin a été l'effondrement des stocks de poissons de fond, en particulier la morue. Ces poissons constituaient un élément majeur des prises en 1990, mais, en 1994, les crustacés, le homard et la crevette dominaient. Dans le cas des pêches du Pacifique, les espèces pélagiques, surtout le saumon et le hareng, étaient les éléments dominants, bien que les captures de saumons aient diminué entre 1990 et 1994.

Une grande partie des captures commerciales en eau douce sont vendues par l'Office de commercialisation du poisson d'eau douce (OCPED, Rapport annuel, 1996). L'OCPED représente plus de 3 500 producteurs commerciaux de poissons des provinces des Prairies, du

nord-ouest de l'Ontario et des Territoires du Nord-Ouest. Quatorze espèces d'eau douce sont vendues. En 1996, l'OCPED a vendu 18,6 kilotonnes (kt) de poissons, incluant 6,3 kt de grands corégones, 3,7 kt de meuniers noirs, 3,1 kt de dorés jaunes et 2,4 kt de brochets, dont la valeur totale au débarquement s'élevait à 47,1 millions de dollars.

La valeur au débarquement des pêches commerciales ne reflète pas la totalité de leur incidence économique. Une grande partie des poissons est transformée pour la consommation; les recettes de la vente au détail sont donc beaucoup plus élevées si l'on inclut les recettes des industries de mise en conserve et de transformation ainsi que les coûts de transport.

### *Aquaculture*

L'aquaculture est un secteur de l'industrie canadienne des pêches qui se développe rapidement. Selon les statistiques du MPO (ministère des Pêches et des Océans du Canada, Élaboration et analyse des politiques/Aquaculture, Ottawa - Personne-ressource : T. Davies), en 1994, l'industrie canadienne de l'aquaculture a produit 54 kt de poissons, de coquillages et de crustacés, d'une valeur de 297 millions de dollars (tableau 5.3). Les provinces les plus productrices sont la Colombie-Britannique et le Nouveau-Brunswick. En 1996, on a élevé 26 kt de saumons en Colombie-Britannique, par comparaison aux captures de saumons sauvages de 34 kt (Cernetig, 1997). " Plus de 42 % de la production mondiale de saumons se fait maintenant en pisciculture, chiffre qui passera à 50 % d'ici l'an 2000 ... " (*idem*). Selon le site Web Contact Canada, en 1996, l'industrie canadienne de l'aquaculture comprenait 1 800 producteurs et 820 sociétés d'aquatechnologie. On a estimé que l'industrie fournit 15 000 à 24 000 emplois. Le saumon de l'Atlantique, l'omble chevalier et la truite sont les principaux produits de l'aquaculture.

Comme dans toute industrie faisant appel aux ressources renouvelables, la croissance rapide est assortie de problèmes. L'aquaculture intensive produit des nutriments et des déchets organiques, augmente l'incidence et le transfert des maladies, ce qui entraîne une utilisation accrue de produits chimiques et de médicaments, accroît les libérations accidentelles d'espèces exotiques et menace l'intégrité écologique et génétique des stocks sauvages. En Colombie-Britannique, on est en train de discuter de ces préoccupations au moment où le secteur de la pisciculture s'efforce de prendre de l'expansion (*idem*).

### *Pêche récréative*

Un cinquième des Canadiens sont des pêcheurs sportifs réguliers (MPO, 1994). La majeure partie de leurs efforts visent les poissons d'eau douce, qui constituent la majorité des captures sportives. La truite, le doré jaune, la perche et le grand brochet sont les principales espèces pêchées; la répartition des captures couvre l'ensemble du Canada, mais elle est concentrée dans les régions intérieures. Les captures conservées en 1990, soit 70 kt, ne correspondent qu'à 7 % des captures commerciales de 1994. Toutefois, le niveau d'activité économique global (6 milliards de dollars - tableau 5.4) généré par la pêche récréative est comparable à celui de la pêche commerciale.

**Tableau 5.3 Statistiques de production pour l'industrie canadienne de l'aquaculture en 1994** (MPO, Élaboration et analyse des politiques/Aquaculture, Ottawa, personne-ressource : T. Davies)

| Produit | Quantité (kt) | Valeur en millions de dollars |
|---|---|---|
| Salmonidés | 38 | 278 |
| Saumon | 32 | 244 |
| Truite | 6 | 33 |
| Coquillages | 15 | 18 |
| Huître | 8 | 9 |
| Moule | 7 | 8 |
| Total | 54 | 297 |

**Tableau 5.4 Profil de la pêche récréative au Canada par résidents et non-résidents pour 1990 (**MPO, 1994)

| Catégorie | Résident | Non-résident | Total |
|---|---|---|---|
| Pêcheurs sportifs | | | |
| Nombre de pêcheurs, en millions | 5,47 | 1,12 | 6,59 |
| Pourcentage de la population canadienne | 20,6 | - | - |
| Effort, millions de jours-pêcheurs | 60,19 | 6,96 | 67,15 |
| | | | |
| Captures | | | |
| Nombre total de captures, en millions | 245,66 | 57,84 | 303,50 |
| Truite | 63,83 | 2,63 | 66,46 |
| Doré jaune | 27,41 | 18,20 | 45,61 |
| Perche | 31,91 | 6,34 | 38,25 |
| Grand brochet | 21,40 | 12,03 | 33,43 |
| Tous les saumons | 7,00 | 1,59 | 8,59 |
| Morue | 3,90 | 0,01 | 3,91 |
| Pourcentage retenu | 56,1 | 32,7 | 51,7 |
| Poids retenu (kt) | 56,28 | 13,57 | 69,85 |
| | | | |
| Activité économique | | | |
| Dépenses directes, milliards de $ CAN | 2,18 | 0,65 | 2,83 |
| Investissements majeurs, milliards de $ CAN | 2,93 | 0,13 | 3,06 |

***Pêches autochtones et de subsistance***

Plusieurs études substantielles ont déjà été réalisées sur les ressources en poissons utilisées par les pêcheurs autochtones et ceux qui pratiquent la pêche de subsistance (tableau 5.5). Tous les auteurs ont reconnu explicitement les grandes erreurs que comportent leurs estimations de l'utilisation globale de ces ressources, et qui sont dues aux faibles efforts d'enquête et à la conception partielle et incomplète des échantillons. Il est difficile de concevoir une justification logique pour l'évaluation de la valeur économique de la pêche de subsistance, et nous n'avons pu trouver qu'un auteur qui a tenté de le faire. Clarke (1993) a estimé qu'environ 12 000 personnes

pêchaient pour leur subsistance dans l'Arctique canadien en 1987, ce qui représentait une valeur brute de 15 millions de dollars cette année-là. On peut se servir de ces statistiques pour calculer une estimation très grossière de la valeur de l'ensemble de la pêche de subsistance canadienne. D'après les chiffres ci-dessus, la valeur économique des prises prélevées par un seul pêcheur de subsistance est de 1 250 $ par année. Selon le tableau 5.5, il y a en gros 300 000 pêcheurs de subsistance au Canada; par conséquent, la valeur de cette pêche est d'environ 375 millions de dollars par année.

**Tableau 5.5 Pêches de subsistance et autochtones au Canada : estimations du nombre de pêcheurs et de la récolte annuelle pour chaque pêche.**

| Type de pêche et région | Nombre de pêcheurs | Consommation par personne kg/an | Récolte annuelle totale (kt) | Année | Référence |
|---|---|---|---|---|---|
| Pêche autochtone | | | | | Berkes (1990) |
| Région du nord (parties du Labrador, de la baie James, du du nord du Québec, des T.N.-O.) | 30 459 | 53,5 | 1,60 | 1972-1982 | |
| Centre de l'Ontario | 4 967 | 62 | 0,30 | 1982 | |
| Manitoba | 35 000 | 50 | 1,70 | 1975 | |
| Saskatchewan | 71 047 | 26 | 1,85 | 1985 | |
| Colombie-Britannique | 43 000 | 53 | 2,27 | 1980 | |
| Pêche autochtone totale | | | | milieu des années 80 | Pearse 1988 (cf. Berkes 1990) |
| Yukon/T.N.-O. | | | 1,50 | | |
| Maritimes + Labrador | | | 0,10 | | |
| Ontario + Québec | | | 1,10 | | |
| Prairies | | | 3,75 | | |
| Colombie-Britannique | | | 3,10 | | |
| Canada | | | 9,55 | | |
| Pêche de subsistance totale | | | | milieu des années 80 | Berkes (1990) |
| Canada | 300 000 | 50 | 15,0 | | |

### *Autres mesures de la " valeur "*

Les mesures économiques globales des pêches canadiennes ont tendance à sous-évaluer le rôle de ce secteur dans la société. Le poids brut des captures en tonnes métriques est souvent indiqué sans contexte, et l'importance des captures est difficile à évaluer. Il n'est pas facile de comparer les valeurs calculées à partir des sources récréatives et commerciales, mais deux percées récentes survenues en économie écologique et en évaluation des ressources facilitent la tâche. Pauly et Christensen (1995) ont mis au point une méthode qui fait appel aux transferts dans la chaîne alimentaire pour déterminer dans quelle mesure les prélèvements dus aux pêches cooptent la production primaire disponible pour les humains. Costanza *et al*. (1997) ont récemment préparé un rapport sur un projet mondial visant à mesurer la valeur des services rendus par les écosystèmes, qui sont dans la plupart des cas considérés par les humains comme allant de soi. Ces méthodes évaluatives permettent de mieux comprendre la grande importance des poissons et de la pêche pour le Canada et les Canadiens et nous indiquent dans quelle mesure nous sommes près d'atteindre et de dépasser la capacité de nos écosystèmes aquatiques de maintenir les utilisations humaines.

Pauly et Christensen (1995) ont combiné des estimations régionales de la production primaire et des rendements des pêches (de même que des rejets) pour mesurer la proportion de la production primaire qui se retrouve, grâce aux transferts dans la chaîne alimentaire, dans les produits de la pêche prélevés. Ces estimations montrent qu'à l'échelle mondiale, les pêches représentent 8 % de la production primaire aquatique disponible. Dans les régions côtières, du plateau continental et de remontée des eaux, le pourcentage variait entre 8,3 et 35,3 % tandis qu'il était de 23,6 % dans les eaux douces. Selon ces résultats, un proportion significative de la production biologique des eaux canadiennes est prélevée par les pêches. Les niveaux d'utilisation élevés rendent les ressources renouvelables plus vulnérables aux stress supplémentaires comme ceux que le changement climatique pourrait apporter.

Cette évaluation de l'utilisation des ressources suggère que les pêches canadiennes font des prélèvements dont les taux se rapprochent des limites durables; elle contraste énormément avec la perspective économique selon laquelle les pêches seraient un faible élément d'un tout beaucoup plus important. Cependant, la combinaison de ces points de vue forme un tableau encore incomplet de l'importance globale des poissons, des pêches et des habitats des poissons du point de vue des écosystèmes. Costanza *et al*. (1997) ont récemment fourni les premières estimations mondiales de la valeur des nombreux services écologiques rendus par les écosystèmes. Leurs évaluations en dollars ont été principalement calculées en estimant le coût de remplacement de chaque service. La valeur unitaire des services rendus par les eaux marines côtières et par les eaux douces est élevée; elle se chiffre respectivement à environ 4 000 $ US et 8 500 $ US par hectare par année. La majeure partie de la valeur des services rendus par les régions marines est associée au recyclage des nutriments, et celle des eaux douces, à l'approvisionnement en eau et à la régulation de cette ressource. Toutefois, les deux sont d'importantes sources de nourriture, d'habitats refuges et de loisirs. Cette approche écosystémique qui tient un compte global des services écologiques et, par inférence, des pêches, de même que les calculs liés aux cooptions de production primaire, montrent clairement que les valeurs au débarquement des captures

commerciales et les dépenses par jour-pêcheur engagées dans la pêche récréative sous-estiment l'importance des poissons et des pêches pour les Canadiens.

## IMPACTS SUR LES POISSONS

Examinons maintenant la littérature existante concernant les effets observés et prédits du climat sur la biologie et l'écologie des populations sauvages de poissons. Nous avons structuré cet examen selon les catégories mentionnées plus haut en commençant par les effets sur la productivité des écosystèmes et des populations, et en terminant par les effets sur la distribution spatiale des populations et des espèces.

### *Productivité des écosystèmes et production de poissons*

Les études empiriques sur les liens entre les divers facteurs climatiques et la production de biomasse dans des communautés de poissons entières ont donné des résultats qui diffèrent beaucoup, selon le genre de système aquatique examiné (p. ex., lacs ou océans) et l'échelle spatiale des données accumulées. Lorsqu'on compare les lacs d'eau douce de l'Arctique à ceux des tropiques, la production globale de poissons est fortement corrélée avec la température annuelle moyenne de l'air; un indice de la disponibilité des nutriments n'a expliqué qu'une petite portion supplémentaire de la variance observée (Schlesinger et Regier, 1982). Dans des régions géographiques plus petites, la variation de la production des communautés de poissons est davantage associée aux indices de disponibilité des nutriments et à la morphométrie des lacs (Downing *et al.,* 1990; Leach *et al.,* 1987). En revanche, la grande variation décennale de la production globale de poissons dans le Pacifique Nord entre 1925 et 1990 était fortement corrélée aux changements dans la force du régime des vents qui régit les taux de recirculation des nutriments (Beamish et Bouillon, 1995; Polovina *et al.,* 1994). Cependant, même dans ce cas, chaque écosystème pélagique montrait une réaction apparente différente au forçage climatique commun (Hayward, 1997).

Les études comparatives de ce genre ayant trait au niveau des systèmes fournissent un aperçu des dépendances climatiques possibles des systèmes de production de poissons, mais les relations empiriques qu'elles produisent sont de nature corrélative et ne démontrent pas nécessairement la causalité et, de ce fait, ne sont peut-être pas suffisantes pour formuler des prévisions fiables des conséquences du changement climatique. Parce que la réaction physique au changement climatique de chaque système aquatique diffère de celle d'un autre et parce que ces différences produiront probablement des chaînes causales tout à fait différentes reliant le climat à la production de poissons, nous nous pencherons d'abord sur cinq types de systèmes aquatiques et examinerons les liens entre les changements climatiques et environnementaux les plus susceptibles d'influer sur la productivité de chaque écosystème. Ces systèmes sont : i) la zone extracôtière marine, ii) la zone arctique marine, iii) la zone côtière marine et estuarienne, iv) les lacs d'eau douce et v) les fleuves et les rivières. Pour chacun des systèmes, nous distinguerons les effets possibles des modifications de l'approvisionnement en eau (c.-à-d. l'élévation du niveau de la mer attendue dans les systèmes marins par comparaison à la baisse des niveaux d'eau prévue dans nombre de systèmes d'eau douce) des effets possibles dus aux changements dans la qualité de l'eau.

### *Zone extracôtière marine*

Dans les systèmes marins, la production de poissons varie généralement en fonction de la production primaire (Nixon, 1988), et cette dernière est limitée par les nutriments, l'azote constituant le nutriment limitant (Mann et Lazier, 1996). Le taux de production est régi par la remontée des nutriments à partir des eaux profondes jusqu'à la couche supérieure mélangée de l'océan ainsi que par le taux de recyclage des nutriments dans la couche mélangée elle-même (Denman *et al.*, 1996). Ces deux processus sont fortement et positivement liés à l'intensité de la turbulence due aux vents (Eppley et Peterson, 1979; Mann et Lazier; 1996). Par conséquent, on peut s'attendre à trouver de fortes corrélations entre la variation du régime des vents et la variation de la production de poissons dans les zones extracôtières marines. Des travaux récents sur les variations historiques de la production globale de poissons dans le Pacifique Nord ont justement révélé l'existence d'une telle corrélation étroite selon plusieurs échelles temporelles allant de l'année à la décennie (Mann et Lazier, 1996, Pearcy, 1997) au siècle ou même au millénaire (Pearcy, 1997). À partir du milieu des années 20 jusqu'à la fin des années 80, les changements décennaux dans l'emplacement et l'intensité de la dépression des Aléoutiennes ont été accompagnés de changements importants touchant les niveaux de productivité annuelle de plusieurs grands écosystèmes marins extracôtiers : des changements dans la production primaire et secondaire ainsi que dans la production globale de poissons ont été clairement démontrés (Beamish, 1993; Beamish et Bouillon, 1993, 1995; Polovina *et al.*, 1994; Trenberth et Hurrell, 1994; Hayward, 1997; Pearcy, 1997), notamment le changement rapide et important survenu au milieu des années 70.

Il existe une interprétation causale directe de cette corrélation entre les caractéristiques de la pression atmosphérique et la productivité des écosystèmes. Lorsque la dépression des Aléoutiennes s'intensifie et se déplace vers l'est, les vent cycloniques du golfe de l'Alaska augmentent en intensité, le courant côtier de l'Alaska se renforce et transporte davantage d'eaux tempérées vers le nord, ce qui produit de grandes augmentations de l'intensité de la régénération des nutriments et de leur remontée dans les couches mélangées du golfe de l'Alaska et des eaux avoisinantes. Ces accroissements de la disponibilité des nutriments entraînent les hausses observées de productivité des écosystèmes (Mann et Lazier, 1996; Pearcy, 1997) dans les eaux dominées par le système de courants de l'Alaska. Pour la période de 1920 à 1990, Hare et Francis (1995) et Francis et Hare (1994) ont pu identifier trois périodes distinctes en ce qui concerne tant les données météorologiques sur le nord-est du Pacifique que les captures de saumons roses et de saumons rouges de l'Alaska : de 1920 à 1947 (captures nombreuses), de 1948 à 1976 (captures peu nombreuses), de 1977 à 1990 (captures nombreuses). Les deux dernières périodes correspondent à celles déterminées par Beamish et Bouillon (1995) dans leurs analyses de la variation décennale des données sur les captures d'autres pêches du Pacifique Nord. Il est intéressant de noter qu'il semble y avoir un lien réciproque entre la productivité dans ces eaux nordiques et la productivité dans les eaux côtières du sud de la Colombie-Britannique qui sont dominées par le courant de Californie, lequel se dirige vers le sud. (Pearcy, 1997).

Wooster et Hollowed (1995) ont documenté une amplitude plus faible et une variation annuelle de la circulation dans le golfe d'Alaska et ils les ont associées à l'apparition synchrone de classes d'âges plus abondantes chez de nombreuses populations de poissons de fond de la région. Les

variations à cette échelle de temps semblent être liées à la variation climatique dans le Pacifique Sud, associée aux événements d'oscillation australe - El Niño (ENSO) : un bon nombre de ces événements, mais pas tous, ont été suivis d'une intensification de la dépression des Aléoutiennes (Mysack, 1986).

Dans le nord-ouest de l'Atlantique, la variation annuelle à décennale observée dans la population de poissons des eaux du Labrador et de Terre-Neuve a été liée à une variation dans la différence de pression atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande (Drinkwater, 1994; Mann et Drinkwater, 1994). L'analyse des données historiques a montré que cette différence de pression a un cycle décennal. Cette oscillation nord-atlantique (NAO) a comme indice la différence de pression entre les deux systèmes. La variation de cet indice est associée à une variation climatique touchant les eaux voisines du Labrador et de Terre-Neuve et les eaux au sud du golfe du Maine. Les conditions climatiques du golfe du Maine et de la plate-forme Scotian ne sont pas associées à la NAO (Drinkwater, 1996; Krovnin, 1995). Les valeurs élevées de l'indice NAO sont associées : aux hivers froids sur le plateau continental du Labrador, aux forts vents du nord-ouest en hiver et au printemps, à la vaste couverture glacielle pendant l'hiver et, après la fonte printanière des glaces, aux eaux de surface froides et moins salées qui durent tout l'été. On associe des conditions inverses aux valeurs négatives de l'indice.

Les valeurs positives de l'indice NAO ont été associées à des saisons de croissance plus courtes pour le phytoplancton et le zooplancton (Bochkov et Troyanovsky, 1996), à des réductions de la biomasse des populations de presque tous les poissons de fond dans les eaux entourant le Labrador et Terre-Neuve (Atkinson, 1993, cité dans Mann et Drinkwater, 1994), à des réductions de la biomassse des populations chez certaines espèces pélagiques (Colbourne *et al.*,1994) et à des réductions de la croissance individuelle (Krohn et Kerr, 1996, cités dans Drinkwater, 1997) et de la biomasse (Mann et Drinkwater, 1994) des stocks de morues dans ces régions. Dans le cadre d'une vaste étude sur les tendances temporelles d'espèces de phytoplancton et de zooplancton dans les eaux du Labrador et de Terre-Neuve (Myers *et al.*, 1994), la grande majorité (80 %) des ensembles de données pour lesquels on a observé des tendances statistiques significatives (environ 20 % de tous les ensembles de données examinés) montraient des réductions qui coïncidaient avec la très forte hausse de l'indice NAO survenue au cours de la période de 1965 à 1975.

Il a été suggéré (Mann et Drinkwater, 1994) que les conditions associées aux valeurs élevées de l'indice NAO réduisent la productivité de l'écosystème selon le mécanisme suivant : la vaste couverture glacielle de durée prolongée et les forts vents froids du nord-ouest retardent le début de la croissance du phytoplancton et du zooplancton au printemps, alors que la présence de l'eau de surface froide et de faible salinité en été crée une thermocline très stable qui empêche très efficacement tout apport de nutriments de l'eau plus profonde vers la couche superficielle mélangée. En outre, les basses températures de la couche mélangée elle-même maintiennent de faibles taux de recyclage des nutriments. Tous ces éléments s'unissent pour produire une saison de croissance courte et froide associée à une faible disponibilité des nutriments, une production primaire sérieusement limitée et des manques de nourriture résultants tout le long de la chaîne alimentaire jusqu'aux poissons et aux mammifères et oiseaux marins.

Les variations de faible fréquence des caractéristiques de la pression atmosphérique sur de grandes régions géographiques font partie des aspects les moins compris de la variabilité (Miller *et al.*, 1994), mais elles semblent exercer des effets profonds et à long terme sur la productivité globale des écosystèmes marins et sur les récoltes durables de poissons qu'on peut y faire. Afin de déceler et de prévoir les répercussions du changement climatique lié au $CO_2$ sur ces systèmes, il est essentiel de faire la différence entre les cycles " naturels " de faible fréquence et les tendances " irréversibles " imposées par le changement climatique. Le changement survenu en 1970 dans la dépression des Aléoutiennes et les changements de productivité qui l'accompagnaient semblent avoir fait partie d'un cycle " naturel " qui se renverse, mais les réductions de production parallèles observées au large de la côte de la Californie se poursuivent (Hayward, 1997).

Les recherches actuelles tentent principalement de comprendre les effets probables du changement climatique lié au $CO_2$ sur les régimes de variation " naturels ", lesquels fonctionnent à des fréquences basses et moyennes (p. ex., les épisodes El Niño). Selon une étude récente, la fréquence des épisodes El Niño augmente, ce qui pourrait être dû au changement climatique (Trenberth et Hoar, 1996). De même, la fréquence de la NAO semble s'être accrue après 1970, et il a été suggéré que ce changement pourrait découler du changement climatique lié au $CO_2$ (Rodionov et Krovnin, 1992).

En plus de l'incertitude quant aux répercussions du changement climatique lié au $CO_2$ sur les cycles naturels suivis par les taux de remontée et de recyclage des nutriments dans les systèmes marins, il existe une certaine controverse au sujet de l'impact probable du changement sur l'intensité moyenne de la remontée elle-même. Si le changement climatique entraîne une réduction des différences de température entre l'équateur et les pôles, il en résultera une baisse générale de l'intensité des vents de l'ouest, ce qui conduira ensuite à une réduction de la remontée de nutriments et de la production dans les écosystèmes marins extracôtiers (Jilan et Miles, 1996; Beamish *et al.*, 1997). Selon ce scénario, on peut s'attendre à ce que l'amplitude de l'oscillation nord-atlantique diminue, car elle fait partie du système global qui génère les régimes des vents d'ouest. Par contre, il a été suggéré que le changement climatique entraînera une augmentation de la différence moyenne entre la température des océans et celle du continent. Il s'ensuivra un accroissement du stress dû au vent le long des côtes, ce qui conduira à des augmentations de la remontée des eaux côtières et de la production dans certains écosystèmes côtiers (Bakun, 1990).

### *Zone marine arctique*

On a des connaissances de base sur la distribution et l'abondance des poissons diadromes (c.-à-d. les poissons qui migrent entre la mer et l'eau douce) et des mammifères marins dans l'Arctique, mais la connaissance de la biologie fondamentale des poissons et des invertébrés marins est incomplète, et la compréhension du fonctionnement des écosystèmes marins arctiques est limitée (Clarke, 1993). Cette situation est rendue encore plus complexe par la variation des régimes saisonniers et annuels des glaces, lesquels agissent comme des agents structurants importants dans de nombreux écosystèmes marins. Généralement, la prévisibilité des effets simples et complexes du changement climatique sur les populations nordiques de poissons est plutôt faible (Reist, 1994). Dans la littérature limitée dont nous disposons, les effets probables du changement climatique sur la productivité marine arctique sont associés à des changements dans la taille et la

continuité de la nappe glaciaire arctique et à des effets positifs résultants sur la longueur de la saison de croissance et les taux de recirculation des nutriments (Flittner, 1993) :

- le réchauffement réduira la couverture glacielle, ce qui entraînera des taux de lumière, de mélange et de nutriments plus élevés, des températures de l'eau plus élevées et une saison de croissance plus longue dans les nouvelles zones d'eau libre; tous ces changements entraîneront des hausses de la productivité globale;

- le réchauffement produira une augmentation du nombre et de la taille des polynies (zones d'eau libre entourées de champs de glace), ce qui se traduira aussi par des hausses de la productivité globale dues aux augmentations de la lumière et des nutriments à l'intérieur des polynies;

- les régions de grande productivité sont associées aux lisières des glaces; le réchauffement de l'Arctique devrait modifier le régime de migration saisonnière de la lisière des glaces, ce qui produira des changements spatiaux des zones de productivité;

- L'emplacement des zones de productivité associées aux polynies changera également.

***Écosystèmes marins côtiers et estuariens***

Il existe de nombreuses similarités entre les effets potentiels du changement climatique sur la production de poissons dans les estuaires et dans les eaux marines côtières (tableau 5.6); nous en traiterons donc ensemble dans le présent document.

On trouve dans la littérature (Ehler *et al.*, 1996) de nombreuses discussions sur les effets possibles de l'élévation du niveau de la mer sur les écosystèmes marins côtiers. Les milieux humides situés le long des côtes marines sont des zones de grande productivité qui abritent des stades de vie critiques pour de nombreuses espèces de poissons qui passent la plupart de leur vie en mer. Une élévation lente du niveau de la mer peut avoir un effet relativement faible sur la productivité globale des terres humides s'il n'y a pas d'obstacles physiques au déplacement des milieux humides vers l'intérieur. Si ce déplacement est restreint par les ouvrages des humains entourant les milieux humides existants, des pertes de productivité importantes seront alors inévitables.

**Tableau 5.6 Répercussions potentielles du changement climatique sur la productivité des écosystèmes dans les eaux côtières estuariennes et marines**

| Changement climatique prévu | Écosystème | |
|---|---|---|
| | Estuarien | Côtier marin |
| Élévation du niveau de la mer | • Déplacement vers l'intérieur de la limite entre l'eau salée et l'eau douce<br>• Aucun obstacle efficace au déplacement<br>• C'est la vitesse de déplacement qui détermine dans quelle mesure l'effet sera perturbateur | • Déplacement des terres humides existantes vers l'intérieur; statut quo ou même amélioration si les terres nouvellement inondées se transforment en habitats de remplacement<br>• Déplacement limité par des ouvrages de réduction des inondations; ces ouvrages peuvent faire en sorte que l'habitat existant soit inondé et rendu inutilisable et empêcher la création d'un habitat de remplacement. |
| Diminution de l'apport d'eau douce provenant de systèmes fluviaux | • Augmente le déplacement vers l'intérieur de la limite des eaux salines déjà causée par l'élévation du niveau de la mer<br>• Réduction du mélange de nutriments dans l'estuaire qui entraînera une chute importante de la production dans tout le système estuarien (p. ex., Therriault et Plourde, 1997) | • Réduction de la régénération des nutriments due à l'apport d'eau douce;<br>• Réduction possible de la production et par conséquent de la récolte durable touchant des populations individuelles (p. ex., le homard et le flétan dans le golfe du Saint-Laurent - Sutcliffe *et al.*, 1977, divers stocks de morues de l'Atlantique - Sutcliffe *et al.*, 1983) |

Un effet similaire est présent dans les estuaires. La limite entre l'eau salée et l'eau douce se déplacera vers l'intérieur des terres à mesure que le niveau de la mer s'élèvera. Les obstacles sérieux à ce phénomène seront rares, mais l'une des conséquences de ce mouvement sera que les écosystèmes d'eau douce seront remplacés par des écosystèmes d'eau saumâtre ou salée. Si le déplacement de la limite vers l'amont est lent, cette transformation pourra se produire en causant des perturbations relativement mineures mais, s'il est rapide, il pourra entraîner d'importantes chutes de production, car les communautés d'eau douce mourront plus rapidement qu'elles ne pourront être remplacées par des communautés d'eau salée. Le taux de déplacement est fonction de l'apport d'eau douce ainsi que de l'élévation du niveau de la mer. Une baisse de cet apport augmente à la fois la vitesse et l'importance du déplacement vers l'intérieur des terres (Frank et Drinkwater, 1994).

Les taux du débit d'eau douce peuvent influer sur les taux de disponibilité des nutriments dans les estuaires et les eaux côtières marines, par ajout direct de nouveaux nutriments en provenance des terres, intensification de la remontée de nutriments dans la zone euphotique en provenance des eaux plus profondes (Drinkwater, 1986; Drinkwater et Frank, 1994) et suppression de la remontée des nutriments due à l'intensification de la stratification des densités (Sutcliffe *et al.*, 1983). L'importance potentielle des liens entre l'écoulement d'eau douce, la production primaire marine et la production de poissons a fait l'objet de discussions dans des études sur les écosystèmes du Pacifique (McBean *et al.*, 1992; Pearsey, 1997; Freeland, 1996) et de l'Atlantique (Sutcliffe, 1973; Drinkwater et Frank, 1994). On a également montré empiriquement l'existence sur les deux côtes de corrélations entre les mesures de l'écoulement et la production de poissons (Pacifique : Beamish *et al.*, 1994; Atlantique : Sutcliffe, 1972, 1973; Sutcliffe *et al.*, 1977, 1983;

Drinkwater, 1987; Gagne et Sinclair, 1991; Therriault et Plourde, 1997), mais il semble que l'on ait accordé plus d'attention au phénomène dans les eaux de l'Atlantique, où les grands apports d'eau douce provenant du Saint-Laurent et de la baie d'Hudson (figure 5.1) jouent des rôles importants bien reconnus dans la détermination de la variation saisonnière des conditions hydrologiques du golfe Saint-Laurent, de la plate-forme Scotian, du golfe du Maine (Sutcliffe *et al.*, 1976, Drinkwater, 1996; Krovnin, 1995) et du plateau continental de Terre-Neuve (Myers *et al.*, 1990).

***Lacs d'eau douce***

La plupart des études sur la réaction des lacs de l'Amérique du Nord au changement climatique ont mis l'accent sur les nombreux lacs du Bouclier canadien et sur les Grands Lacs (Magnuson *et al.*, 1997) et ont été suscitées par le genre de changements climatiques attendus pour cette région : des températures de l'air plus élevées et un changement dans l'équilibre entre l'évaporation et les précipitations, qui entraînent des réductions générales du débit des rivières et du niveau des lacs (Mortsch et Quinn, 1996; Magnuson *et al.*, 1997).

Cet ensemble de changements climatiques influera sur le caractère physique des systèmes lacustres de diverses façons, qui auront à la fois des répercussions évidentes et des répercussions subtiles sur la productivité des écosystèmes en général et sur la production de poissons en particulier.

On peut définir la production biologique annuelle d'un lac comme le produit du volume du lac par le niveau de production moyen que chaque unité de volume peut maintenir pendant un an (productivité volumique annuelle moyenne). L'effet de la baisse du niveau d'eau sur la production annuelle et la réduction du volume associée est direct et clairement négatif. Les effets potentiels du changement climatique sur la productivité volumétrique sont nombreux et subtils.

En ce qui concerne la plupart des lacs canadiens, la productivité volumique annuelle est régie par une certaine combinaison de température, de lumière (partie de l'année où la lumière est disponible = période sans glace) et de nutriments, le phosphore étant le nutriment limitant dans presque toutes les situations. Lorsqu'il y a beaucoup de nutriments disponibles, le taux de production de tous les organismes de la chaîne alimentaire allant du phytoplancton aux poissons varie en fonction de la durée de la période sans glace et de la température moyenne de l'eau (Fee *et al.*, 1992; Hewett et Johnson, 1987; Plante et Downing, 1989; Shuter et Ing, 1997). Lorsque la disponibilité des nutriments est faible, la production globale est établie par l'abondance des nutriments et elle est relativement peu touchée par les changements de température (Dillon et Rigler, 1974; Downing *et al.*,1990; Shuter et Ing, 1997; Martin *et al.*, présenté). Le degré de restriction des nutriments est un produit de l'apport entrant annuel net (ou charge) de nouveau phosphore dans le lac en provenance du bassin hydrographique, de la perte du phosphore présent vers les sédiments. (Vollenweider, 1969; Dillon et Rigler, 1974; Dillon et Molot, 1996) et du taux de recyclage du phosphore qui a lieu tant dans la tranche d'eau que dans les sédiments benthiques (Campbell, 1994; Fee, 1979; Fee *et al.*, 1994; Levine *et al.*, 1986; Nurnberg, 1984; Bostrom *et al.*, 1988). La charge nette dépend à la fois du volume de l'écoulement, de la durée de la période de glace et des caractéristiques des sols dans le bassin hydrographique (Richardson, 1985; Dillon et Molot, 1996; Dillon et Molot, présenté). Le recyclage des phosphates dépend de l'épaisseur, de

la température et du degré de turbulence de la couche d'eau de surface mélangée durant la période libre de glace : une couche mélangée plus épaisse et plus tempérée soutient un taux de régénération du phosphore plus élevé et met à la disposition des poissons une plus grande production " recyclée " durant la période de stratification (Fee, 1979; Fee *et al.,* 1994; Reynolds, 1996; Tarapchak et Nalewajko, 1986). Dans les lacs où il y a stratification, le taux de régénération annuelle du phosphore augmentera si les taux d'oxygène hypolimniques deviennent bas (Bostrom *et al.,* 1988; Magnuson *et al.,* 1997). Ce taux décroîtra si le mélange de la colonne d'eau associé au brassage automnal est limité par le fait que les eaux de surface n'atteignent pas des températures inférieures à 4 ºC (McCormick, 1990).

Dans l'ensemble, l'élévation saisonnière de la température de l'air que l'on prévoit avec l'accroissement du $CO_2$ atmosphérique devrait produire des périodes sans glace plus longues, des périodes de stratification thermique prolongées et des températures de l'eau épilimnique plus élevées (Hondzo et Stefan, 1993; King *et al.,* 1997; McCormick, 1990; Meyer *et al*., 1994; Schindler *et al.*,1996; Shuter *et al.*,1983). En l'absence de restriction des nutriments, ces changements devraient se traduire par des saisons de croissance plus longues et une meilleure production de phytoplancton (Fee *et al.,* 1992) et de zooplancton (Shuter et Ing, 1997) : c'est-à-dire un accroissement dans les niveaux trophiques inférieurs qui devrait se refléter (Downing *et al.,* 1990; Leech *et al.,* 1987) par un production accrue de poissons. Cependant, ces effets positifs sur la production potentielle pourraient être limités ou même inversés par les réductions de la disponibilité des nutriments qui pourraient résulter des réductions de l'écoulement et d'un assèchement général des bassins hydrographiques. Ces derniers changements réduiront les charges en phosphore et en carbone organique dissous des lacs (Magnuson *et al.,* 1997; Schindler *et al.,* 1996) et augmenteront le temps nécessaire au renouvellement de l'eau des lacs (Schindler *et al*., 1996). Ils pourraient avoir des effets positifs ou négatifs sur la disponibilité volumétrique des nutriments selon les variations de facteurs comme la taille et la morphométrie des lacs, la composition des sols des bassins hydrographiques (Fee *et al.,* 1996; Dillon et Molot, présenté; Richardson, 1985) et l'épaisseur de la couche mélangée. Dans le cas des petits lacs oligotrophes (superficie < 500 ha), l'épaisseur des couches mélangées augmentera probablement avec le degré de transparence de l'eau, à mesure que la charge de carbone organique dissous (COD) décroîtra (Fee *et al.,* 1996). En ce qui concerne les lacs plus grands, d'après des études hydrodynamiques (McCormick, 1990; Hondzo et Stefan, 1993; Meyer *et al.,* 1994) et des analyses de données historiques (King *et al.,* 1997), on devrait s'attendre à ce que l'épaisseur de la couche mélangée diminue.

Dans une étude des données historiques sur le comportement de sept petits lacs oligotrophes du Bouclier canadien échelonnées sur la période de 1978 à 1992, Dillon et Molot (en préparation) ont montré que la charge de phosphore provenant des bassins récepteurs a diminué en fonction de la réduction des précipitations estivales et que cet effet a semblé dominer tous les autres facteurs influant sur les concentrations du phosphore, ce qui s'est traduit par une réduction générale des teneurs en phosphore dans ces lacs au cours de la période d'étude. D'après ces résultats, les étés plus chauds et plus secs auxquels il faut s'attendre en raison du réchauffement climatique lié au $CO_2$ entraîneront une plus grande restriction des nutriments dans les lacs oligotrophes du Bouclier dont les bassins récepteurs sont étendus.

**Tableau 5.7 Effets potentiels d'un climat plus chaud et plus sec sur la productivité volumique annuelle moyenne des écosystèmes lacustres du centre du Canada**

| Changement physique et chimique dans le système lacustre | Changement dans la production potentielle | Changement dans la quantité de phosphore (P) disponible pour soutenir la production potentielle | |
|---|---|---|---|
| | | **Petits lacs** | **Grands lacs dimictiques** |
| Période sans glace plus longue et, dans les lacs dimictiques, période de stratification plus longue | • ↑ Allongement de la saison de croissance | • Accroissement de la charge nette en nutriments dû à une réduction des pertes de ruissellement au cours de la période de glace | • Accroissement de la charge nette en nutriments dû à une réduction des pertes de ruissellement au cours de la période de glace |
| Période de stratification plus longue | | • La concentration réduite d'$O_2$ dans les sédiments hypolimniques favorise une augmentation de l'importance du recyclage du P | • La concentration réduite d'$O_2$ dans les sédiments hypolimniques favorise un augmentation de l'importance du recyclage du P |
| Températures de l'eau de surface plus élevées | • Les températures plus élevées favorisent une hausse des taux de production du zooplancton et des poissons | • Les températures plus élevées favorisent un accroissement du taux de recyclage du P dans les eaux de surface | • Les températures plus élevées favorisent un accroissement du taux de recyclage du P dans les eaux de surface |
| | | | • Les eaux de surface ne se refroidissent pas en dessous de 4 °C, ce qui limite le taux de recyclage du P provenant des eaux profondes entre l'automne et le printemps |
| Réduction de l'apport annuel de nouveau P provenant du bassin hydrographique | | • Diminution du P disponible pour soutenir la nouvelle production | • Diminution du P disponible pour soutenir la nouvelle production |
| Dans les petits lacs dimictiques, la réduction de l'apport annuel de COD provenant du bassin hydrographique se traduit par une plus grande transparence de l'eau, un réchauffement accru des eaux profondes et, par conséquent, une thermocline plus profonde | • Augmentation du volume de la couche mélangée productive | • Augmentation du taux de recyclage du P dans les eaux de surface | |
| | | • La diminution du volume hypolimnique se traduit par des concentrations d'$O_2$ plus faibles dans les sédiments hypolimniques et donc par un accroissement du recyclage du P | |
| Dans les grands lacs dimictiques, la hausse des températures de l'air au printemps et en été et la diminution de la force des vents se traduit par la formation d'une thermocline moins profonde | • Réduction du volume de la couche mélangée productive | | • Diminution du taux de recyclage du P dans les eaux de surface |
| | | | • Une augmentation du volume hypolimnique se traduit par une hausse des taux d'$O_2$ dans les sédiments hypolimniques et réduit ainsi le recyclage du P |

Le tableau 5.7 résume les impacts possibles du changement climatique sur la productivité des lacs qui ont été indiqués dans la littérature existante. Pour ce qui est des petits lacs, de nombreux effets mènent à une augmentation de la disponibilité des nutriments; ainsi, certains de ces systèmes pourront réaliser les hausses de production possibles que permettent les saisons de croissance plus longues et plus chaudes (Porter *et al.*, 1996). Cependant, les données empiriques obtenues dans des petits lacs oligotrophes du Bouclier (Dillon et Molot, en préparation) suggèrent que, dans ces systèmes, les effets entraînant une restriction accrue des nutriments domineront. Dans les lacs plus grands, de nombreux facteurs limitent la disponibilité des nutriments; ainsi, la restriction, ou même l'inversion, des hausses de production potentielles semblent probables pour ces systèmes.

***Fleuves et rivières***

Nous n'avons pas pu trouver d'études qui traitaient explicitement des impacts du changement climatique sur la production globale de poissons dans les fleuves et les rivières. Toutefois, on peut se servir d'études sur les changements abiotiques attendus dans ces systèmes pour en déduire les effets possibles sur la production, et cela en se guidant sur les résultats obtenus dans le cadre des études portant sur des lacs.

Si l'on considère un scénario de changement climatique dans lequel on assiste à une hausse de la température de l'air associée à une réduction de l'écoulement et à un assèchement général des bassins hydrographiques, on peut s'attendre aux changements suivants : une élévation de la température de l'eau dans la partie amont des cours d'eau découlant d'une hausse de la température de l'eau souterraine (Meisner, 1990), une augmentation de la durée de la période sans glace, des crues printanières plus précoces et moins intenses, un débit réduit à partir de la fin du printemps jusqu'à l'automne et des températures de l'eau plus élevées allant de l'amont vers l'embouchure (Levy, 1992; Schindler *et al.*, 1996; Stefan et Sinokrot, 1993).

La réduction globale du volume d'eau, associée à la possibilité que l'écoulement devienne intermittent dans les cours d'eau plus petits, devrait entraîner des réductions de la production aquatique globale, mais cette réduction pourrait être atténuée par un accroissement de la production d'invertébrés (Morin et Bourassa, 1992) et d'autres organismes par suite de l'allongement et du réchauffement des saisons de croissance (Shuter et Ing, 1997).

***Changements dans la production chez les populations composées d'une seule espèce de poisson***

Laissons maintenant les effets du climat sur la productivité des écosystèmes pour examiner les effets du climat sur la production des populations. On trouve une vaste littérature empirique et théorique sur les espèces de poissons d'eau douce et une littérature principalement empirique sur les espèces marines. Nous mettrons l'accent de notre examen sur les modèles conceptuels mis au point dans la littérature ayant trait aux espèces d'eau douce. Ces modèles supposent que les différences de production particulières à une population dépendent fortement des différences dans le volume d'habitats thermiquement convenables disponible pour chaque population. On trouvera ci-après les bases de la définition d'un habitat thermiquement convenable.

Lorsqu'on étudie les poissons en laboratoire, la réaction à la température d'un grand nombre de leurs fonctions physiologiques (p. ex., respiration, consommation alimentaire, croissance) est forte, uniforme et reproductible (Coutant, 1977; Wismer et Christie, 1987). Ces observations correspondent à l'hypothèse selon laquelle cette réaction à la température est génétiquement programmée et qu'il y a peu de variation dans cette réaction entre les diverses populations d'une espèce, même si elles vivent dans des habitats tout à fait différents. Ces réactions typiques sont caractérisées par une crête bien définie à une température spécifique propre à l'espèce. À l'intérieur d'une plage très étroite de températures autour de la crête, la fonction physiologique est optimale. Dans le cas de nombreuses fonctions, les plages de températures optimales ont tendance à se chevaucher et à être centrées sur la température préférée de l'espèce (Brett, 1971; Hokanson, 1977; Regier *et al.,* 1996). Cette plage de températures optimales a été baptisée (Magnuson *et al*., 1979; Magnuson et DeStasio, 1997) la " niche thermique fondamentale ", que l'on définit comme la température médiane préférée de l'espèce ± 2 ºC : la plage de températures dans laquelle un poisson placé en laboratoire dans un réservoir d'essai sur les préférences passera les 2/3 du temps. La niche thermique détermine la plage de températures à l'intérieur de laquelle diverses fonctions optimales sont observées chez les poissons, telles que le taux de croissance optimum, l'éventail d'activités le plus étendu et la meilleure performance de nage (Magnuson *et al., 1*990).

En Amérique du Nord, de nombreux poissons d'eau douce appartiennent à trois grands groupes (ou guildes) dont les niches thermiques sont très différentes : poissons d'eau froide, autour de 15 ºC; poissons d'eau fraîche, aux alentours de 24 ºC; et les poissons d'eau tempérée, aux environs de 28 ºC (Hokanson, 1977). Reist (1994) a fait remarquer que les poissons adaptés à la vie dans le Grand Nord préfèrent des températures qui sont uniformément inférieures à 15 ºC et qui pourraient donc former un quatrième groupe arctique. Le concept de guilde thermique a fourni un cadre pratique pour la réalisation d'études comparatives sur les exigences des poissons des climats tempérés en matière de températures (Magnuson *et al.,* 1979; McCauley et Casselman, 1981; Magnuson et DeStasio, 1997) et a servi de base à plusieurs évaluations comparatives des effets potentiels du changement climatique sur les poissons d'eau douce tempérée (Magnuson et De Stasio, 1997; De Stasio *et al.,* 1996; Magnuson *et al.,* 1990; Mandrak, 1989; Meisner *et al.,* 1987; Stefan *et al.,* 1996).

Pour toute guilde, la variation annuelle de la température de l'eau en surface dans la plupart des lacs de l'Amérique du Nord (Shuter *et al.,* 1983) est beaucoup plus étendue que les 4 ºC de sa niche thermique. Puisque le rendement optimal des individus gravite autour de la disponibilité de températures comprises dans sa niche thermique, on pourrait s'attendre à observer de " grandes " réactions des poissons sauvages aux " petites " variations qui surviennent d'une année à l'autre dans la durée cumulative de séjour à l'intérieur ou près de cette plage de températures préférées. On dispose maintenant de preuves empiriques considérables selon lesquelles les différences de production particulières à une population dépendent effectivement, jusqu'à un certain point, des différences dans la quantité d'espace vital " thermiquement convenable ". Les études publiées se divisent en deux catégories :

i) Les démonstrations de l'existence de fortes corrélations entre les indices de productivité d'une population et les indices simples constitués par les températures du milieu; ces corrélations

peuvent être facilement interprétées en fonction de différences de quantité d'espace vital thermiquement convenable (p. ex., la longueur d'un cours d'eau sur laquelle les températures n'excèdent jamais la limite supérieure applicable à une espèce, ou guilde, particulière - Rahel *et al.,* 1996).

ii) Les démonstrations de l'existence de fortes corrélations entre les indices de productivité d'une population et les estimations explicites de la quantité d'espace vital thermiquement convenable, basées sur les caractéristiques physiologiques de l'espèces (c.-à-d. la plage de température nécessaire pour une croissance presque optimale, les besoins d'oxygène, les exigences en matière de substrat), la topographie et les " climats " physiques et chimiques des systèmes aquatiques particuliers occupés par chaque population étudiée (p. ex., Christie et Regier, 1988).

On peut trouver des exemples de ces deux genres d'études pour les systèmes d'eau douces et les systèmes marins (tableau 5.8).

Shuter et Meisner (1992) ont soutenu que le paradigme de " l'habitat thermiquement convenable " fournit un moyen pratique et relativement objectif de prévoir les impacts du changement climatique sur la production au niveau d'une population et au niveau des guildes thermiques. Plusieurs auteurs ont utilisé cette méthode de prévision pour divers systèmes (tableau 5.8). Il y a plus d'études sur les systèmes d'eau douce que sur les systèmes marins, mais celles qui ont été réalisées sur les systèmes marins sont suffisamment intéressantes pour encourager d'autres travaux dans le domaine (Frank *et al.,* 1990; Reddin et Friedland, 1993).

Les poissons diadromes font l'objet de pêches économiquement et socialement importantes dans la plupart des régions du pays. Ces poissons pourraient être relativement sensibles aux changements climatiques parce qu'ils ont besoin d'au moins deux, et jusqu'à quatre, habitats aquatiques distincts pour compléter leur cycle vital (tableau 5.9). Chacun des habitats utilisés par une espèce réagira différemment au changement climatique et, à chaque stade biologique, l'espèce fera l'expérience de différentes sortes d'impacts (Levy, 1992). La réaction globale d'une population particulière à cet ensemble complexe de changements environnementaux est également susceptible d'être complexe et tout à fait imprévisible. En outre, l'utilisation efficace de ces habitats multiples est le résultat d'une certaine adaptation antérieure de chaque population, qui est typique de ces habitats, à la séquence saisonnière des changements dans la température de l'eau, dans les débits des rivières et dans les courants océaniques. Le changement climatique aura tendance à perturber cette séquence et pourrait donc affecter la capacité d'une population d'utiliser au mieux son ensemble d'habitats habituels (Levy, 1992). En plus des salmonidés du Pacifique décrits au tableau 5.9, les autres espèces diadromes qui font l'objet de pêches importantes sont le saumon de l'Atlantique, l'anguille, l'esturgeon et l'omble chevalier.

**Tableau 5.8 Résumé des études qui démontrent soit un lien entre les mesures de la production d'une population et l'habitat thermiquement convenable ou qui utilisent ce genre de lien pour prévoir les effets du changement climatique. (RSP = rendement soutenu des pêches)**

| Système | Démonstration empirique | Prévision |
|---|---|---|
| Eau douce, lacs | grand corégone, doré jaune, grand brochet : Le RSP augmente pour atteindre un sommet, puis diminue en fonction des réductions de la température annuelle moyenne de l'air; au rendement maximum, la température est particulière à l'espèce (Schlesinger et Regier, 1983) | grand corégone, doré jaune, grand brochet dans l'est du Canada : le réchauffement climatique déplace la région de productivité maximum d'environ 600 km vers le nord (Minns et Moore, 1992) |
| | touladi, doré jaune, grand brochet et corégone de lac : le RSP augmente en fonction de la quantité d'habitats thermiquement convenables, que l'on définit comme une mesure, pondérée en fonction du temps, de la quantité absolue d'espace vital disponible annuellement où les températures de l'eau se situent dans une plage de 4 °C incluant la température de croissance optimale particulière à l'espèce (Christie et Regier, 1988) | poissons d'eau froide, fraîche et tempérée dans les lacs du Minnesota : le réchauffement climatique entraîne une perte accrue d'habitats thermiquement convenables pour les poissons d'eau froide dans les lacs eutrophes; les gains les plus importants ont lieu dans les lacs oligotrophes en faveur des poissons d'eau fraîche et tempérée (Stefan *et al.*, 1996; Magnuson et DeStasio, 1997) |
| Eau douce, cours d'eau | salmonidés d'eau froide : la biomasse dans les cours d'eau de l'Ontario varie en fonction de la température estivale de l'eau (Bowlby et Roff, 1986) | poissons d'eau froide, fraîche et tempérée des États-Unis : le réchauffement climatique entraîne une réduction d'environ 50 % des habitats thermiquement convenables pour les poissons d'eau froide et fraîche; dans le cas des poissons d'eau tempérée, l'habitat diminue pour certaines espèces et augmente pour d'autres (Eaton et Scheller, 1996) |
| | | poissons d'eau froide au Wyoming : le réchauffement climatique entraîne une réduction de 16 à 69 % des habitats thermiquement convenables (Rahel *et al.*, 1996) |
| Marin | saumon de l'Atlantique : l'abondance du saumon de l'Atlantique au printemps et en été varie en fonction de la quantité d'habitats refuges thermiquement convenables en hiver dans la mer du Labrador (Friedland *et al.*, 1993; Reddin et Friedland, 1993) | |
| | morue de l'Atlantique : une étude comparative de 20 populations de l'Atlantique Nord révèle des liens positifs entre le taux de croissance des populations et la température moyenne de l'eau dans l'habitat de ces populations (Myers *et al.*, 1997) | |

**Tableau 5.9 Utilisation des habitats durant le cycle vital de salmonidés communs du Pacifique** (d'après Pearcy, 1992)

La quantité de temps passé dans chaque type d'habitat varie beaucoup à l'intérieur d'une population et entre les populations. Le tableau présente les limites approximatives des gammes de variation et relève les plus grandes différences interspécifiques (p. ex., le besoin unique pour le saumon rouge de résider dans un lac tôt au cours de son développement).

| **Espèce** | **Habitat** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Rivière | Lac | Estuaire/milieu côtier marin | Milieu marin extracôtier |
| Saumon rouge | jours ou mois | jours-mois | jours | jusqu'à 5 ans |
| Saumon coho | 1 à 2 ans le plus souvent | - | jours | jusqu'à 1,5 an |
| Saumon quinnat | quelques mois jusqu'à 2 ans | - | des jours à des mois | jusqu'à 6 ans |
| Saumon kéta | jours ou semaines | - | jours | jusqu'à 4 ans |
| Saumon rose | jours ou semaines | - | jours | jusqu'à 1,5 an |

Les populations de l'omble chevalier ont tendance à être anadromes (c.-à-d. qu'elles passent la majeure partie de leur cycle vital en mer et frayent en eau douce) et à être plus productives dans les zones plus tempérées des basses latitudes. Dans les zones plus fraîches des latitudes plus élevées, elles sont souvent non anadromes (cycle biologique lacustre) et moins productives. Par conséquent, le réchauffement climatique pourrait favoriser une modification du cycle biologique qui passerait de non anadrome à anadrome avec un accroissement concomitant des possibilités de pêche dû à la production nette accrue typique des populations anadromes (Reist, comm. pers., 1997).

Les changements dans la distribution spatiale des proies et des prédateurs principaux découlant du climat peuvent également exercer un gros effet sur la productivité d'une population - en effet, la hausse de la densité locale de ses prédateurs et la baisse de la densité locale de ses proies peuvent toutes deux entraîner une chute de la production globale de la population. Les populations marines sont peut-être plus vulnérable à ces effets parce que l'absence de barrières physiques dans l'environnement marin permet une redistribution spatiale rapide face aux changements environnementaux. Parmi les changements survenus dans l'intensité de prédation découlant de la redistribution spatiale d'un prédateur due au climat figurent l'accroissement de la prédation, dans le Pacifique, des maquereaux sur les salmonidés et l'augmentation de la prédation de la merluche sur le hareng (Beamish, 1995).

***Variation à court terme de la distribution des membres d'une population***

Chaque poisson choisit une zone habitable en fonction des températures, des concentrations d'oxygène et de la disponibilité des aliments. Les poissons modifieront rapidement leur distribution spatiale en réaction à des changements touchant ces facteurs ou d'autres. Dans un examen exhaustif récent des études portant sur les poissons d'eau douce vivant dans des lacs tempérés, Magnuson et DeStasio (1997) montrent que :

i) Les poissons maintiennent leurs préférences thermiques toute l'année et ont tendance à choisir les températures les plus chaudes disponibles, pourvu que la limite supérieure de leur niche thermique ne soit pas dépassée.

ii) La sélection n'est pas fondée uniquement sur la température; elle peut être modifiée par des facteurs abiotiques comme la concentration d'oxygène et le pH (p. ex., les faibles concentrations sont évitées) et par des facteurs biotiques comme l'abondance de proies (attraction) et l'abondance de prédateurs (éloignement).

(iii) Chez les populations lacustres, on observe trois types d'utilisation de l'habitat :
- les poissons occupent leur niche thermique quand ces températures sont fréquentes dans le lac;
- les poissons occupent les zones de températures les plus disponibles, même si ces températures ne font pas partie de leur niche thermique;
- les poissons présentent souvent des distributions bimodales, ce qui suggère soit des différences liées à l'âge, soit des sorties à l'extérieur de leur niche thermique pour se nourrir;

iv) Lorsque la tendance à chercher un habitat thermique optimum est alliée à la présence d'une grande variation d'une année ou d'un lac à l'autre de la disponibilité de cet habitat, on observe souvent que les populations d'une même espèce vivent dans des environnements thermiques différents selon les lacs et selon les années.

Dans les cours d'eau, des principes semblables s'appliquent. Il est particulièrement intéressant de constater qu'on a souvent observé (Meisner, 1990; Regier et Holmes, 1991; Rahel *et al.,* 1996) que les poissons d'eau froide s'efforceront d'éviter les températures qui excèdent la limite supérieure de leur niche thermique en cherchant refuge près des sources d'eau plus froide comme l'eau souterraine dans les zones d'infiltration, les cours supérieurs des rivières, les rivières d'altitude plus élevée et l'eau de fonte des glaciers.

Il existe de nombreux exemples de changements rapides dans la distribution des populations de poissons marins qui suggèrent que des principes semblables s'appliquent, au moins chez certaines espèces, par exemple, la recherche en temps réel d'isothermes de températures de surface par diverses espèces de saumons au cours de la phase marine de leur cycle vital (Welch *et al.,* 1995); la migration vers le nord de l'abondance de la merluche en réaction aux températures plus élevées de la mer au large de la côte ouest de l'île de Vancouver (Ware et McFarlane, 1995); la recherche de l'isotherme 7 ºC par le maquereau de l'Atlantique durant sa migration printanière (Loucks, 1981, tel que cité dans Frank *et al.,* 1988); le déplacement vers le sud et la concentration à cet endroit de la morue de l'Atlantique de 1990 à 1992 (Atkinson *et al.,* 1997) et l'absence d'espèces migratrices d'eau tempérée (p. ex., maquereau, calmar et balaou) dans l'Atlantique Nord-ouest durant les périodes froides des années 90 (Montevecchi et Myers, 1995).

Dans les systèmes marins, les courants océaniques de même que les températures sont des causes importantes de changements de la distribution et, indirectement, des taux de mortalité qui peuvent accompagner les premiers (Frank *et al.,* 1990; Mann et Lazier, 1996). Les variations des

caractéristiques locales ou régionales des courants peuvent souvent être liées aux changements climatiques. Par exemple, lorsque la dépression des Aléoutiennes est forte, les changements dans les régimes des courants et des températures au large de l'île de Vancouver et de Sitka, dans le nord de la Colombie-Britannique, entraînent des changements des voies de migration des stocks de saumons rouges qui retournent vers le Fraser (Xie et Hsieh, 1989; Thomson *et al.,* 1992), la Nass et la Skeena (Hamilton et Mysak, 1986) en Colombie-Britannique. Frank *et al.* (1990) supposent que, dans la région de l'Atlantique, le réchauffement climatique mènera à une diminution de la fréquence des anomalies locales circulaires des courants. Ces configurations des courants ont tendance à entraîner les larves de poissons vers le large, dans l'eau plus profonde, où elles meurent. Ainsi, une diminution de la fréquence de ces configurations favoriserait une meilleure survie des stades larvaires de nombreuses espèces de poissons dans la région de l'Atlantique.

***Changements à long terme des limites de distribution des espèces***

Les modèles de tolérance thermique et de comportement particuliers à une espèce peuvent interagir avec le climat pour établir des limites à la distribution zoogéographique d'une espèce de poissons. Shuter et Post (1990) ont décrit en détail, pour l'achigan à petite bouche et la perchaude, un ensemble de mécanismes capables d'établir la limite de distribution nord d'une espèce. Les impacts potentiels du réchauffement climatique sur ces limites peuvent être catégorisés comme suit :

i) Les limites nord peuvent s'éloigner ou les limites sud peuvent se rapprocher.
ii) Un territoire peut prendre de l'expansion lorsque le réchauffement est supérieur dans le nord et qu'il permet à la limite nord d'être repoussée sur une distance supérieure à la distance de rapprochement de la limite sud; il peut y avoir aussi une expansion vers l'est ou vers l'ouest si l'extension de la limite nord élimine une contrainte physique à l'expansion est-ouest (p. ex., l'invasion des Grands Lacs par le malachigan en provenance de la rivière Hudson - Johnson et Evans, 1990).
iii) Un territoire peut rétrécir, ou se contracter, si la limite nord est fixée par un obstacle physique (p. ex., la ligne de côte arctique pour le touladi et le grand corégone) et que la limite sud se rapproche.
iv) Un territoire peut se déplacer vers le nord si les deux limites sont fixées par des conditions climatiques et substantiellement touchées toutes les deux par le réchauffement.

Diverses études empiriques ont montré l'importance du climat dans l'établissement des limites zoogéoraphiques de certaines espèces de poissons (Mandrak, 1989; Mandrak, 1995; Radforth, 1944; Shuter et Post, 1990), et l'on s'est servi de ces résultats et d'autres pour prévoir les impacts du réchauffement climatique sur leurs distributions (tableau 5.10).

## Tableau 5.10 Résumé des changements des limites zoogéographiques observées/prévues/possibles des espèces de poissons

| Changement de la distribution | Pacifique | Eau douce | Atlantique |
|---|---|---|---|
| Extension, limite nord | • Plie de Californie (Beamish, 1997) | • Perche, achigan : 500 km, de la limite actuelle sur le Canada avec une hausse de 4 ºC de la moy. annuelle de la temp. de l'air (Shuter et Post, 1990)<br>• Achigan, carpe : 500 km de la limite actuelle sur l'Ontario avec une hausse de 5 ºC de la moy. annuelle de la temp. de l'air (Minns et Moore, 1995)<br>• Cyprins (8 esp.), perche-soleil (7 esp.), carpe noire (3 esp.), vairons (3 esp.) : extension dans le bassin des Grands Lacs possible avec un réchauffement (Mandrak, 1989) | • Maquereau : limite nord de la migration du printemps suit l'isotherme 7 ºC (Frank *et al.* 1988); déplacement vers le nord avec le réchauffement des années 40(Taylor *et al*., 1957)<br>• Crabe vert : observé remontant vers le nord avec le réchauffement des années 40 (Taylor *et al.*, 1957) |
| Rétraction, limite sud | • Saumon rose (Beamish, 1997)<br>• Hareng (Schweigert, 1995)<br>• Sole de roche (Beamish, 1997)<br>• Morue (Beamish, 1997) | • Corégone, grand brochet,doré : récolte durable prévue avec le réchauffement climatique, suggéré par le déplacement vers le nord (Minns et Moore, 1992)<br>• Touladi : prévision des refuges hypolimniques diminuant et niveaux de $O_2$ plus bas, suggéré pour les petits lacs (Stefan et Hondso; Schindler *et al*., 1990, 1996) | • Caplan :limite plus au nord avec le réchauffement des années 70 (Frank *et al*., 1996); période précédée et suivie d'une extension vers le sud avec le refroidissement des années 60 et 90 (Frank *et al*., 1996; Drinkwater, 1997) |
| Déplacement complet de la zone | • Saumon rouge, passe au nord(Beamish, 1997) | | • Zone de la morue en retrait, les limites nord et sud se déplaçant entre 1970-1994 (Brown *et al*., 1996) |
| Barrière relâchée et expansion de la zone | | • Perche blanche : invasion et dispersion dans le bassin des Grands Lacs avec le réchauffement de la rivière Hudson et du canal de chalands Érié dans les années 40 brisant la barrière thermique et ouvrant l'accès (Johnson et Evans, 1990) | • Bar d'Amérique : réchauffement pouvant permettre l'invasion du bassin des Grands Lacs et l'expansion vers l'est (Coutant, 1990) |

Lorsqu'on examine les effets potentiels du changement climatique sur les distributions zoogéographiques, il faut tenir compte d'une distinction importante entre les systèmes d'eau douce et marins. Dans le cas des premiers, les contraintes physiques (p. ex., les zones terrestres non traversées par des cours d'eau, les caractéristiques du drainage, les chutes d'eau dans les rivières, etc.) jouent un grand rôle dans la détermination de l'emplacement des limites zoogéographiques (Shuter et Post, 1990) et dans la vitesse à laquelle une espèce pourra réagir à l'apparition d'une limite déterminée par le climat. Par exemple, dans les Grandes Plaines des États-Unis et du Canada, de nombreux cours d'eau ont une orientation est-ouest dans les régions où il y a peu de relief. En pareil cas, les espèces d'eau froide n'ont que peu de possibilités d'éviter les eaux qui se réchauffent en se retirant soit vers le nord, soit vers de plus hautes élévations (Matthews et Zimmerman, 1990; Rahel *et al.*, 1996). Ainsi, les populations d'eau froide qui habitent ces régions sont peut-être beaucoup plus vulnérables au réchauffement que celles qui vivent dans les régions très accidentées de la Colombie-Britannique.

Dans les systèmes arctiques, la distribution de certaines espèces sera fortement touchée par les changements de la distribution saisonnière de la glace. Les mammifères marins migrateurs étendront leurs territoires estivaux vers le nord et vers l'ouest à mesure que la glace deviendra plus mince, et sa distribution plus saisonnière. Les mammifères non migrateurs (p. ex., le phoque annelé, l'ours blanc) verront peut-être leur nombre réduit aux bordures sud de leurs territoires (p. ex., la baie d'Hudson) et étendront peut-être leurs territoires vers le nord, vers la banquise polaire, à mesure que les zones des glaces saisonnières s'étendront vers le nord. De plus, le réchauffement général peut entraîner un rétrécissement des territoires des espèces de poissons adaptées à l'Arctique (p. ex., l'omble chevalier).

Dans les systèmes marins, les contraintes physiques ont des effets moins importants; il n'est donc pas surprenant d'observer des changements de distribution relativement rapides en réaction aux variations du climat (Brown *et al.*, 1996), et l'on peut supposer que de nombreuses limites nordiques de la distribution sont déterminées par celui-ci (p. ex., la morue du Groenland et la morue de l'Arctique et du Nord; le maquereau de la côte du Pacifique et l'impact de ce changement sur les stocks de salmonidés comme le saumon du Pacifique - surtout que la réapparition récente des salmonidés dans l'Arctique coïncide avec le long épisode El Niño de 1990 à 1995 - voir la contribution de J.D. Reist).

Outre qu'il peut modifier les territoires d'espèces particulières, le réchauffement climatique peut finalement se traduire par une augmentation du nombre d'espèces de poissons trouvées dans des plans d'eau particuliers. Mandrak (1995) ainsi que Minns et Moore (1985) ont trouvé que le nombre d'espèces de poissons qui vivent dans les lacs de l'Ontario s'est accru avec la température annuelle moyenne de l'air. En se fondant sur ces résultats, Minns et Moore (1995) prévoient qu'une augmentation de 4,5 ºC de la température annuelle moyenne de l'air permettrait au nombre d'espèces de poissons trouvées dans un lac moyen de l'Ontario (trois à six espèces) de s'accroître de trois environ. La réalisation de cet accroissement potentiel de la diversité dépendrait bien sûr de l'absence d'obstacles physiques pouvant empêcher les invasions par de nouvelles espèces.

***Observation de salmonidés du Pacifique dans l'Arctique***
***par J.D. Reist***

*Des saumons du Pacifique ont été observés à l'occasion dans l'ouest de l'Arctique canadien; ces observations peu fréquentes ont été signalées à l'est jusqu'à l'inlet Bathurst (Craig et Haldorson, 1986). Ces données ont trait au saumon quinnat (O. tshawytscha), au saumon kéta (O. keta), au saumon rose (O. gorbuscha) et au saumon rouge (O. nerka) (Craig et Haldorson, 1986). Le saumon coho (O. kisutch) avait déjà été observé aussi loin à l'est que Prudhoe Bay, Alaska (Craig et Haldorson, 1986). Parmi les données plus récentes, il y a : 1) saumon kéta - une petite montaison sur la rivière Liard (effluent du Mackenzie) dans le nord de la Colombie-Britannique (McLeod et O'Neil, 1983); et un seul individu provenant du ruisseau Cache (rivière Big Fish, 68,17 N, 136,21°O) en 1986 (Reist, 1987). 2) saumon coho - un mâle adulte en provenance du Grand lac de l'Ours en 1987 (Reist, données inédites) et des rapports sur les connaissances traditionnelles traitant d'une montaison possible dans le lac. 3) saumon rouge (kokanee) - Grand lac des Esclaves en 1991 (Reist, données inédites).*

*Outre les données ci-dessus, un certain nombre de saumons rouges ont été observés dans plusieurs régions de l'ouest de I'Arctique canadien en 1993. Des pêcheurs autochtones ainsi que des employés du ministère des Pêches et des Océans ont vu de ces poissons près de Sachs Harbour et de Holman et dans le bassin du Mackenzie. La présence d'un nombre croissant d'observations occasionnelles ainsi que les montaisons possibles suggèrent que la distribution géographique de ces poissons est en train de changer, peut-être en réaction à des tendances du changement ou de la variabilité climatiques associées à un tel changement.*

En plus de ces impacts sur les limites zoogéographiques d'une espèce, le climat peut être associé à une variation systématique des caractéristiques du cycle biologique des populations d'une espèce dans tout son territoire. En ce qui concerne diverses espèces d'eau douce (doré jaune : Beverton, 1987; perchaude et achigan à petite bouche : Shuter et Post, 1990; truite de mer : Jonsson et L'Abee-Lund, 1993) et des espèces marines (les myes : Appeldoorn, 1995; la morue de l'Atlantique : Myers et al, 1996; Drinkwater, 1997), les populations qui vivent dans les habitats plus froids situés à des latitudes plus hautes présentent des taux de croissance plus lents, des taux de mortalité naturelle plus faibles et des âges de maturité plus tardifs. Par conséquent, l'extension ou la contraction de zones climatiques particulières pourraient être accompagnées de changements dans les caractéristiques du cycle biologique des stocks " typiques " d'une région géographique particulière. Bien que la façon dont ces changements pourraient influer sur la répartition de la production disponible de l'écosystème entre les espèces de poissons ne soit pas claire, elle aura des conséquences importantes pour les stratégies de récolte, car l'ensemble des caractéristiques du cycle biologique qui sont typiques des habitats d'eau froide confèrent à leur possesseur une vulnérabilité excessive à l'exploitation (Roberts, 1997).

L'abondance des populations qui vivent en bordure du territoire zoogéographique de leur espèce présente souvent une plus grande variation d'une année à l'autre que celle des populations qui vivent près du centre (Shuter et Post, 1990; Myers, 1991). Ainsi, lorsqu'une limite sud est repoussée vers le nord, les populations qui jouissaient historiquement d'une abondance relativement stable peuvent devenir plus variables avec le temps.

Dans les systèmes d'eau douce, la diversité des espèces subit l'effet de la diversité des guildes thermiques, qui, elle, est fonction de l'hétérogénéité thermique. Dans le sud du Canada, le réchauffement aura tendance à diminuer l'hétérogénéité thermique de certains de ces systèmes. Par conséquent, il est possible que le réchauffement climatique puisse mener à des réductions de la diversité des espèces dans certains systèmes. Dans les lacs dimictiques, la stratification crée et maintient une diversité thermique et préservera donc la diversité des guildes en cas de réchauffement climatique. Dans les cours d'eau, la stabilité des températures des eaux d'amont et la présence de zones d'infiltration d'eau souterraine auront aussi tendance à préserver la diversité des guildes (Meisner, 1990). Cependant, dans le nord, un réchauffement modéré augmentera la diversité thermique dans de nombreux lacs en les faisant se stratifier en été (Meyer *et al.*, 1994) - la diversité des espèces pourrait augmenter dans ces systèmes.

***Interactions avec les effets d'autres stress et réactions d'autres secteurs***

Changement climatique en tant que facteur d'atténuation ou d'intensification des répercussions sur les poissons d'autres stress touchant les écosystèmes

Selon la plupart des études (Firth et Fisher, 1991; Carpenter *et al.*, 1992), les impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques intensifieront probablement les répercussions des stress existants (tableau 5.11). De nombreuses agressions non climatiques continuent d'influer sur un grand nombre de populations de poissons dans l'ensemble du pays. En ce qui concerne un bon nombre de populations, l'exploitation est égale ou supérieure aux niveaux durables. On ne s'est que partiellement penché sur les changements de la qualité de l'eau associés au transport à distance des acides soufrés et azotés et des contaminants organiques volatils, et nombre de lacs de l'est du Canada sont encore acides. Le taux d'invasion, intentionnelle ou accidentelle, d'espèces exotiques s'accroît, ce qui entraîne des conséquences graves pour les écosystèmes (p. ex., la moule zébrée dans les Grands Lacs). La destruction et la modification de l'habitat se poursuivent là où les développements humains sont concentrés. L'augmentation de l'eutrophisation des eaux douces a été mise en échec au cours des dernières décennies, mais il se peut que la croissance de la population dans de nombreuses régions urbaines soit en train de miner la capacité autrefois améliorée des usines de traitement des eaux usées. L'ampleur et la vitesse de tous les stress non climatiques actuels touchant les écosystèmes se sont accrues de façon marquée au cours du XX$^{e}$ siècle.

**Tableau 5.11 Interactions potentielles entre les stress existants sur les écosystèmes et les éléments attendus du changement climatique (COD = carbone organique dissous, CO = carbone organique; UV = rayons ultraviolets)**

| Stress sur les écosystèmes | Élément du changement climatique | Impacts sur les liens | Références |
|---|---|---|---|
| Appauvrissement de l'ozone - rayonnement UV | • Écoulement réduit et assèchement des terres humides hautes | • Réduction du COD et de la couleur, accroissement des UV et accroissement des dommages au biote | Williamson *et al.*, 1996; Fee *et al.*, 1996; Clair et Ehrman 1996; Vinebrooke et Leavitt, 1996 |
| Dépôt d'acide soufré | • Écoulement réduit | • Acidité et concentrations des autres produits chimiques accrues | Schindler *et al.*, 1996 |
| Contaminants | • Hausse des températures | • Production accrue de méthyl-Hg, augmentation de la mobilité du CO et du taux de transfert dans la chaîne alimentaire | Michmerhuizen *et al.*, 1996 |
| Invasion d'espèces exotiques | • Hausse des températures | • Plus grandes possibilités d'invasion d'espèces provenant de latitudes plus basses | Mandrak, 1989 |
| Détérioration et perte d'habitats | • Hausse ou baisse des niveaux d'eau<br>• Niveaux de l'écoulement et saisons modifiés | • Perte d'habitats en eaux peu profondes due à un durcissement accru de la surface des terres et aux obstacles à l'eau dans les régions densément peuplées | Minns *et al.*, 1995 |
| Eutrophisation | • Diminution du ruissellement<br>• Hausse des températures | • Élévation des concentrations de nutriments<br>• Accroissement des proliférations d'algues et réduction accrue de l'oxygène hypolimnique | Schindler *et al.*, 1996 |
| Surexploitation | • Hausse des températures | • Espèces fécondes à croissance rapide favorisées au détriment des espèces à croissance lente et peu fécondes | Roberts, 1997 |
| Structure et fonction | • Température changeante<br>• Régime de brassage des lacs modifié<br>• Réduction du débit des cours d'eau | • Changements dans la richesse et la composition des espèces du zooplancton<br>• Modification du cycle des nutriments et des taux de bioproduction<br>• Changements dans la chimie de l'eau | Stemberger *et al.*, 1996<br>Chen et Folt, 1996<br>Porter *et al.*, 1996<br>Schindler *et al.*, 1996<br>Webster *et al.*, 1996 |

Les manifestations des agressions non climatiques sur les écosystèmes et leurs répercussions sur les poissons et les pêches ont évolué dans les conditions climatiques normales qui ont prévalu au cours du siècle. Si l'on s'écarte beaucoup de ces normes (plus chaud ou plus froid, plus humide ou plus sec), leurs répercussions auront tendance à s'intensifier. Par exemple, une tendance générale vers des conditions plus chaudes et plus sèches se traduisant par des taux d'écoulement et des niveaux d'eau réduits dans les rivières et les lacs entraînera presque certainement une augmentation de la concentration d'une large gamme de contaminants, si l'on suppose qu'il n'y aura aucun changement dans les taux de rejet. De même, l'incertitude accrue des conditions environnementales qui déterminent la productivité des océans intensifiera le problème de la gestion de l'exploitation des populations marines à des niveaux durables.

Changement climatique en tant que facteur qui entraîne d'autres secteurs de la société à menacer les poissons

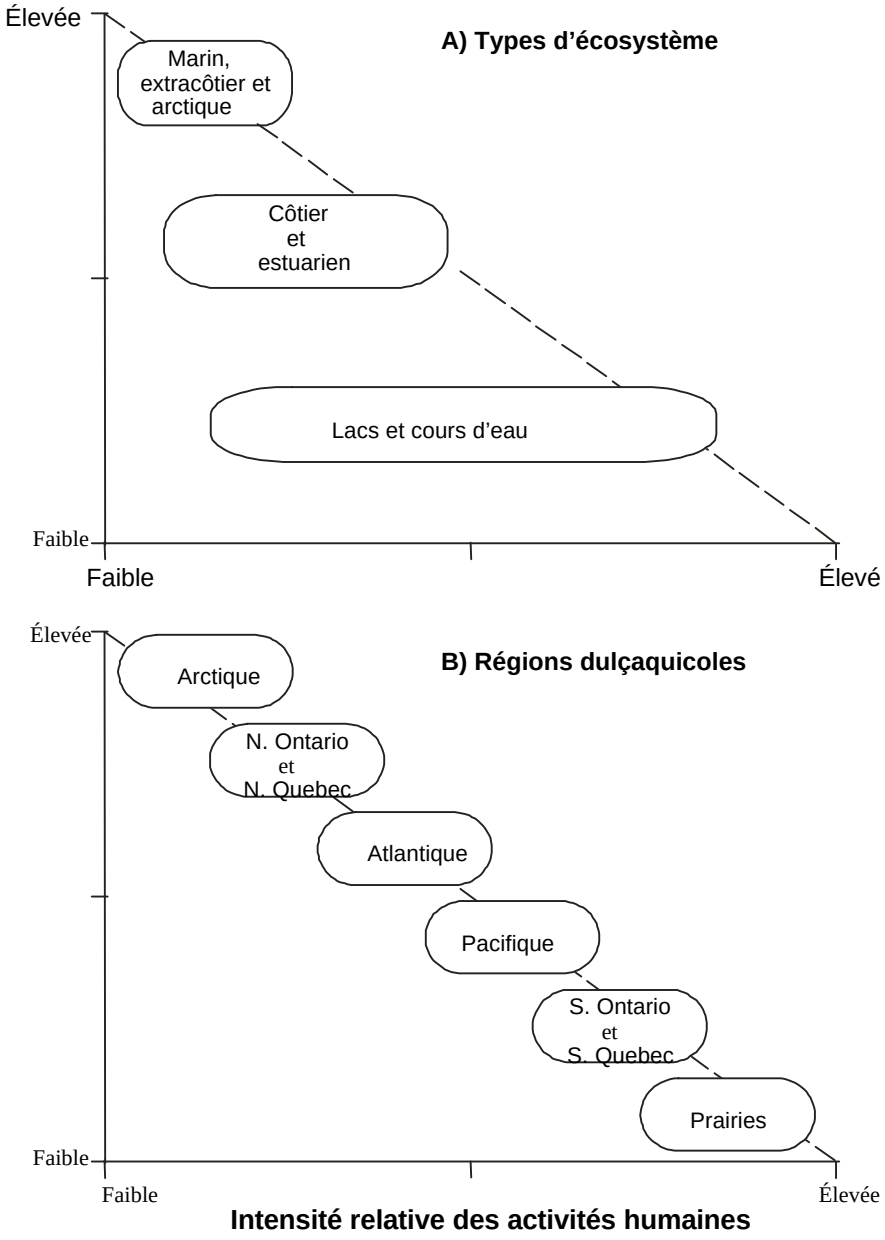
Les événements passés ont montré que les utilisations de l'eau par l'homme, nuisibles aux poissons, prennent souvent le pas sur la conservation et la protection de l'habitat nécessaire au maintien de la production naturelle de poissons. À mesure que le changement climatique exercera de nouvelles pressions sur les intérêts d'autres secteurs, les poissons et les pêches feront face à d'autres répercussions. Les avantages économiques immédiats des pêches sont perçus comme petits en comparaison des avantages retirés de l'hydroélectricité, de l'irrigation, de la navigation et du contrôle de la qualité de l'eau (Ford et Thornton, 1991). Ces conflits seront particulièrement aigus pour ce qui est des systèmes d'eau douce situés près des centres de population humaine (p. ex., le bassin hydrographique des Grands Lacs et la vallée de l'Okanagan en Colombie-Britannique), où la compétition entre les humains et les poissons pour l'eau et l'habitat pourrait bien être exacerbée par le changement climatique (Magnuson *et al.,* 1996).

Dans l'ensemble, il y aura un compromis entre l'importance relative des impacts directs et indirects du changement climatique sur les poissons et les pêches (figure 5.3). Aux endroits où la concentration et l'intensité des activités humaines sont faibles, une plus grande proportion des répercussions découleront directement du climat. Là où les activités humaines existantes sont déjà intenses, les répercussions indirectes dues à l'adaptation des humains à d'autres secteurs seront probablement plus grandes. Il est utile de faire cette distinction, car les effets indirects des réactions d'adaptation de l'homme dans d'autres secteurs peuvent être gérés ou atténués.

Il n'est pas si facile de composer avec les impacts qui découlent directement du climat. L'importance relative des impacts directs et indirects du changement climatique variera selon les types d'écosystème et présentera de fortes différences régionales (figure 5.3). Les impacts directs domineront dans les zones extracôtières marines et arctiques, alors que les zones côtières et estuariennes, ainsi que les lacs et les rivières, présenteront une gamme plus étendue d'effets indirects, selon l'intensité locale des activités humaines (figure 5.3A). C'est dans les systèmes d'eau douce que les différences régionales seront les plus grandes quant à l'importance relative des impacts directs et indirects (figure 5.3B). Dans les Prairies, l'utilisation de l'eau pour l'irrigation est intense, et l'on s'attend à ce que le changement climatique en réduise l'approvisionnement. La demande en eau accrue du secteur agricole pourrait bien avoir sur les pêches des Prairies une incidence plus grande que les effets directs du changement climatique lui-même.

Dans l'ensemble de l'Amérique du Nord, les réductions de l'écoulement influeront négativement sur la production hydroélectrique, ce qui créera une demande en nouveaux barrages (p. ex., la région de la baie James et Churchill Falls au Labrador). La perturbation hydrologique causée par ce genre de projets pourrait avoir de très sérieuses répercussions pour les pêches en eau douce et les pêches marines côtières.

**Figure 5.3** **Importance relative des impacts directs et indirects du changement climatique pour différents écosystèmes aquatiques et différentes régions géographiques du Canada**



## IMPACT SUR LES PÊCHES

L'envergure relative des différents écosystèmes aquatiques varie selon les régions du Canada. Pour ce qui est de la superficie :

i) les écosystèmes lacustres ont deux fois la taille des eaux du Pacifique situées à l'intérieur de la limite de 200 milles (figure 5.1);

ii) les écosystèmes lacustres sont plus abondants dans le centre du Canada et moins en Colombie-Britannique, en Alberta, dans les Territoires du Nord-Ouest et au Nouveau-Brunswick (figure 5.2);

iii) les systèmes d'eau vive (rivières et cours d'eau) sont plus abondants en Colombie-Britannique et dans la région de l'Atlantique et moins dans les Prairies (figure 5.2);

iv) l'écoulement d'eau douce dans les eaux côtières de l'Arctique et de l'Atlantique est beaucoup plus important que dans les eaux du Pacifique (figure 5.1); par conséquent, c'est probablement dans ces eaux que les modifications de l'écoulement entraînées par le changement climatique exerceront les effets les plus prononcés.

L'importance économique des différentes sortes de pêches varie également considérablement. D'après la biomasse au débarquement, la pêche commerciale est énorme par rapport à la pêche récréative (1 000 kt par rapport à 70 kt), et la pêche commerciale de l'Atlantique représente le double de celle du Pacifique, les deux étant beaucoup plus importantes que la pêche commerciale en eau douce (tableau 5.2). Ainsi, les impacts du climat sur la récolte commerciale de poissons seront probablement régis par les répercussions biologiques exercées sur les populations marines. Mais, selon la valeur économique, la pêche récréative, pratiquée surtout en eau douce, est en gros deux fois plus importante que la pêche commerciale (tableau 5.4). Par conséquent, les effets du climat sur la simple valeur en dollar des pêches canadiennes seront régis par les changements qui toucheront les populations d'eau douce et les populations marines.

Nous avons résumé par région, dans le tableau 5.12, les répercussions biologiques importantes en supposant que le changement climatique se manifestera par des températures de l'air plus élevées, par des bassins hydrographiques plus secs et par des niveaux de la mer plus élevés, et les conséquences résultantes sur les pêches sont résumées au tableau 5.13.

## Tableau 5.12 Exemples des répercussions biologiques du changement climatique par région

| Impact | Pacifique | Prairies | Arctique | Ontario/Québec | Atlantique |
|---|---|---|---|---|---|
| Changement dans la production globale de poissons | Zones marines :<br>- diminution dans les régions côtières où l'effet de l'écoulement d'eau douce est important<br>- changement potentiel des caractéristiques de la variabilité décennale associée à la dépression des Aléoutiennes<br><br>Eau douce :<br>- diminution de la production due à la baisse des niveaux d'eau | Eau douce :<br>- diminution de la production due à la baisse des niveaux d'eau | Zones marines et d'eau douce :<br>- Hausses possibles de la production dues à une saison de croissance plus longue et plus chaude; vu la couverture glacielle réduite, la recirculation des nutriments sera plus intense en raison de la turbulence due au vent; la diversité des espèces de poissons sera accrue. | Eau douce :<br>- diminution due à la baisse des niveaux d'eau<br>- accroissement dans les petits lacs dû à la hausse de la température et de la disponibilité des nutriments<br>- aucun changement ou diminution dans les plus grands lacs, car la disponibilité des nutriments ne peut suivre le rythme de la hausse de température | Zones marines :<br>- diminution dans les régions côtières où l'effet de l'écoulement d'eau douce est important;<br>- changement potentiel des caractéristiques de la variabilité décennale associée à l'oscillation nord-atlantique |
| Changement dans la production d'une population particulière | Eau douce :<br>- hausses de la production potentielle chez les espèces d'eau tempérée et fraîche; baisses de production chez les espèces d'eau froide (en particulier les saumons coho et rouge) à cause des changements dans les caractéristiques de l'écoulement saisonnier dans les rivières; réductions générales du débit des rivières; réductions des zones d'alimentation marines | - augmentations générales chez les poissons d'eau froide, augmentations générales chez les poissons d'eau tempérée | - augmentations générales chez les poissons d'eau tempérée, fraîche et froide; chutes possibles chez les membres de la guilde thermique arctique | -diminutions chez les poissons d'eau froide, surtout dans les rivières et les petits lacs monomictiques<br><br>- augmentations chez les poissons d'eau tempérée et fraîche, surtout dans les petits lacs oligotrophes | Zones marines :<br>-diminution chez les populations dont la productivité dépend fortement de l'écoulement d'eau douce provenant de l'estuaire du Saint-Laurent<br><br>Eau douce :<br>- changements simultanés dans l'abondance de nombreux stocks de saumons de l'Atlantique qui dépendent de la taille des zones d'hivernage dans la mer du Labrador |
| Changement dans la distribution des individus | Zones marines :<br>-abondance accrue de la merluche au large de l'île de Vancouver en été<br><br>Eau douce :<br>-poissons d'eau froide : en été, accroissement de la concentration dans les zones refuges (sources d'eau souterraine, cours d'eau d'élévation supérieure) | poissons d'eau froide : - en été, accroissement de la concentration dans les zones refuges (sources d'eau souterraine, cours d'eau d'élévation supérieure) | -modifications de la distribution par suite des changements dans l'emplacement des lisières des glaces et des polynies | -poissons d'eau froide : en été, accroissement de la concentration dans les zones refuges (sources d'eau souterraine, cours d'eau d'élévation supérieure) | Zones marines :<br>changements dans les lieux où se tiennent les populations de nombreuses espèces (p. ex., morue de l'Atlantique, morue de l'Arctique, capelan, maquereau) fondés sur les modifications à court terme des caractéristiques annuelles de la température de l'eau |
| Changement dans les limites de distribution des espèces | Zones marines :<br>-retrait vers le nord des limites des salmonidés, en particulier le saumon rouge et le saumon rose + variabilité accrue dans l'abondance des populations du sud<br>-extension vers le nord des limites de la plie de Californie<br>Eau douce :<br>-extension vers le nord des poissons d'eau tempérée et fraîche, MAIS extension limitée par des obstacles physiques dans les régions montagneuses | Poissons d'eau tempérée et fraîche :<br>-l'extension des limites vers le nord peut être limitée par la prédominance de l'orientation est/ ouest des réseaux hydrographiques | -établissement de populations autonomes de saumons du Pacifique, surtout de saumons rouges | Poissons d'eau tempérée et fraîche :<br>-extension des limites vers le nord | Zones marines :<br>-modifications complexes des zones de distribution des espèces (p. ex., morue de l'Atlantique, morue de l'Arctique, capelan, maquereau) découlant du comportement futur des variations à long terme " naturelles " du climat (p. ex., l'oscillation nord-atlantique) |

## Tableau 5.13 Exemples des impacts du changement climatique sur les pêches par région

| Impact | Pacifique | Prairies | Arctique | Ontario/Québec | Atlantique |
|---|---|---|---|---|---|
| Changement dans la récolte durable globale | Zones marines :<br>-le régime décennal de variation de la récolte de salmonidés et d'espèces extracôtières suivra la variation de la dépression des Aléoutiennes<br><br>-réduction des récoltes dans les zones côtières qui dépendent de l'écoulement d'eau douce | -diminution probable due à une baisse des niveaux d'eau dans les lacs et les rivières | -hausse de la récolte de nombreuses populations marines et d'eau douce | -nord : augmentations possibles<br><br>-sud : diminutions possibles, surtout si les invasions par des espèces pêchables (p. ex., bar d'Amérique) sont empêchées | Zones marines :<br>-dans les eaux de l'extérieur du golfe Saint-Laurent, le régime décennal de variation pourra suivre les changements de la NAO<br>-diminution possible dans le Saint-Laurent et le golfe à cause de la réduction de l'écoulement d'eau douce provenant du bassin des Grands Lacs |
| Changement dans la récolte durable particulière à une espèce | -diminution possible des salmonidés diadromes, en particulier le saumon rouge et le saumon rose<br><br>-augmentation chez certaines espèces marines (p. ex., merluche, plie de Californie); hausse chez les espèces d'eau tempérée et fraîche | -baisse de la récolte des espèces d'eau froide; augmentation chez les espèces d'eau tempérée, surtout dans le nord | -augmentation pour toutes les guildes thermiques | -diminutions chez les salmonidés qui habitent les rivières, surtout dans le sud<br>-augmentation chez les espèces d'eau tempérée, surtout dans le nord<br>-les invasions d'espèces exotiques peuvent causer des diminutions chez les espèces endémiques de toutes les guildes | -des changements sont possibles pour de nombreuses espèces, selon la façon dont le changement climatique influera sur l'interaction complexe des courants tempérés et froids qui déterminent les conditions thermiques de la région. |
| Changements dans l'emplacement des lieux de pêche et de la capturabilité des poissons | -saumons diadromes : les grandes récoltes durables seront peut-être associées aux rivières situées plus au nord | -espèces d'eau froide : la capturabilité augmentera en été lorsque les individus seront concentrés dans les zones refuges estivales | Zones marines :<br><br>-les lieux de pêche utilisables peuvent être déplacés plus loin en mer en raison des changements dans l'emplacement des zones de grande productivité comme les lisières des glaces et les polynies | -espèces d'eau froide : la capturabilité augmentera en été lorsque les individus seront concentrés dans les zones refuges estivales | -la capturabilité augmentera ou décroîtra selon que les nouvelles caractéristiques de température de l'eau auront tendance à concentrer ou à disperser les individus d'une population |

**Tableau 5.14 Classification des options d'adaptation pour les pêches canadiennes** (d'après Burton *et al.*, 1993)

| Stratégie d'adaptation | Option particulière | Éléments du secteur des pêches | Exemples d'options passées | Limites |
|---|---|---|---|---|
| **Choisir/changer :** | | | | |
| 1. Lieu | Encourager les pêches à suivre les changements d'emplacement des habitats préférés par les poissons, car ceux-ci correspondent probablement aux changements d'emplacements des bons lieux de pêche | Zones extracôtières marines/ pêches éloignées | Expansion de la flotte canadienne afin d'exploiter la ZEE | Les pêches mondiales sont déjà surexploitées; peu de " nouvelles ressources " à exploiter |
| 2. Utilisation | Exploiter des ressources inutilisées précédemment ou sous-utilisées | Participants actuels ou nouveaux venus dans le secteur | Expansion des récoltes de crevettes et de homards au large de la côte est depuis la fermeture de la pêche à la morue | Une partie de la séquence des pêches d'espèces multiples en expansion, ce qui mène à exploiter des échelons plus bas de la chaîne alimentaire et à causer des impacts accrus sur d'autres espèces |
| **Réduire les pertes :** | | | | |
| 3. Empêcher l'effet | Impossible | S/O | S/O | S/O |
| 4. Modifier un effet | Accélérer les taux locaux d'introduction d'espèces ou d'invasion par ces dernières | Eau douce, surtout dans les régions nordiques isolées où la densité est faible (p. ex., les T.N.-O., le nord du Québec) | Des espèces exotiques prévues pour l'aquaculture se retrouvent dans les écosystèmes en plus des échappements accidentels | Les mesures imprudentes accentueront les problèmes |
| | Modifier des écosystèmes entiers à l'aide de communautés et de nutriments nouveaux et par la création d'habitats | Eau douce : habitats isolés et nordiques, comme ci-dessus; habitats marins côtiers | Les projets de création de récifs en milieu marin et dulçaquicole sont répandus | Les tentatives humaines de créer des écosystèmes autonomes ont un faible taux de succès |
| | Réduire les répercussions des autres stress | Toutes les pêches, surtout dans les régions où la densité de la population humaine est élevée. | Efforts pour réduire les répercussions des pluies acides sur les eaux douces | Volonté limitée des humains de modifier leurs façons potentiellement destructrices d'interagir avec la nature. |
| | Éliminer la surexploitation | S'applique à toutes les pêches | Exclure les navires étrangers, fermeture des pêches sur les deux côtes | Cela exige des changements dans l'attitude des humains vis-à-vis de la nature, dans leur comportement et dans la réglementation de ce comportement |
| | Augmenter l'aquaculture comme source de protéines de poissons plus facile à gérer | Systèmes lacustres et marins côtiers | Croissance rapide de l'industrie sur les deux côtes; intérêt pour la construction d'installations en eau douce, surtout dans les Grands Lacs | - L'utilisation d'aliments à base de farine de poisson peut rendre ces activités auto-limitatives; taux accrus d'invasion par des espèces exotiques ayant des effets négatifs sur les écosystèmes |
| **Accepter les pertes :** | | | | |
| 5. Répartir les pertes | Programmes d'indemnisation ou d'assurance | Pêches commerciales et récréatives commercialisées | Programme d'aide aux travailleurs du secteur de la pêche à la morue depuis sa fermeture | Mesures ne pouvant fournir qu'une atténuation à court terme si les changements environnementaux en cause sont permanents |
| 6. Supporter les pertes | Ne rien faire pour sauver l'espèce ou les stocks | Tous les écosystèmes | Extinctions passées d'espèces comme le brochet bleu dans le lac Érié, et les corégonidés dans les Grands Lacs | Résultat obtenu faute d'action |

## OPTIONS D'ADAPTATION

Plusieurs auteurs ont proposé des cadres généraux pour l'évaluation et la classification des manières dont les humains peuvent s'adapter aux impacts des changements environnementaux (Smit, 1993). Nous nous servons du mécanisme mis au point par Burton *et al.* (1993) pour organiser notre discussion sur les options d'adaptation qui conviennent au secteur des pêches et nous définissons plusieurs options relatives à divers types de pêche. L'expérience acquise jusqu'à présent relativement à ces options nous éclaire sur leur caractère pratique et leurs limites. Nous discutons en outre des difficultés systémiques soulevées par les options d'adaptation quant à leur efficacité potentielle ainsi que des effets des échelles géographiques et sociales sur l'évaluation des stratégies d'adaptation.

### *Cadre d'adaptation pour les pêches*

Burton *et al.* (1993) présentent trois paires d'options fondées sur les thèmes du changement d'utilisation, de la réduction des pertes et de l'acceptation des pertes (tableau 5.14, colonne 1,). Ces thèmes couvrent toute une gamme d'options allant de l'absence de réaction (accepter les impacts du changement environnemental) à la modification (réduire ou prévenir ces impacts) et à l'adaptation (modifier les activités humaines touchées directement par ces impacts). Les options d'adaptation des pêches dont nous discutons ont été tirées de rapports précédents sur les adaptations, d'autres évaluations des impacts du changement climatique et de groupes d'experts des pêches consultés dans tout le Canada par l'équipe d'étude. Dans la plupart des cas, les options d'adaptation sont modelées d'après des mesures déjà appliquées aux pêches canadiennes en réaction à d'autres stress et changements (tableau 5.14). Ces précédents sont la modernisation de la flotte canadienne pour tirer avantage des zones économiques exclusives lorsque l'occasion s'est présentée et l'expansion de la pêche à la crevette et au homard qui a accompagné l'effondrement de la pêche à la morue sur la côte est (tableau 5.2). Les efforts globaux visant à prévenir le changement climatique ne peuvent pas être associés aux pêches en particulier, mais il existe des moyens grâce auxquels on peut modifier les répercussions du changement climatique sur les pêches en modifiant les écosystèmes, et nombre de ces modifications ont déjà été tentées (création de récifs, aquaculture, efforts limités pour réduire les autres agressions, introductions d'espèces, etc.). L'acceptation des pertes représente l'option par défaut. Nous avons déjà accepté l'extinction de certaines espèces de poissons, et de nombreuses autres sont menacées. Lorsque des grandes pêches ont été fermées, les gouvernements ont souvent fourni des programmes d'aide faisant appel aux recettes fiscales, répartissant ainsi les pertes.

D'après l'expérience passée, toutes ces options ont des limites et peuvent créer des difficultés supplémentaires. Par exemple, les programmes d'indemnisation économique peuvent garder les gens attachés aux pêches effondrées et maintenir ainsi les pressions visant à faire rouvrir celles-ci avant que les stocks n'aient eu le temps de se rétablir.

### *Défis posés par les systèmes*

Le cadre d'adaptation, et ses options, doivent être évalués dans un contexte plus large. Ce cadre comprend des hypothèses implicites sur le lien entre l'homme et la nature qui doivent être examinées. Ces hypothèses peuvent être formulées sous forme de questions :

1) Existe-t-il un consensus sur les fondements philosophiques et éthiques de la perspective adaptationiste?

L'approche adaptationiste adoptée face au changement climatique est principalement orientée vers l'utilisation de la biosphère par les humains et se conforme donc à une vision utilitaire de la nature. Le débat sur le lien " approprié " entre l'homme et la nature existe depuis longtemps. Dans le passé, il était polarisé entre les tenants de la vision utilitaire et ceux de la vision esthétique-spirituelle. La vision utilitaire est basée sur une hypothèse sous-jacente selon laquelle la nature est là pour être exploitée et modifiée selon les désirs et les objectifs des humains. Cette vision est liée au concept de supériorité de l'homme sur toutes les autres espèces. La vision esthétique-spirituelle place les humains sur un pied d'égalité avec les autres espèces et est liée de diverses façons à la conscience ou à une croyance religieuse et attribue aux humains un rôle de gardien. Puisque ces points de vue ont des origines métaphysiques, on ne peut pas les concilier par une analyse logique et rationnelle. Avec le développement de l'écologie, en particulier de l'écologie des écosystèmes, une troisième vision a fait surface. Celle-ci reconnaît que, pour que les utilisations humaines soient durables à long terme, un bon nombre des caractéristiques naturelles, structurelles et fonctionnelles des écosystèmes doivent être conservées et protégées. Cette vision accepte l'interdépendance des humains et des autres espèces et le fait que les utilisations humaines des systèmes biologiques naturels seront limitées par le besoin de maintenir l'intégrité des écosystèmes sur lesquels elles sont fondées. L'acceptation de cette troisième vision comme base d'une stratégie d'adaptation insisterait sur la limitation des causes humaines sous-jacentes au changement climatique lui-même. En outre, puisque notre connaissance des écosystèmes est limitée, cette approche préconise une méthode prudente de gestion générale des pêches. Par exemple, une telle approche exigerait que le rendement autorisé soit maintenu en deçà d'une proportion fixe de la production totale ou que la biomasse des populations soit maintenue au-dessus d'une proportion fixe de la biomasse moyenne inexploitée.

2) Existe-t-il des buts et des objectifs acceptés quant aux ressources des pêches canadiennes?

De nombreuses pêches sont affectées par l'exploitation excessive, les dérivations d'eau et d'autres causes de dégradation et de destruction de l'habitat, les transferts d'espèces exotiques et les apports excessifs de produits chimiques. À cause de ces problèmes, elles sont dans un état généralement médiocre, un état qui suggère fortement que les systèmes de gestion actuels ne permettent pas de réaliser efficacement les objectifs qui incluent la préservation et la durabilité des populations. Si l'on ne dispose pas des moyens nécessaires pour bien mettre en application ces buts et ces objectifs, il est peu probable que l'on puisse appliquer efficacement des mesures d'adaptation permettant la préservation de l'intégrité des écosystèmes.

3) Dans quelle mesure les options d'adaptation dépendent-elles des hypothèses ayant trait aux " normes " du futur climat?

La plupart des activités de planification de l'adaptation au changement climatique ont été fondées sur l'hypothèse selon laquelle les changements se produiront de manière relativement lente et ordonnée. On s'est concentré sur un changement linéaire des moyennes climatiques échelonné sur une période de 50 à 100 ans. Même ces taux de changement excèdent ceux auxquels ont été habituellement soumis les animaux selon l'échelle temporelle de l'évolution. Cependant, on craint de plus en plus que les changements n'aient lieu de manière plus abrupte et chaotique et ne soient souvent accompagnés de changements dans les niveaux de variabilité. L'efficacité des options d'adaptation des humains devrait être évaluée en tenant compte de cette possibilité.

4) Existe-t-il une stratégie solide de gestion " sans regrets " (c.-à-d. une stratégie qui aura des effets positifs tant en l'absence qu'en la présence du changement climatique) applicable à l'ensemble du secteur des pêches?

Certaines branches de la science sont fondées sur le fait qu'on s'attend à ce que l'apport toujours croissant d'informations puisse être converti efficacement en prévisions de plus en plus précises de l'avenir. Étant donné l'incertitude qui entache les événements climatiques qui peuvent avoir des impacts significatifs sur les écosystèmes aquatiques et les réactions des écosystèmes à ces événements, il est probable que l'accroissement de la précision des prévisions que l'on peut obtenir à partir d'informations " en temps réel " toujours plus détaillées sur l'état des écosystèmes est extrêmement limité. Une autre solution consisterait à insister davantage sur la compréhension des processus qui régissent les réactions des écosystèmes aux impacts du climat et des activités humaines et à utiliser cette connaissance pour formuler de solides pratiques de gestion qui ne dépendent pas de la précision des prévisions à court terme. De telles pratiques seraient fondées sur des évaluations du rendement à long terme des systèmes gérés. Une approche de gestion " sans regrets " applicable à un scénario de changement climatique pourrait comprendre les points suivants :

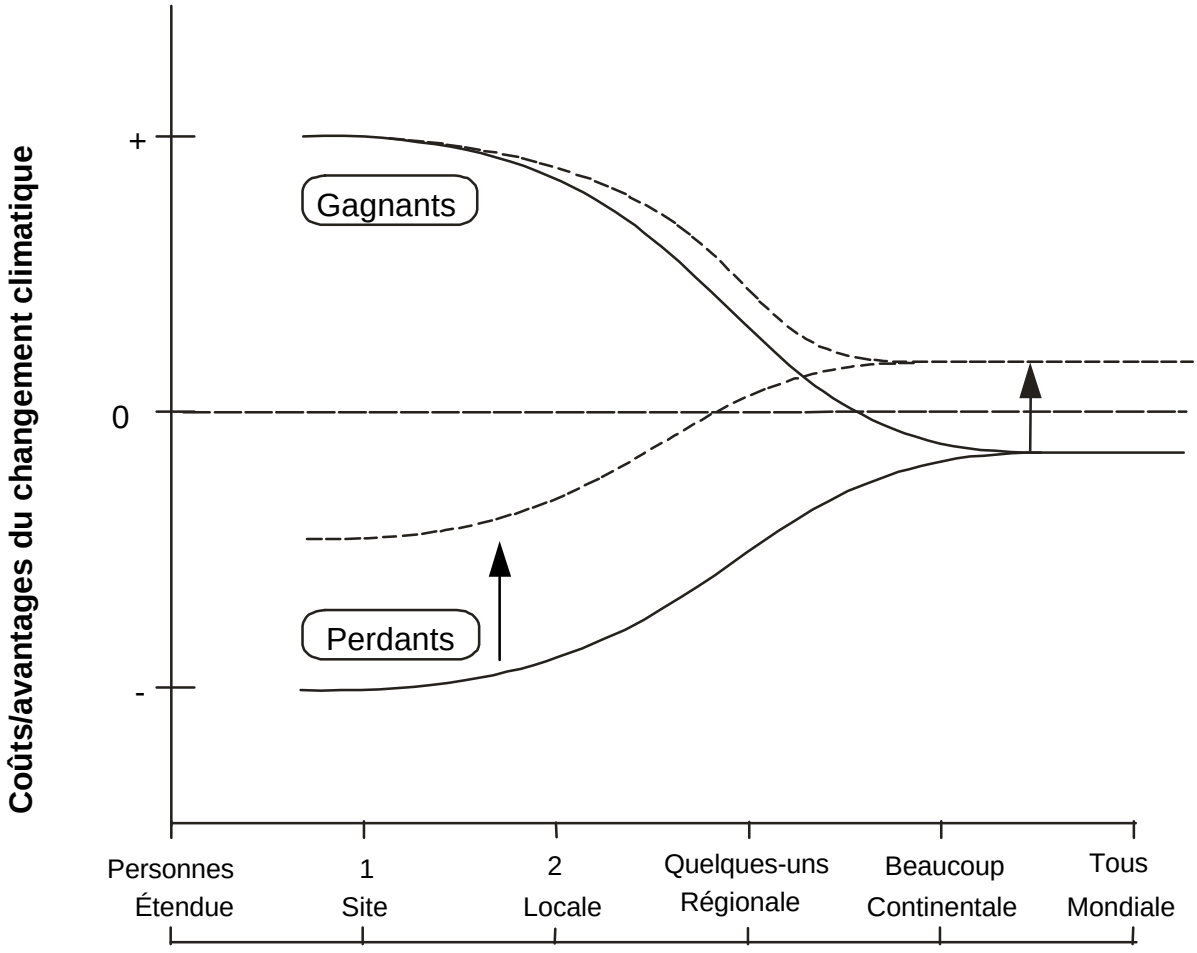
- s'assurer qu'aucune pratique appliquée pendant peu de temps ne pourra produire des résultats extrêmes;
- réduire les effets négatifs des stress anthropiques comme l'acidification;
- maintenir les taux d'exploitation à des niveaux qui incluent une marge de sécurité basée sur une appréciation cumulative des incertitudes historiques liées au rendement des stocks (Roberts, 1997);
- mettre en oeuvre des efforts concertés visant à réduire l'investissement de capitaux dans les pêches lorsqu'il devient évident que la capacité d'exploitation dépasse la capacité des populations de subir cette exploitation.

### *Échelles d'évaluation et stratégie d'adaptation*

L'histoire des gens qui pratiquent de la pêche autochtone, commerciale et récréative fournit de nombreux exemples de leur esprit d'initiative et d'adaptation. Ces gens adaptent rapidement leurs méthodes de pêche aux nouveaux défis et aux nouvelles possibilités. Lorsque certaines espèces

ont subi un déclin, souvent par suite d'une surpêche, les efforts ont été redéployés vers d'autres espèces. Les pêches s'adapteront aux changements du climat moyen ou de sa variabilité. Cela ne signifie pas que les impacts des changements sur les membres du secteur des pêches seront nuls. L'échelle d'évaluation est importante. À l'échelle locale, qui comprend les particuliers et les petits groupes, il y aura des perdants et des gagnants (figure 5.4). À mesure que les résultats des évaluations sont intégrés dans des échelles spatiales plus étendues et appliqués à des groupes de pêcheurs plus imposants, les valeurs extrêmes s'aplanissent, en ce qui concerne tant les coûts que les avantages. Les difficultés subies par les " perdants " aux petites échelles peuvent ne pas être prises en compte ou être oubliées si l'évaluation insiste sur le " tableau d'ensemble ". L'objectif premier d'une stratégie d'adaptation visant les pêches devrait être de réduire l'ampleur des pertes et des gains nets aux petites échelles et de viser un gain net global. (figure 5.4).

**Figure 5.4. Effets des échelles géographique et économique sur le gain net (avantages moins coûts) découlant des effets du changement climatique sur la société et sur le rôle que l'adaptation pourrait jouer dans l'atténuation des résultats néfastes.**



Une récente série d'articles de journaux sur la municipalité de Salvage, à Terre-Neuve (Simpson, 1997a, b, c), fournit un excellent exemple de la question des échelles en matière d'adaptation. Simpson a évalué l'effondrement bien connu de la pêche à la morue survenu sur la côte est, lequel a causé d'énormes difficultés à de nombreux pêcheurs et transformateurs de poissons, en particulier dans les petites collectivités comme Salvage. Les individus affectés par l'effondrement de la pêche à la morue, mais liés à la fois à leur communauté et à de gros investissements dans cette pêche, sont incapables de trouver de nouvelles sources de revenus. Les sociétés plus importantes, telles que Fishery Products International (FPI), acheteur et transformateur de taille, ont été moins touchées parce qu'elles ont diversifié leurs activités en achetant du poisson ailleurs et en améliorant leurs usines. Par conséquent, FPI ne dépend pas de l'état des stocks de poissons au large de Terre-Neuve. Au cours de la même période, d'autres pêches, comme la pêche au homard et à la crevette, ont pris une expansion considérable au large de Terre-Neuve (tableau 5.2). Les pertes de revenus subies par ceux qui étaient liés à la pêche à la morue ont été partagées dans le cadre de programmes d'aide gouvernementaux. Simpson a également souligné les arguments selon lesquels les programmes d'aide successifs ont retardé la généralisation de l'adaptation des petites collectivités à un rôle très réduit des pêches dans leur économie locale.

Bien que de nombreuses difficultés soient associées aux options d'adaptation que nous avons définies, la considération des échelles fournit certains repères quant aux caractéristiques essentielles d'une stratégie d'adaptation efficace :

- Au fur et à mesure que l'adaptation a lieu à petite échelle, il faut viser à réduire au minimum les pertes subies par les particuliers et les collectivités et à en arriver à une perte globale nette nulle.
- Étant donné que les incertitudes s'accroîtront probablement, l'augmentation de la diversification et de la flexibilité au niveau local sera nécessaire.

## LACUNES EN MATIÈRE DE RECHERCHE ET SURVEILLANCE

Bella *et al.* (1994) ont défini deux cadres de recherche contrastants visant à susciter des activités scientifiques pertinentes pour la prise de décisions : le modèle de prévision (MP) et le cadre de réaction des systèmes (CRS). Jusqu'à présent, la plupart des efforts de recherche sur le changement climatique ont suivi le modèle de prévision. Ce modèle génère des attentes irréalistes quant à la précision et à l'exactitude. L'importance résultante accordée à l'incertitude retarde ou empêche l'adoption de mesures de prévention. En outre, l'utilisation d'un MP a également fait qu'on a insisté en majeure partie sur les phénomènes climatiques et les processus terrestres à grande échelle au détriment des impacts locaux et régionaux. Par contre, le cadre de réaction des systèmes place davantage l'accent sur l'amélioration de la compréhension des réactions des systèmes écologiques au changement climatique au moyen d'un programme intégré de surveillance et d'analyse à long terme des changements écologiques qui ont suivi les variations historiques du climat. Le CRS accorde moins d'importance à la prédiction et plus à la mise au point d'indicateurs écologiques fiables du changement. Puisque l'on accorde maintenant plus d'importance aux impacts qu'aux phénomènes climatiques, il faudra passer du MP au CRS afin d'établir les priorités des activités de recherche et de surveillance. Ce passage du MP au CRS est également nécessaire pour ce qui est d'établir des buts et des objectifs. Jusqu'à maintenant, les

objectifs de réduction des émissions ont été liés aux changements estimatifs touchant les phénomènes climatiques, comme la température moyenne, mais non pas spécifiquement aux seuils, qui mettront en lumière des réactions sociales et écologiques particulières (Parry *et al.*, 1996).

Les dimensions spatio-temporelles de la vie quotidienne empêchent les humains de percevoir les conséquences du changement climatique dû aux activités humaines, d'où la nécessité de se fier à des modélisations scientifiques du changement climatique (Stehr et Storch, 1995). Pour la majorité des gens, la science demeure incomprise; ils ont donc de la difficulté à concevoir et à évaluer des options d'adaptation. Dans le secteur des pêches, il est nécessaire d'augmenter la recherche sur les réactions écologiques et sociales au changement climatique. Les domaines de priorité de la recherche future sont définis ci-dessous.

***Projets d'acquisition de connaissances***

**Programmes de surveillance :** L'engagement à long terme dans des programmes étendus, globaux et continus de suivi environnemental est une partie essentielle d'un cadre de recherche fondé sur la réaction des systèmes. Ces programmes agissent comme des sentinelles; grâce à eux, on assure la surveillance des systèmes écologiques importants dans le but d'éviter les surprises et on recherche les expériences naturelles qui visent à mieux comprendre la façon dont ces systèmes fonctionnent. Les séries chronologiques de données physiques et biologiques dont on dispose sont trop peu nombreuses et portent sur une période trop courte pour qu'on puisse déceler les caractéristiques récurrentes ou confirmer les tendances à long terme des comportements. On a besoin de ressources environnementales et d'organismes de gestion (tant fédéraux que provinciaux) qui coopéreront à l'établissement et au maintien de programmes de surveillance des aspects physiques, chimiques et biologiques à long terme de lieux représentatifs de tous les grands écosystèmes d'eau douce et d'eau salée, dans l'ensemble du Canada. Pour les écosystèmes d'eau douce, les besoins sont :

- Pour ce qui est des séries chronologiques, les sites existants sur lesquels on possède des données pertinentes accumulées sur dix années ou plus (p. ex., Dorset dans le centre de l'Ontario, la région des lacs expérimentaux du nord-ouest de l'Ontario, le projet Quinte sur le lac Ontario, la région des étangs expérimentaux du centre nord de Terre-Neuve) sont des sources d'information précieuses qui devraient être maintenues; ce réseau existant de sites devrait être étendu afin de couvrir un large éventail de régions géographiques; il faudrait notamment établir au moins un site dans l'Arctique.

- En ce qui concerne les populations régionales des lacs, les températures de l'eau de surface, le début et la fin de la saison de glace et les niveaux d'eau font partie des indicateurs les plus faciles à surveiller à un coût raisonnable grâce à la télédétection.

**Études comparatives :** Puisque l'approche expérimentale est difficile à appliquer à l'étude des écosystèmes naturels, les études comparatives de systèmes semblables et contrastants peuvent fournir des connaissances précieuses sur les réactions probables de ces systèmes au changement climatique et sur les processus qui détermineront ces réactions. Voici quelques exemples d'études

comparatives qui fourniraient des connaissances précieuses sur les effets potentiels du changement climatique sur les poissons :

- Comparaisons selon la latitude des différences dans le cycle biologique de diverses populations composées d'espèces à valeur économique, p. ex., les salmonidés de la côte ouest, les gadoïdés de la côte est, les corégonidés et les percidés d'eau douce.

- Comparaisons selon la latitude et l'altitude des régimes de nutriments et de mélange dans des lacs qui diffèrent quant à leur superficie, leur taille et les caractéristiques des sols de leurs bassins hydrographiques.

**Distribution spatiale des populations et des espèces :** Il est important d'accroître les connaissances portant sur les liens entre les caractéristiques environnementales qui déterminent l'habitat et la distribution spatiale des poissons. Cela permettra de déterminer plus précisément quelles populations et espèces seront affectées par le changement climatique et dont il faudra ajuster les modalités de gestion de l'exploitation.

**Salmonidés :** Projets de recherche utiles portant explicitement sur les espèces de salmonidés :

- Établir un programme de surveillance global et international relatif aux populations de salmonidés, c.-à-d. une " veille mondiale des saumons " (Maitland *et al.*, 1981; Regier, 1992 ).

- Élaborer des études de cas comparatives pour les populations réparties sur toute la gamme de latitudes où se retrouve une espèce; mettre l'accent sur la documentation des cas de quasi-extinction et les différences dans les variations de la croissance et de l'abondance d'une année à l'autre.

- Produire des descriptions complètes et particulières à une espèce de l'ensemble des dépendances thermiques qui définissent et régissent les taux physiologiques (p. ex., la croissance) et les activités comportementales (p. ex., les seuils de température applicables à la reproduction).

**Effets interactifs d'autres stress environnementaux :** Les effets du changement climatique sont difficiles à prévenir et peuvent intensifier les effets néfastes dus à d'autres stress environnementaux sur lesquels ont peut exercer un contrôle. Par conséquent, il est important d'acquérir suffisamment de connaissances sur la nature de ces interactions afin d'établir des lignes directrices justifiables pour réglementer les activités qui causent des stress contrôlables, une fois que les effets du changement climatique commenceront à être ressentis.

**Conception d'écosystèmes et espèces exotiques :** Dans l'Arctique, le réchauffement du climat peut fournir l'occasion de " construire " des écosystèmes de lacs et de rivières plus productifs et plus divers. Au sud, les écosystèmes existants sont sujets à être envahis par tout un nouveau groupe d'espèces exotiques, à mesure que les limites zoogéographiques deviendront plus lâches. Pour éviter la répétition des nombreuses erreurs associées aux introductions d'espèces exotiques

effectuées dans le passé, les efforts actuels visant à comprendre les mécanismes qui déterminent le succès des introductions et l'apparition d'effets négatifs doivent être accrus et élargis afin qu'ils aillent au-delà des réactions déclenchées actuellement par chaque nouvel envahisseur. Les introductions accidentelles dues au transport maritime et aux seaux à appâts ainsi que les introductions intentionnelles, qui découlent souvent de l'aquaculture ou d'exploitations d'ensemencement-élevage-récolte, doivent être évaluées ensemble. Il faut des lois fédérales plus strictes pour réglementer l'importation et les mouvements interprovinciaux des espèces exotiques aquatiques.

***Projets liés aux écosystèmes***

*Écosystèmes marins :* Il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes qui régissent les variations de faible fréquence dans les systèmes de production marins. Le rôle du climat dans ces mécanismes et l'impact probable du changement climatique sur ces systèmes devraient être établis.

*Écosystèmes d'eau douce* **:** Il existe des indications suffisantes que la charge de nutriments provenant des bassins versants des lacs ainsi que les régimes thermiques et de mélange (horizontal et vertical) et les processus associés de recyclage des nutriments sont des éléments majeurs régissant la productivité des écosystèmes lacustres et des pêches qu'ils soutiennent. Il faut mieux comprendre la façon dont ces processus sont régis dans la production de poissons d'eau douce afin de prévoir efficacement les impacts du changement climatique sur ces systèmes et de comprendre comment les améliorer ou en tirer avantage. Selon Schindler *et al.,* 1996, notre compréhension actuelle des bassins versants des lacs et des processus lacustres demeure trop intuitive pour nous permettre d'élaborer des prévisions ou des modèles robustes des réactions des systèmes d'eau douce au changement climatique. À court terme, une surveillance minutieuse des réactions des écosystèmes aquatiques à la variabilité climatique réelle doit soutenir nos tentatives visant à comprendre les conséquences de l'accroissement du réchauffement par effet de serre pour les écosystèmes d'eau douce. De même, une meilleure compréhension des facteurs qui déterminent la production globale de poissons dans les rivières et les cours d'eau est nécessaire.

*Systèmes arctiques* : La compréhension actuelle de la biologie fondamentale de nombreuses espèces marines et d'eau douce est minimale, tout comme la compréhension des écosystèmes aquatiques arctiques (Clarke, 1993). Toutefois, on s'attend à ce que le réchauffement du climat ait des effets importants sur l'Arctique. Pour formuler des prévisions utiles des conséquences de ces changements, il faudra une meilleure compréhension de la biologie des systèmes qui seront touchés.

*Estuaires* **:** Suivre la position de l'interface entre l'eau salée et l'eau douce dans les grands estuaires comme ceux du Saint-Laurent et du Fraser afin qu'elle serve d'indicateur précoce du changement climatique. L'interface entre l'eau salée et l'eau douce d'un estuaire est une limite importante de l'écotone. La position de cette limite dans l'estuaire est déterminée par le niveau de la mer et le débit. Dans un environnement plus chaud et plus sec, le niveau de la mer aurait tendance à monter et le débit à diminuer; ainsi, les deux facteurs auraient tendance à causer le déplacement de l'interface vers l'intérieur des terres. Par conséquent, la position de cette interface dans les estuaires devrait être un indicateur sensible du changement climatique.

***Projets institutionels***

*Nouvelles pratiques de gestion* : En ce qui concerne les pêches, il faut élaborer des nouvelles pratiques de réglementation qui définissent des mesures de gestion robustes face à la nature hautement stochastique des systèmes de production de poissons. Ces pratiques devraient tenir compte spécifiquement des variations stochastiques qui touchent diverses échelles temporelles, allant des variations annuelles aux décennales et au-delà. Elles devraient reconnaître que les transitions entre les divers états de l'environnement peuvent être rapides et que la durée des nouveaux états peut être prolongée. Elles ne seraient pas fondées aussi fortement que les pratiques actuelles sur des prévisions à court terme exactes des comportements.

*Évaluer les pêches* : Il est nécessaire d'obtenir des données exhaustives et exactes sur la taille des récoltes prélevées par les pêcheurs de subsistance et les pêcheurs autochtones afin de permettre leur comparaison avec d'autres secteurs de pêche. Si l'on se base sur ces mesures économiques simples, ces secteurs peuvent avoir une importance marginale, mais un grand nombre de leurs membres comptent sur les poissons pour se nourrir. Il faut mettre au point de meilleures façons d'évaluer la valeur globale des pêches, façons qui iraient au-delà de la valeur et des coûts immédiats des prises et qui tiendraient compte de la capacité des écosystèmes de maintenir les prises.

*Limites supérieures pour des pêches durables* : Il faut estimer les limites supérieures de la récolte durable dans le cas de toutes les pêches canadiennes d'après les facteurs de contribution fondamentaux des écosystèmes tels que la lumière, la chaleur, les nutriments et le mélange. On dispose d'outils pour y arriver (Dickie et Thibideau, 1994). Ces valeurs fourniront des points de référence pour les prises de décisions futures, au fur à mesure que les stress dus au changement climatique s'ajoutent aux stress déjà présents (cf. Pauly et Christensen, 1995).

**REMERCIEMENTS :**

La préparation du présent rapport a commencé par la tenue d'une série d'ateliers officieux tenus à Vancouver, Winnipeg, Burlington, St. John's et Halifax. Nous sommes profondément reconnaissants envers ceux qui nous ont consacré un peu de leur temps pour discuter de cette question - à Vancouver : R. Beamish, D. Levy, C. Levings, D. Welch; à Winnipeg : M. Bergman, D. Bodaly, S. Cosens, R. Hesslein, M. Power, J. Reist, G. Schaeffer, H. Welch; à Burlington : D. Evans, H. Harvey, N. Hoffman, T. Linton, G. McDonald, L. Mortsch, W. Schertzer; à St. John's : J. Anderson, R. Anderson, J. Brattey, J. Carscadden, B. Dempson, G. Lilly, J. Morgan, R. Myers, S. Nanayanan, M. O'Connell, P. Pepin, D. Reddin, P. Ryan; à Halifax : M. Chadwick, L. Dickie, K. Drinkwater, G. Howell, J. Kerekes, S. Kerr, D. Sameoto, W. Watt, W. White. L'examen d'une ébauche précédente du document par H.H. Harvey, S.R. Kerr, L.A. Molot et T.G. Northcote a été particulièrement utile. Carolyn Backelaar a préparé toutes les figures.

# RÉFÉRENCES

Dillon, P.J. et Molot, L.A. (présenté). Effect of landscape form on the export of dissolved organic carbon, iron and phosphorous from forested stream catchments, *Water Resources Research*.

Downing, J.A., Plante, C. et Lalonde, S. (1990). Fish production correlated with primary productivity, not the morphoedaphic index, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47:1929-1936.

Drinkwater, K.F. (1986). On the role of freshwater outflow on coastal marine ecosystems - A workshop summary, dans *The Role of Freshwater Outflow in Coastal Marine Ecosystems*, S. Skreslet (dir.), NATO ASI Series, Series G, Ecological Sciences, Vol. 7, Springer-Verlag, Berlin (Allemagne), p. 429-438.

Drinkwater, K.F. 1987. "Sutcliffe revisited": published correlations between fish stocks and environmental indices and their recent performance, dans *Environmental Effects on Recruitment to Canadian Atlantic Fish Stocks*, Perry, R.I. et Frank, K.T. (dir.), Canadian Technical Report Fisheries and Aquatic Sciences 1556, St. Andrews (N.-B.), p. 44-61.

Drinkwater, K.F. (1994*). Environmental changes in the Labrador Sea and some effects on fish stocks*, International Council for the Exploration of the Sea, 16 p.

Drinkwater, K.F. (1996). Climate and oceanographic variability in the Northwest Atlantic during the 1980s and early 1990s, *North Atlantic Fisheries Organization Science Council Studies*, 24:7-27.

Drinkwater, K.F. (1997). Impacts of climate variability on Atlantic Canadian fish and shellfish stocks, dans *Climate change and climate variability in Atlantic Canada, Vol. VI, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, R.W. Shaw (dir.), Environnement Canada, région de l'Atlantique, Bedford (N.-É.), p. 38-50.

Drinkwater, K.F. et Frank, K.T. (1994). Effects of river regulation and diversion on marine fish and invertebrates, *Aquatic Conservation, Freshwater and Marine Ecosystems*, 4:135-151.

Eaton, J.G. et Scheller, R.M. (1996). Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States, *Limnology and Oceanography*, 41:1109-1115.

Ehler, C.N., Klein, R.J.T., Kulshrestha, S.M., McLean, R.F., Mimura, N., Nicholls, R.J., Nurse, L.A., Nieto, H.P., Stakhiv, E.Z., Turner, R.K. et Warrick, R.A. (1996). " Coastal Zones and Small Islands ", dans *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific - Technical Analyses*, Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H. (dir.), Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), p. 289-324.

Eppley, R.W. et Peterson, B.J. (1979). Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean, *Nature*, 128:677-680.

FAO/OAA (1997). Site Web de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture : www.fao.org/WAICENT/faoinfo/fishery/publ/sofia - State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA) - 1996 Report.

FAO/OAA (1992). *Fisheries Statistics: Commodities 1990*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome (Italie).

Fee, E.J. (1979). A relation between lake morphometry and primary production and its use in interpreting whole-lake eutrophication experiments, *Limnology and Oceanography*, 24:401-416.

Fee, E.J., Hecky, R.E., Kasian, S.E.M. et Cruikshank, D.R. (1996). Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian Shield lakes, *Limnology and Oceanography*, 41:912-920.

Fee, E.J., Shearer, J.A., DeBruyn, E.R. et Schindler, E.U. (1992). Effects of lake size on phytoplankton photosynthesis, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49:2445-2459.

Fee, E.J., Hecky, R.E., Regehr, G.W., Hendzel, L.L. et Wilkinson, P. (1994). Effects of lake size on nutrient availability in the mixed layer during summer stratification, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51:2756-2768.

FFMC (1996). *Annual Report*, Freshwater Fish Marketing Corporation, Winnipeg (Man.), 121 p.

Firth, P. et Fisher, S.G. (dir.) (1991). *Global Climate Change and Freshwater Ecosystems*, Springer-Verlag, New York (N.Y.), 321 p.

Flittner, G. A. (1993). Impacts of climate change on living aquatic resources of the world, dans *Impacts of climate change on resource management of the north*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 16, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 99-125.

Ford, D.E. et Thornton, K.W. (1991*). Water resources in a changing climate in Global Climate Change and Freshwater Ecosystems*, Firth, P. et Fisher. S.G. (dir.), Springer-Verlag, New York (N.Y.), p. 26-47.

Francis, R.C. et Hare, S.R. (1994). Decadal-scale regime shifts in large marine ecosystems of the Northeast Pacific: a case for historical science, *Fisheries Oceanography*, 3:279-291.

Frank, K.T., Carscadden, J.E. et Simon, J.E. (1996). Recent excursions of capelin (*Mallotus villosus*) to the Scotian Shelf and Flemish Cap during anomalous hydrographic conditions, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53:1473-1486.

Frank, K.T., Perry, R.I. et Drinkwater, K.F. (1990). Predicted response of Northwest Atlantic invertebrates and fish stocks to $CO_2$-induced climate change, *Transactions of the American Fisheries Society 119*, p. 353-373.

Frank, K.T., Perry, R.I., Drinkwater, K.F. et Lear, W.H. (1988). *Changes in the fisheries of Atlantic Canada associated with global increases in atmospheric carbon dioxide: A preliminary report*, Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1652, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.), 52 p.

Friedland, K.D., Reddin, D.G. et Kocik, J.K. (1993). Marine survival of North American and European Atlantic salmon: effects of growth and environment, *ICES Journal of Marine Science*, 50:481-492.

Gagne, J.A. et Sinclair, M. (1991). *Marine fisheries resources and oceanography of the St. Lawrence Estuary in Oceanography of a Large Estuarine System: The St. Lawrence*, El-Sabh, M.I. et Silverberg, N. (dir.), Springer-Verlag, New York (N.Y.), p. 358-377.

Hamilton, K. et Mysak, L.A. (1986). Possible effect of the Sitka Eddy on sockeye and pink salmon migration off southeast Alaska, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43:498-504.

Hare, S.R. et Francis, R.C. (1995). Climate change and salmon production in the Northeast pacific, dans *Symposium on Climate Change and Northern Fish Populations*, R.J. Beamish (dir.). Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 121, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.), p. 357-372.

Hayward, T.J. (1997). Pacific ocean climate change: atmospheric forcing, ocean circulation and ecosystem response, *Trends in Ecology and Evolution*, 12:150-154.

Hewett, S.W. et Johnson, B.L. (1987). *A generalized bioenergetics model for fish growth for microcomputers*, University of Wisconsin, Sea Grant Technical Report WIS-SG-82-245, Madison (Wisc.).

Hokanson, K.E.F. (1977). Temperature requirements of some percids and adaptations to the seasonal temperature cycle, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 34, p. 1524-1550.

Hondzo, M. et Stefan, H.G. (1993). Regional water temperature characteristics of lake subjected to climate change, *Climatic Change*, 24:187-211.

Jilan, S. et Miles, E. (1996). " Oceans ", dans *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, Watson, R.T., Zinyuowera, M.C. et Moss, R.H. (dir.), Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), p. 267-288.

Johnson, T.B. et Evans, D.O. (1990). Size-dependent winter mortality of young of the year whit perch: Climate warming and invasion of the Laurentian Great Lakes, *Transactions of the American Fisheries Society*, 119:301-313.

Jonsson, B. et L'Abee-Lund, J.H. (1993). Latitudinal clines in life-history variables of anadromous brown trout in Europe, *Journal of Fish Biology*, 43 (supplément A):1-16.

Kean, J. (1997). Communication personnelle, février 1997, chercheur scientifique, Service hydrographique du Canada, Ottawa (Ont.).

King, J.R., Shuter, B.J. et Zimmerman, A.P. (1997). The response of the thermal stratification of South Bay (Lake Huron) to climatic variability, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* (sous presse).

Krohn, M. et S.R. Kerr (1996). *Declining weight-at-age in northern cod and the potential importance of the early-years and size-selective fishing mortality*, North Atlantic Fisheries Organization, SCR Document 96/56, Serial No. N2732, Dartmouth (N.-É.), 10 p.

Krovnin, A.S. (1995). A comparative study of climatic changes in the North Pacific and North Atlantic and their relation to the abundance of fish stocks, dans *Climate change and northern fish populations*, R.J. Beamish (dir.), Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Science No. 121, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.), p. 181-198.

Laycock, A.H. (1987). The amount of Candian water and its distribution, dans *Canadian Aquatic Resources*, M.C. Healey et R.R. Wallace (dir.), Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences 215, ministère des Pêches et Océans, Ottawa (Ont.), p. 13-42.

Leach, J.H., Dickie, L.M., Shuter, B.J., Borgmann, U., Hyman, J. et Lysack. (1987). A review of methods for prediction of potential fish production with application to the Great Lakes and Lake Winnipeg, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44(suppl. 2):471-485.

Levine, S.N., Stainton, M.P. et Schindler, D.W. (1986). A radiotracer study of phosphorus cycling in a sutrophic Canadian Shield lake, Lake 227, northwestern Ontario, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43:366-378.

Levy, D.A. (1992). *Potential impacts of global warming on salmon production in the Fraser River watershed*, Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1889, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.), 96 p.

Magnuson, J.J., Crowder, L.B. et Medvick, P.A. (1979). Temperature as an ecological resource, *American Zoologist*, 19:331-342.

Magnuson, J.J., Meisner, J.D. et Hill, D.K. (1990). Potential changes in the thermal habitats of Great Lakes fish after global climate warming, *Transactions of the American Fisheries Society*, 119, p. 254-264.

Magnuson, J.J. et DeStasio, B.T. (1997). Thermal niche of fishes and global warming, dans Wood, C.M. et McDonald, D.G. (dir.), *Global Warming: Implications for freshwater and marine fish*, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), p. 377-408.

Magnuson, J.J., Assel, R.A., Bowser, C.J., Dillon, P.J., Eaton, J.F., Evans, H.E., Fee, E.J., Hall, R.I., Mortsch, L.R., Schindler, D.W., Quinn, F.H. et Webster, K.E. (1997). Potential effects of climate changes on aquatic systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian shield region, *Hydrological Processes*, 11:221-249.

Maitland, P.S., Regier, H.A., Power, G. et Nilsson, N.-A. (1981). A wild salmon, trout and char watch: An international strategy for salmonid conservation, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38: 1882-1888.

Mandrak, N.E. (1989). Potential invasion of the Great Lakes by fish species associated with climatic warming, *Journal of Great Lakes Research*, 15:306-316.

Mandrak, N.E. (1995). Biogeographic patterns of fish species richness in Ontario lakes in relation to historical and environmental factors, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52:1462-1474.

Mann, K.H. et Drinkwater, K.F. (1994). Environmental influences on fish and shellfish production in the Northwest Atlantic, *Environmental Reviews*, 2:16-32.

Mann, K.H. et Lazier, J.R.N. (1996*). Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans*, 2e éd., Blackwell Science, Inc., London (G.-B.), 401 p.

Martin, K.A., Welch, H.E. et Mills, K.H. (présenté). The effect of lake fertilization on fish populations in small arctic lakes, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*.

Matthews, W.J. et Zimmerman, E.G. (1990). Potential effects of global warming on native fishes of the southern great plains and the south west, *Fisheries*, 15:26-32

McBean, G.A., Slaymaker, O., Northcote, T., LeBlond, P. et Parsons, T.S. (1992). *Études de modèles de prévisions des variations climatiques et de leurs incidences sur l'hurologie, les courants côtiers et les pêches en Colombie-Britannique*, Sommaire du changement climatique SCC 92-02, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 15 p.

McCauley, R.W. et Casselman, J.M. (1981). The final preferendum as an index of the temperature for optimum growth in fish, dans *Aquaculture in heated effluents and recirculation systems*, K. Tiews (dir.), vol. 2, Heenemann Verlagsgesellschaft, Berlin (Allemagne), p. 81-93.

McCormick, M.J. (1990). Potential changes in thermal structure and cycle of Lake Michigan due to global warming, *Transactions of the American Fisheries Society*, 119:183-194.

McLeod, C.L. et J.P. O'Neil (1983). Major range extensions of anadromous salmonids and first record of chinook salmon in the Mackenzie River drainage, *Canadian Journal of Zoology*, 61:2183-2184.

Meisner, J.D. (1990). Potential loss of thermal habitat for brook trout, due to climatic warming, in two southern Ontario streams, *Transactions of the American Fisheries Society*, 119:282-291.

Meyer, G., Masliev I. et Somlyody, L. (1994). *Impact of climate change on global sensitivity of lake stratification*, WP-94-28, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg (Autriche), 56 p.

Michmerhuizen, C.M., Striegl, R.G. et McDonald, M.E. (1996). Potential methane emission from north-temperate lakes following ice melt, *Limnology and Oceanography*, 41:985-991.

Miller, A.J., Cayan, D.R., Barnett, T.P., Graham, N.E. et Oberhuber, J.M. (1994). Interdecadal variability of the Pacific Ocean: model response to observed heat flux and wind stress anomalies, *Climate Dynamics*, 9:287-302.

Minns, C.K. et Moore, J.E. (1992). Predicting the impact of climate change on the spatial pattern of freshwater fish yield capability in eastern Canadian lakes, *Climatic Change*, 22:327-346.

Minns, C.K. et Moore, J.E. (1995). Factors limiting the distributions of Ontario's freshwater fishes: the role of climate and other variables, and the potential impacts of climate change, dans *Climate change and northern fish populations*, R.J. Beamish (dir.), Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 121, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.), p.

Minns, C.K., Randall, R.G., Chadwick, E.M.P., Moore, J.E. et Green, R. (1995). Potential impact of climate change on the habitat and population dynamics of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in western Canada, dans *Climate change and northern fish populations*, R.J. Beamish (dir.), Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 121, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.), p. 699-708.

Montevecchi, W.A. et Myers, R.A. (1995). Dietary changes of seabirds indicate shifts in pelagic food webs, *Sarsia*, 80:313-333.

Morin, A. et N. Bourassa (1992). Modèles empiriques de la production annuelle et du rapport P/B d'invertébrés benthiques d'eau courante, *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, 49:532-539.

Mortsch, L.D. et Quinn, F.H. (1996). Climate change scenarios for the Great Lakes Basin ecosystem studies, *Limnology and Oceanography*, 41:903-911.

MPO (1994). *1990 survey of recreational fishing in Canada*, Economic and Commercial Analysis Report 148, Pêches et Océans Canada, Ottawa (Ont.), 156 p. (Un rapport décrivant l'étude sera publié plus tard en 1997.)

Myers, R.A. (1991). Recruitment variability and range of three fish species, *NAFO Science Council Studies*, 16:21-24.

Myers, R.A., Akenhead, S.A. et Drinkwater, K. (1990). The influence of Hudson Bay runoff and ice-melt on the salinity of the inner Newfoundland shelf, *Atmosphere-Ocean*, 28:241-256.

Myers, R.A., Barrowman, N.J., Mertz, G., Gamble, J. et Hunt, H.G. (1994*). Analysis of Continuous Plankton Recorder Data in the Northwest Atlantic 1959-1992*, Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1966, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.), 246 p.

Myers, R.A., Hutchings, J.A. et Barrowman, N.J. (1996). Hypotheses for the decline of cod in the North Atlantic, *Marine Ecology Progress Series*, 138:393-308.

Myers, R.A., Mertz, G. et Fowlow, P. S. (1997). The maximum population growth rates and recovery times of Atlantic cod (*Gadus morhua*), *Fisheries Bulletin*, 95:762-772.

Mysack, L.A. (1986). El Nino, interannual variability and fisheries in the Northeast Pacific Ocean, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43:464-497.

Nixon, S.W. (1988). Physical energy inputs and the comparative ecology of lake and marine ecosystems, *Limnology and Oceanography*, 33:1005-1025.

Nurnberg, G.K. (1984). The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia, *Limnology and Oceanography*, 29:111-124.

Parry, M.L., Carter, T.R. et Hulme, M. (1996). What is a dangerous climate change?, *Global Environmental Change*, 6:1-6.

Parsons, L.S. (1993). *Management of marine fisheries in Canada*, Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences 225, Conseil national de recherches et ministère des Pêches et Océans, Ottawa (Ont.), 763 p.

Pauly, D. et Christensen, V. (1995). Primary production required to sustain global fisheries, *Nature*, 374:255-257.

Pearcy, W.G. (1992). *Ocean Ecology of North Pacific Salmonids*, University of Washington Press, Seattle (Wash.), 179 p.

Pearcey, W.G. (1997). Salmon production in changing ocean domains, dans *Salmon and their ecosystems: Status and Future Options*, B.J. Stoder, P.A. Bisson et R.J. Naiman (dir.), Chapman and Hall, New York (N.Y.), p. 331-352..

Plante, C. et Downing, J.A. (1989). Production of freshwater invertebrate populations in lakes, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46:1489-1498.

Polovina, J.J., Mitchum, G.T., Graham, N.E., Craig, M.P., Demartini, E.E. et Flint, E.N. (1994). Physical and biological consequences of a climate event in the central North Pacific, *Fisheries Oceanography*, 3:15-21.

Porter, K.G., Saunders, P.A., Haberyan, K.A., Macubbin, A.E., Jacobsen, T.R. et Hodson, R.E. (1996). Annual cycle of autotrophic and heterotrophic production in a small monomictic Piedmont lake (Lake Oglethorpe): Analog for the effects of climatic warming on dimictic lakes, *Limnology and Oceanography*, 41:1041-1051.

Radforth, I. (1944). *Some considerations on the distribution of fishes in Ontario*, Contributions of the Royal Ontario Museum (Zoology) 25, Toronto (Ont.).

Rahel, F.J., Keleher, C.J. et Anderson, J.L. (1996). Potential habitat loss and population fragmentation for cold water fish in the North Platte River drainage of the Rocky Mountains: Response to climate warming, *Limnology and Oceanography*, 41:1116-1123.

Reddin, D.G. et Friedland, K.D. (1993). Marine environmental factors influencing the movement and survival of Atlantic salmon, dans *Salmon in the Sea*, D. Mills (dir.), Blackwell Scientific Publications Ltd., Londres (G.-B.), p. 79-103.

Regier, H.A. (1992). Indicators of ecosystem integrity, dans *Ecological Indicators*, D. McKenzie, D.E. Hyatt et V.J. McDonald (dir.), Elsevier Applied Science Publications, Borking (Angleterre), p. 183-200.

Regier, H.A. et J.A. Holmes (1991). Impacts of climate change on the freshwater fisheries of the great plains, dans *Symposium on the impacts of climatic change on variability on the Great Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université deWaterloo, Waterloo (Ont.), p. 301-308.

Regier, H.A., Lin, P., Ink, K.K. et Wichert, G.A. (1996). Likely responses to climate change of fish associations in the Laurentian Great Lakes Basin: concepts, methods and findings, *Boreal Environment Research*, 1:1-15.

Reist, J.D. (1987). *Western Arctic Fish collections 1983-1986: sample-processing procedures and basic data on individual specimens*, Canadian Data Report Fisheries and Aquatic Sciences 669, 69 p.

Reist, J.D. (1994). An overview of the possible effects of climate change on northern freshwater and anadromous fishes, dans *Mackenzie Basin Impact Study, Interim Report No. 2*, S.J. Cohen (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 377-385.

Reist, J.D. (1997). Communication personnelle, sept. 1997, chercheur scientifique, ministère des Pêches et Océans, Winnipeg (Man.).

Reynolds, C.S. (1996). Phosphorus recycling lakes: evidence from large limnetic enclosures of the importance of shallow sediments, *Freshwater Biology*, 35:623-646.

Richardson, C.J. (1985). Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands, *Science*, 228:1424-1427.

Rodionov, S.N. et A.S. Krovnin (1992). The 1980s in the context of climatic changes in the North Atlantic region, *ICES Marine Science Symposium*, 195:93-102.

Roberts, C.M. (1997). Ecological advice for the global fisheries crisis, *Trends in Ecology and Evolution*, 12:35-38.

Schindler, D.G., Beatty, K.G., Fee, E.J., Cruikshank, D.R., DeBruyn, E.R., Findlay, D.L., Linsey, G.A., Shearer, J.A., Stainton, M.P. et Turner, M.A. (1990). Effects of climatic warming on the lakes of the central boreal forest, *Science*, 250:967-970.

Schindler, D.W., Bayley, S.E., Parker, B.R., Beaty, K.G., Cruikshank, D.R., Fee, E.J., Schindler, E.U. et Stainton, M.P. (1996). The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, *Limnology and Oceanography*, 41:1004-1017.

Schlesinger, D.A. et Regier, H.A. (1982). Climatic and morphoedaphic indices of fish yields from natural lakes, *Transactions of the American Fisheries Society*, 111:141-150.

Schlesinger, D.A. et Regier, H.A. (1983). Relationship between environmental temperature and yields of subarctic and temperate zone fish species, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40:1829-1837.

Schweigert, J.F. (1995). Environmental effects on long-term population dynamics and recruitment to Pacific herring (*Clupea pallasi*) populations in southern British Columbia, dans *Climate change and northern fish populations*, R.J. Beamish (dir.), Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 121, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.), p. 569-583.

Shuter, B.J. et Post, J.R. (1990). Climate, population viability and the zoogeography of temperate fishes, *Transactions of the American Fisheries Society*, 119:314-336.

Shuter, B.J. et Meisner, J.D. (1992). Tools for assessing the impact of climate change on freshwater fish populations, *Geojournal*, 28:7-20.

Shuter, B.J. et Ing, K.I. (1997). Factors affecting the production of zooplankton in lakes, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54:359-377.

Shuter, B.J., Schlesinger, D.A. et Zimmerman, A.P. (1983). Empirical predictors of annual surface water temperature cycles in North American lakes, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40:1838-1845.

Simpson, J. (1997a). Failure to place the cue ball correctly has fisheries snookered, *The Globe and Mail*, 2 juillet 1997, p. A12.

Simpson, J. (1997b). There's got to be something better than returning to a 'way of life', *The Globe and Mail*, 3 juillet 1997, p. A16.

Simpson, J. (1997c). Solving the fisheries problem requires a massive change in thinking, *The Globe and Mail*, 4 juillet 1997, p. A12.

Smit, B (dir.) (1993). *Adaptation to Climatic Variability and Change*, Report of the Task Force on Climate Adaptation, Occasional Paper No. 19, Department of Geography, Université de Guelph, Guelph (Ont.), 53 p.

Statistique Canada (1997). Site Web : www.statcan.ca. Marine fish harvests 1990, 1994: /english/Pgdb/Economy/Primary/; Freshwater areas, river drainage areas, lengths: /english/Pgdb/Land/Geography.

Stefan, H.G. et Sinokrot, B.A. (1993). Projected global climate change impact on water temperatures in five north central U.S. streams, *Climatic Change*, 24:353-381.

Stefan, H.G., Hondzo, M., Fang, X., Eaton, J.G. et McCormick, J.H. (1996). Simulated long-term temperature and dissolved oxygen characteristics of lakes in the north central United States and associated fish habitat limits, *Limnology and Oceanography*, 41:1124-1135.

Stehr, N. et Storch, H. von (1995). The social construct of climate and climate change, *Climate Research*, 5:99-105.

Stemberger, R.S., Herlihy, A.T., Kugler, D.L. et Paulsen, S.G. (1996). Climatic forcing on zooplankton richness in lakes of the northeastern United States, *Limnology and Oceanography*, 41:1093-1101.

Sutcliffe, W.H. (1972). Some relations of land drainage, nutrients, particulate material, and fish catch in two eastern Canadian bays, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 29:357-362.

Sutcliffe, W.H. (1973). Correlations between seasonal river discharge and local landings of American lobster (*Homarus americanus*) and Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) in the Gulf of St. Lawrence, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 30:856-859.

Sutcliffe, W.H., Drinkwater, K. et Muir, B.S. (1977). Correlations of fish catch and environmental factors in the Gulf of Maine, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 34:29-30.

Sutcliffe, W.H., Loucks, R.H. et Drinkwater, K. (1976). Coastal circulation and physical oceanography of the Scotian Shelf and the Gulf of Maine, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 33:98-115.

Sutcliffe, W.H., Loucks, R.H., Drinkwater, K. et Coote, A.R. (1983). Nutrient flux onto the Labrador Shelf from Hudson Strait and its biological consequences, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40:1692-1701.

Tarapchak, S.J. et Nalewajko, C. (1986). Synopsis: Phosphorus-plankton dynamics symposium, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43: 416-419.

Taylor, C.C., Bigelow, H.B. et Graham, H.W. (1957). Climate trends and the distribution of marine animals in New England, *Fisheries Bulletin*, 57:293-345.

Therriault, J. et Plourde, J. 1997. Development of an environmental index for the detection of climate changes in the Gulf of St. Lawrence: Ecological interpretation of first results and implications for future monitoring programs, dans *Climate change and climate variability in Atlantic Canada, Vol. VI, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, R.W. Shaw (dir.), Environnement Canada, région de l'Atlantique, Bedford (N.-É.), p. 226-232.

Thomson, K.A., Ingraham, W.J. Healey, M.C. LeBlond, P.H. Groot, C. et Healey, C.G. (1992). The influence of ocean currents on latitude of landfall and migration speed of sockeye salmon returning to the Fraser River, *Fisheries Oceanography*, 1:163-179.

Trenberth, K.E. et Hoar, T.J. (1996). The 1990-1995 El Nino-Southern Oscillation event: Longest on record, *Geophysical Research Letters*, 23:57-60.

Trenberth, K.E. et Hurrell, J.W. (1994). Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Climate Dynamics*, 9:303-319.

Vinebrooke, R.D. et Leavitt, P.R. (1996). Effects of ultraviolet radiation on periphyton in an alpine lake, *Limnology and Oceanography*, 41:1035-1040.

Vollenweider, R.A. (1969). Water Management Research, OCDE Paris, DAS/CSI/68.27, pages div.

Wackernagel, M. et Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing human impact on the earth*, New Society Publishers, Gabriela Island (C.-B.), 160 p.

Ware, D.M. et G.A. McFarlane (1995). Climate-induced changes in Pacific hake (*Merluccius productus*) abundance and pelagic community interactions in the Vancouver Island upwelling system, dans *Climate change and northern fish populations*, R.J. Beamish (dir.), Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 121, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.), p. 509-521.

Webster, K.E., Kratz, T.R., Bowser, C.J. et Magnuson, J.J. (1996). The influence of landscape position on lake chemical responses to drought in northern Wisconsin, *Limnology and Oceanography*, 41:977-984.

Welch, D.W., Chigirinsky, A.I. et Ishida, Y. (1995). Upper thermal limits on the oceanic distribution of Pacific salmon (*Oncorhynchus spp*.) in the spring, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52:489-503.

Williamson, C.E., Stemberger, R.S., Morris, D.P., Frost, T.M. et Paulsen, S.G. (1996). Ultraviolet radiation in North American lakes: attenuation estimates from DOC measurements and implications for plankton communities, *Limnology and Oceanography*, 41:1024-1034.

Wismer, D.A. et Christie, A.E. (1987). *Temperature relationships of Great Lakes fishes: a data compilation*, Great Lakes Fishery Commission, Special Publication 87-3, Ann Arbor (Mich.), 195 p.

Wood, C.M. et McDonald, D.G. (1997). Préface dans *Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish*, C.M. Wood et D.G. McDonald (dir.), Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.).

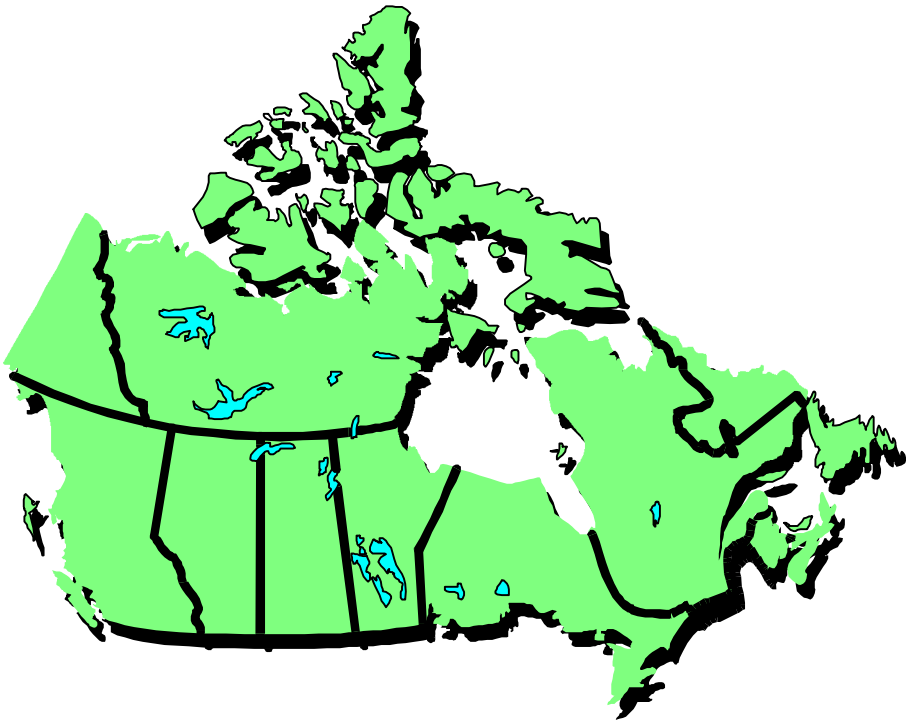
Wooster, W.S. et A.B. Hollowed (1995). Decadal-scale variations in the eastern subarctic Pacific: A. Winter ocean conditions, dans *Symposium on Climate Change and Northern Fish Populations*, R.J. Beamish (dir.), Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 121, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.), p. 81-85.

Xieh, L. et Hsieh, W.W. (1989). Predicting the return migration routes of the Fraser River sockeye salmon (*Onchorynchus nerka*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46:1287-1292.

# CHAPITRE SIX

# IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS CANADIENNES

*Rica Saporta, Jay R. Malcolm et David L. Martell*[1]



1. Faculté de foresterie, Université de Toronto, 33, rue Willcocks, Toronto (Ontario) M5S 3B3; téléphone : (416) 978-6960, courriel : martell@smokey.forestry.utoronto.ca

## RÉSUMÉ

Des études récentes du climat de la Terre portent à croire que les augmentations des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone ($CO_2$) et d'autres gaz anthropiques sont, à tout le moins, partiellement responsables d'une tendance au réchauffement qui diffère des types de fluctuations antérieures des températures de la planète. Des concentrations plus élevées de ces gaz " à effet de serre " (GES) auront des impacts directs et indirects sur les forêts du Canada, y bouleversant la disponibilité des éléments nutritifs, les processus physiologiques, les perturbations naturelles, l'habitat faunique et l'offre et la demande de produits forestiers. Au nombre des impacts prévus du changement climatique sur les forêts canadiennes figurent les suivants :

1. Les forêts du Canada emprisonnent des quantités importantes de carbone, car la matière organique du sol s'y décompose lentement. Or, la mesure dans laquelle elles servent de source ou de puits net varie selon la région et dans le temps et est influencée par des processus de perturbation naturelle comme le feu et les insectes. Des températures plus élevées accéléreront le taux de décomposition. La vitesse du réchauffement déterminera la mesure dans laquelle les écosystèmes forestiers du Canada se transformeront en source ou en puits de carbone. Elle influera à son tour sur le taux de décomposition de la matière organique et sur la capacité des écosystèmes forestiers d'intégrer ce nouveau carbone à leur production de biomasse.

2. Le changement climatique prévu provoquera des épisodes de sécheresse plus nombreux dans les régions continentales et, dans les régions côtières, des tempêtes plus fréquentes et plus violentes, et des dommages causés par le vent; de plus, il sera à l'origine d'un stress causé par la sécheresse et attribuable à la redistribution des précipitations ainsi que d'une augmentation de la fréquence et de la gravité des feux.

3. Des températures plus élevées accéléreront la croissance de la végétation.

4. Des concentrations atmosphériques de $CO_2$ plus élevées se traduiront par une plus grande efficience d'utilisation de l'eau par les plantes et peuvent entraîner une productivité accrue attribuable à la fertilisation par le dioxyde de carbone.

5. Il est prévu que l'aire de répartition actuelle des espèces individuelles et des associations d'espèces migrera vers le nord (et vers de plus hautes altitudes). Certaines espèces pourront disparaître aux limites de leur présente aire d'extension. L'extension vers le nord sera freinée par des obstacles géographiques et anthropiques et par des niveaux de rayonnement solaire plus faibles.

6. La superficie de la forêt boréale devrait diminuer considérablement. Les espèces des prairies et des forêts feuillues tempérées du sud migreront vers le nord, mais leur progression sera entravée par les sols pauvres et les régimes de rayonnement solaire.

7. La moindre grande connectivité des habitats, l'invasion par des espèces exotiques, la disparition de milieux humides et le déséquilibre entre les conditions biotiques de l'habitat et le climat réduiront l'efficacité de l'habitat faunique et des réserves.

8. L'industrie forestière pourrait être capable d'adopter de nouvelles technologies et d'utiliser des essences différentes ainsi que de mettre en application un plan à long terme d'optimisation de l'emplacement de ses centres de transformation et de ses opérations d'exploitation forestière, mesures qui lui permettront de surmonter les nouvelles conditions climatiques. Cependant, sa capacité d'y parvenir dépendra en fin de compte de la vitesse et de l'ampleur du changement climatique, ainsi que de l'endroit où il surviendra.

Les auteurs ont cerné nombre de besoins en matière de recherche forestière et climatique, besoins découlant en grande partie de l'insuffisance des connaissances actuelles sur les processus à une grande échelle temporelle et spatiale et sur leurs impacts. Pour simplifier l'analyse, il est certes possible de décomposer certains des effets de ces processus en sous-processus, mais il faut corréler les prévisions basées sur l'analyse de ces sous-systèmes au processus dans son ensemble (Walters, 1986). Les principaux besoins en matière de recherche sont les suivants :

1. Mettre sur pied une base de données climatiques internationale normalisée.

2. Mieux comprendre les processus biologiques fondamentaux agissant chez les espèces végétales individuelles et dans les forêts.

3. Élaborer des modèles climatiques régionaux qui fournissent des renseignements stratégiques régionaux, y compris la fréquence des phénomènes extrêmes (comme les tempêtes de vent et de pluie) qui ont des effets importants sur les écosystèmes à l'échelle régionale et locale.

4. Élaborer des modèles qui intègrent les processus climatiques et écologiques.

5. Élaborer des modèles dynamiques qui décrivent la phase de transition du changement climatique et sa relation dynamique avec les processus écologiques.

6. Intégrer les changements d'utilisation des terres aux modèles de la répartition de la végétation.

## INTRODUCTION

Le présent chapitre examine l'état de nos connaissances actuelles sur les impacts du changement climatique sur les forêts canadiennes dans le cadre de l'Étude pan-canadienne. Il s'appuie sur l'étude de Shugart *et al.* (1986), en mettant l'accent sur les forêts du Canada. Il donne un aperçu général et se veut un complément aux analyses régionales plus détaillées sur les forêts présentées dans les six rapports régionaux (Arctique, Atlantique, Québec, Ontario, Prairies, Pacifique et Yukont) de l'ÉPC.

### *Changement climatique prévu*

*Les récentes augmentations des concentrations atmosphériques de $CO_2$ et d'autres gaz anthropiques semblent être associées à des élévations correspondantes de la température*

*moyenne du globe. Des modèles du climat de la Terre laissent supposer que cette tendance au réchauffement peut être, à tout le moins, partiellement attribuable à ces " gaz à effet de serre ".* On sait que la température moyenne de la Terre varie en raison de l'excentricité de l'orbite de la planète, de son inclinaison et de la précession des équinoxes (Webb, 1992); on pense également que les changements atmosphériques d'origine anthropique influent eux aussi sur les températures de la planète (GIEC, 1996). L'analyse des résidus fossiles de pollens, des données des carottes de glace et des trous de forage ainsi que d'autres techniques permettent de suivre l'évolution à long terme du climat. L'analyse des données de trous de forage effectuée par Deming (1995) a révélé que la température avait monté de 0,8 à 1,5 °C dans les différentes régions du Canada, dans certains cas à partir de 1860, et dans d'autres, aussi récemment qu'en 1948. Schneider (1989) a constaté que, globalement, la température ambiante et la concentration atmosphérique de $CO_2$ ont augmenté depuis la révolution industrielle. Des analyses des cernes de croissance d'arbres des forêts boréales les plus au nord de la planète (D'Arrgio et Jacoby, 1993; Jacoby et D'Arrgio, 1989; Jacoby et D'Arrgio, 1995) ainsi que des données sur la température des courants océaniques (Hill, 1995) et de l'eau des lacs (Schlinder *et al.*, 1990) révèlent toutes une tendance récente au réchauffement qui dépasse le niveau prévisible attribuable à la variabilité naturelle du climat ou au rétablissement postérieur au Petit âge glaciaire (1840 à 1880) (D'Arrgio et Jacoby, 1993; Jacoby, D'Arrgio et Davaajamts, 1996). Thomson (1995) a souligné que les régimes des phases climatiques ont évolué à un rythme sans précédent depuis les années 40 et que ces changements ne peuvent être attribués uniquement à la variabilité du rayonnement solaire, mais correspondent à des hausses des concentrations atmosphériques de $CO_2$. Bien qu'aucun lien de causalité n'ait été établi en regard des données antérieures, il est généralement avéré que le $CO_2$ contribue à l'élévation de la température, car il emprisonne dans l'atmosphère la chaleur rayonnant de la Terre (Schneider, 1989; Houghton et Woodwell, 1989). Cet effet est corroboré par plusieurs MCG qui ont établi que les concentrations atmosphériques de gaz à l'état de traces affectaient le climat (Hansen *et al.*, 1988; Manabe et Wetherald, 1987). Les MCG utilisés pour simuler le climat terrestre constituent le principal outil de prévision des tendances futures du climat dans le cadre de divers scénarios prévoyant différentes concentrations de $CO_2$. Sulzman *et al.* (1995) présentent une bonne vue d'ensemble des MCG. Le réchauffement futur dû à l'effet de serre devrait être plus marqué à de plus hautes latitudes (Houghton et Woodwell, 1989; Manabe et Wetherald, 1987; Rosenzweig et Parry, 1994) et l'augmentation du $CO_2$ devrait entraîner une diminution des précipitations à l'échelle de la planète (Houghton et Woodwell, 1989). Le Canada connaîtra un climat plus chaud et plus sec au cours des 50 prochaines années (Sulzman *et al.*, 1995). Selon les prévisions, l'élévation de la température moyenne mondiale devrait se situer entre 1 et 3,5 °C d'ici 2100 (GIEC, 1996), tandis que les températures estivales et hivernales moyennes devraient monter respectivement de 2 à 6 °C et de 8 à 12 °C (Ryan, 1991). Des simulations du climat planétaire prévu, en présence de concentrations doubles ou quadruples du $CO_2$ actuel (2 X $CO_2$ et 4 X $CO_2$), laissent supposer que ces changements ne seront pas uniformément répartis. En fait, certaines régions deviendront plus chaudes et plus sèches, tandis que d'autres connaîtront un climat plus frais et plus humide (Manabe et Wetherald, 1980). Certains faits nous autorisent à penser qu'un changement climatique brusque est également possible (Crowley et North, 1988). Cela est d'autant plus préoccupant qu'un changement plus rapide risquera de provoquer des bouleversements écosystémiques inattendus et peut-être plus catastrophiques qu'un changement lent et graduel (Walker, 1991; Webb, 1992; Grabherr *et al.*, 1994; Fonds mondial pour la nature (WWF), 1994; Malcolm et Markham, 1996; GIEC, 1996).

*L'augmentation des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, le gaz à effet de serre le plus courant, aura des impacts sur les forêts du Canada, car elle influera sur les processus physiologiques (impact direct) ainsi que sur les perturbations du milieu, les changements de l'habitat et l'offre et la demande de produits forestiers (impacts indirects).*

Le méthane, les oxydes nitreux et les chlorofluorocarbures accentuent " l'effet de serre ", mais c'est toutefois le rejet de $CO_2$ provenant de la combustion de combustibles fossiles qui contribuerait le plus au " forçage radiatif du climat " de la planète. (Jenkinson *et al.*, 1991). La déforestation serait également un facteur contribuant et les tendances à cet égard, observées dans les seules forêts tropicales, seraient responsables de 20 à 30 % de l'accumulation actuelle de $CO_2$ (Dobson *et al.*,1989). D'après la documentation existante, les concentrations atmosphériques de $CO_2$ devraient augmenter régulièrement pour doubler d'ici la deuxième moitié du XXI$^{e}$ siècle (Pollard, 1985; Roberts, 1988; Horgan, 1989; GIEC 1996). Cette hausse des concentrations devrait faire monter la température moyenne de la planète et le niveau de la mer (Horgan, 1989; Manabe et Stouffer, 1993) et influer sur l'étendue des milieux humides (Horgan, 1989; Poiani et Johnson, 1991), les taux d'extinction des espèces (Horgan, 1989), les niveaux et la répartition des précipitations (Joyce *et al.*, 1990), la teneur en eau et la répartition des sols (Manabe et Wetherald, 1987; Rind *et al.*, 1990; Neilson et Marks, 1994), et les modes de répartition des biomes (Rizzo et Wiken, 1992; Monserud *et al.*, 1993; Neilson et Marks, 1994). Dans le cadre d'un projet récent qui a permis de coupler un MCG et des modèles de la végétation, on a prévu des gains ou des pertes importantes (38-53 %) de la superficie boisée (VEMAP Members, 1995). Les forêts devraient être énormément touchées par les changements de la température moyenne et de la quantité d'eau disponible dans le sol, mais devraient également ressentir les effets directs de la hausse des concentrations de $CO_2$ (Musselman et Fox, 1991).

*Des phénomènes écologiques récents sont peut-être des signes avant-coureurs d'un réchauffement climatique anthropique.*

De nombreux phénomènes, comme la fissure de la plate-forme de glace Laser, le recul des glaciers, le déclin des populations de zooplancton du courant de la Californie et l'intensification des phénomènes climatiques extrêmes aux États-Unis, portent à croire que l'effet de serre se fait déjà sentir dans notre environnement (Gelbspan, 1995). Les écosystèmes en subissent également les effets. Ainsi, un relevé récent de la flore alpine poussant sur des sommets de plus de 3 000 m a permis de constater que des espèces avaient migré vers des niches plus fraîches situées à plus haute altitude, preuve que la tendance au réchauffement climatique a déjà influé sur ces communautés végétales alpines (Grabherr *et al.*, 1994).

### *Réservoirs de carbone dans les forêts canadiennes*

*Les forêts canadiennes constituent un important réservoir terrestre de carbone.*

Selon les estimations, la biomasse de la végétation et du sol des forêts du Canada contiendrait respectivement 12 petagrammes (Pg) et 211 Pg de carbone (Dixon *et al.*, 1994). Le sol et la végétation de la région forestière tempérée, dont la superficie est de 26,8 millions d'hectares (ha), constituent à eux seuls un réservoir d'environ 3,9 Pg (Heath *et al.*, 1993). Hendrickson (1990) a estimé que la quantité de carbone stockée dans les forêts canadiennes était en moyenne de 31 tonnes métriques par hectare (tm/ha), en comparaison d'une moyenne mondiale de 14,5 tm.

*Plusieurs facteurs liés au milieu et à l'aménagement influent sur la capacité de séquestration du carbone.*

La répartition des réserves de carbone entre le sol et la végétation varie selon le couvert forestier (Birdsey, 1990) et les sols forestiers, et les régions à climat plus frais stockent généralement une plus grande quantité de carbone (Hendrickson, 1990). La capacité de séquestration du carbone des forêts plus âgées est plus réduite que celle des jeunes forêts (Hook, 1990; Kurz et Apps, 1993). Une simulation du changement climatique a montré que les forêts extra-tropicales pourraient avoir un taux plus élevé de rejet du carbone en raison de l'accélération de la décomposition de la biomasse du sol et du dépérissement des forêts au cours d'une période de 50 à 150 ans, phénomène qui pourrait atteindre jusqu'à 3 Pg par année et aggraver l'" effet de serre " (King et Neilson, 1992). Des perturbations, comme l'exploitation et le feu, peuvent être considérées comme le passage du carbone d'un état à un autre, dans ce dernier cas, de la biosphère à l'atmosphère (Birdsey, 1990; Hendrickson, 1990; Kurz et Apps, 1993; Kohlmaier *et al.*, 1995).

Kurz *et al.* (1995) ont constaté que les phénomènes naturels de perturbation (c.-à-d. le feu et les insectes) ont des répercussions importantes sur le bilan du carbone de la forêt boréale canadienne. Ils ont découvert que toutes les forêts du Canada (y compris la portion de la forêt boréale située dans les limites canadiennes) ont agi comme puits de carbone au cours de la période 1920-1989, mais que des perturbations naturelles semblent les avoir transformées au point où elles ont commencé à être une source modeste de carbone par suite des incendies dont elles ont été le siège de 1970 à 1989.

Selon Kurz et Apps (1995), la mesure dans laquelle la forêt boréale canadienne agira comme source ou puits de carbone dépendra de l'impact conjugué des perturbations naturelles et des pratiques d'aménagement. À l'aide du modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien, Greenough *et al.* (1997) ont illustré l'influence des méthodes d'évaluation utilisées sur les estimations des flux de carbone.

### *Industrie forestière canadienne*

*Les forêts sont depuis longtemps partie intégrante de l'économie canadienne.*

Les forêts jouent depuis longtemps un rôle important dans l'économie et, sur le plan culturel, elles ont contribué à définir notre identité sociale. Le Canada compte 417,6 millions d'hectares de forêts (42 % de son assise territoriale totale), dont 119 millions sont aménagés pour la production de bois et 50 millions sont soustraits à l'exploitation en vertu de la loi. Les forêts fournissent 1 emploi sur 15 aux Canadiens et leurs écosystèmes abritent plus de 200 000 espèces sauvages. Rowe (1972) a divisé les vastes étendues de forêts canadiennes en régions plus petites en se fondant sur les associations végétales et les caractéristiques géographiques. La répartition des espèces a tendance à être corrélée aux isothermes des températures maximales et minimales moyennes (Mikola, 1962; Root, 1988; Arris et Eagleson, 1989; Cannell *et al.,* 1989; Singh et Wheaton, 1991) et, de ce fait, les régions de Rowe se caractérisent par une zonation nord-sud dans l'est et altitudinale dans les régions montagneuses de l'ouest.

*Les changements de l'emplacement et de la productivité des ressources forestières attribuables à l'évolution du climat influeront sur les décisions d'aménagement forestier.*

Nombre des facteurs servant à prendre des décisions en matière d'aménagement risquent d'être influencés par le réchauffement mondial, y compris les écotypes appropriés, l'exploitation forestière, les prescriptions sylvicoles et la demande sur le marché. L'incertitude liée au changement climatique rend encore plus hypothétiques les résultats des modèles utilisés pour prévoir l'accroissement des forêts et l'ordonnancement des coupes ainsi que les conclusions des analyses de l'offre et de la demande (Rose *et al.* 1987).

## FORÊTS DANS UN CLIMAT EN CHANGEMENT

Les réactions des forêts à l'évolution du climat seront de deux ordres : les changements directs provoqués par l'augmentation des concentrations de ges et les changements indirects amenés par l'évolution du climat provoquée par les GES — les modifications des niveaux et de la répartition des températures moyennes mondiales et des précipitations (Watt, 1947). On a analysé les réactions des forêts au changement environnemental à l'aide de modèles des trouées qui simulent la succession et les interactions dans des peuplements forestiers (Bray, 1956) ou de modèles biogéographiques qui simulent les réactions à la disponibilité et au cycle des éléments nutritifs et/ou de l'eau (Neilson et Marks, 1994).

Au cours des différentes périodes géologiques, divers changements écologiques ont entraîné des déplacements de l'aire d'extension des espèces, des modifications de la composition des communautés et l'extinction de diverses espèces, et il faut s'attendre à ce que de telles réactions accompagnent l'évolution du climat. Les impacts devraient être plus graves en présence de changements plus marqués (Peters, 1990). Une synergie éventuelle entre le changement climatique, la destruction de l'habitat, et des taux de dispersion lents peut entraver l'extension dans de nouveaux habitats et provoquer l'extinction de différentes espèces (Peters, 1990). Il est

également possible que le changement climatique fasse apparaître de nouveaux stress physiologiques et de nouvelles séries d'interactions concurrentielles (Peters et Darling, 1985).

***Réactions écophysiologiques***

Réactions des arbres à la température et à la disponibilité de l'eau

*Les changements de la température moyenne et de la disponibilité en eau influent énormément sur la productivité, la répartition et la santé des forêts.*

La croissance des arbres est fortement influencée par les conditions climatiques, comme la température et le bilan hydrique. Un examen des résultats d'anciens tests d'acclimatation (provenance) menés en Finlande a révélé que les arbres transplantés hors de leur région d'origine, dans des endroits présentant un profil de température semblable à celui prévu sous un climat modifié par l'" effet de serre ", ont bien réagi (bonne croissance) à l'élévation de la température, malgré l'effet limitant des éléments nutritifs du sol (Beuker, 1994). Des analyses des cernes de croissance effectuées dans l'est de l'Amérique du Nord ont montré que les températures estivales actuelles et antérieures, conjuguées aux précipitations, influaient directement sur l'accroissement radial d'essences comme la pruche* et l'épinette rouge (Cook et Cole, 1991). Gholz (1982) a découvert que la production primaire nette de la portion aérienne d'écosystèmes du nord-ouest du Pacifique était étroitement corrélée à la température hivernale moyenne de l'air et au bilan hydrique de la saison de croissance. Dans les endroits situés à de hautes latitudes, le stress causé par l'humidité semble être un facteur limitant l'accélération de la croissance due à un réchauffement de la température (Jacoby et D'Arrgio, 1995). Stephenson (1990) a constaté que la mesure du bilan hydrique, qui englobe à la fois la disponibilité de l'eau et de l'énergie, est un meilleur descripteur des communautés végétales que les exigences en matière de température moyenne. Dans la région des Appalaches et en Finlande, on a établi un lien entre des températures hivernales plus élevées et le dépérissement des arbres attribuable à un débourrement précoce qui expose les bourgeons à des gelures (Johnson *et al.*, 1988; Hänninen, 1991). Les dégâts subis par les bourgeons en hiver sont peut-être la raison pour laquelle les variations de température ont des effets plus marqués sur la végétation que des variations des précipitations lors de la simulation des impacts du changement climatique dans certaines régions boisées.

Réaction de la végétation à des concentrations plus élevées de $CO_2$

*Des études empiriques de l'élévation des concentrations de $CO_2$ en milieu agricole ont révélé une accumulation accrue de biomasse.*

Cure et Acock (1986) ont analysé la documentation sur les effets d'un doublement des concentrations de $CO_2$ sur les plantes cultivées (p. ex., maïs, blé et sorgho). Ces espèces ont augmenté leur taux d'échange du $CO_2$ d'un pourcentage pouvant atteindre 29 %. On a également noté une amélioration de la croissance qui était toutefois limitée par la disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs dans le sol. Dans le cadre d'une étude des prairies semi-arides, on a constaté

* L'annexe A énumère tous les noms scientifiques et vernaculaires des espèces.

que des modifications des précipitations provoquaient des réactions plus spectaculaires chez la végétation que des changements des concentrations atmosphériques de $CO_2$ (Hunt *et al.*, 1991). On a également noté une fertilisation par le $CO_2$ en milieu arctique (Oechel et Vourlitis, 1994), mais, dans les régions où les concentrations atmosphériques de $CO_2$ actuelles sont déjà suffisantes pour que se déroulent des processus physiologiques, on a observé que le doublement du $CO_2$ avait peu d'impact (Billings *et al.*, 1984).

*Des études simulant des concentrations plus élevées de $CO_2$ montrent un accroissement de la production primaire nette de l'écosystème.*

Lüdeke *et al.* (1995) ont comparé les réactions de la végétation à l'aide du modèle de biosphère Frankfurt, avec et sans fertilisation par le $CO_2$. En triplant les concentrations actuelles de $CO_2$, ils ont noté une diminution de 22 % de la productivité primaire nette (PPN) en l'absence de fertilisation, comparativement à une augmentation de 9 % en présence d'une fertilisation par le $CO_2$. Ils ont attribué cette différence à la respiration autotrophe et aux limites hydriques lorsque la fertilisation par le $CO_2$ était exclue du modèle. Melillo *et al.* (1993) ont utilisé un modèle fondé sur les processus, y compris le cycle du carbone, pour estimer la PPN et le cycle de l'azote du sol. À la suite d'un changement climatique entraînant un doublement du $CO_2$, la PPN a augmenté de 20 à 26 %. Comins et McMurtrie (1993) avaient également prévu une augmentation initiale semblable de la PPN, même si leur modèle montrait que cette hausse diminuait à moins de 10 % après cinq années de concentrations plus élevées de $CO_2$. Ils ont attribué ce phénomène à un approvisionnement constant en éléments nutritifs qui a rapidement atteint sa capacité maximale et a débouché sur un stress nutritionnel. Dans les écosystèmes tempérés septentrionaux, on a attribué l'augmentation de la PPN de l'écosystème à l'élévation de la température et à une meilleure disponibilité de l'azote (Comins et McMurtrie, 1993).

*Des concentrations plus élevées de $CO_2$ modifient les processus biologiques chez les plantes.*

Chez toutes les plantes étudiées jusqu'ici, Allen (1990) a constaté que la fertilisation par le $CO_2$ se traduisait par une augmentation du rendement photosynthétique (tout comme McConnaughay *et al.*, 1993), de la surface foliaire, de la biomasse et du rendement en biomasse ainsi que par une diminution du taux de transpiration par unité de surface foliaire (tout comme Eamus et Jarvis, 1989; Mooney *et al.*, 1991). L'augmentation du $CO_2$ a entraîné une fermeture partielle des stomates qui a eu pour effet de réduire l'absorption d'autres polluants atmosphériques, de stimuler l'assimilation du carbone et d'accroître l'efficience d'utilisation de l'eau (Eamus et Jarvis, 1989; Allen, 1990; Idso et Idso, 1994). Lorsque les plantes étaient victimes d'un stress hydrique ou nutritionnel, les concentrations plus élevées de $CO_2$ ont accentué la fixation de l'azote et la compensation pour le manque de lumière et ont amélioré le rendement photosynthétique, ce qui a entraîné une augmentation de la biomasse, tant aérienne que souterraine (Kienast et Luxmoore, 1988; Eamus et Jarvis, 1989; Idso et Idso, 1994). Kienast et Luxmoore (1988) ont constaté que la fertilisation par le $CO_2$ risquait davantage de se produire dans des peuplements clairs soumis à un stress climatique modéré que dans les peuplements faiblement ou fortement stressés. Des études récentes en laboratoire révèlent que la hausse du $CO_2$ déclenche un mécanisme de séquestration des éléments nutritifs dans la microflore qui limite les éléments nutritifs assimilables lors de la croissance. Les espèces à mycorhizes étaient mieux en mesure d'assimiler les éléments nutritifs,

mais les espèces non mycorhizées ont eu des problèmes nutritionnels (Diaz *et al.*, 1993). Long (1991) a noté que la hausse du $CO_2$ pourrait, en réalité, entraîner une élévation de la température optimale d'absorption du $CO_2$ de pouvant atteindre 5 °C, selon l'interaction entre la température et la concentration de $CO_2$. De telles interactions pourraient modifier l'ampleur et le type d'effet (gain ou perte de biomasse) dû à la fertilisation par le $CO_2$.

*Selon les prévisions, l'augmentation des concentrations de $CO_2$ devrait amplifier le cycle du carbone.*

Keeling *et al.* (1996) ont relevé des changements dans l'amplitude du flux annuel de $CO_2$ et les ont attribués à une plus grande assimilation du $CO_2$ par les écosystèmes forestiers. Lors de la modélisation du bilan annuel du carbone, Kurz *et al.* (1992) ont découvert qu'une augmentation de la biomasse de 10 % entraînait une hausse de 10 % de l'absorption du carbone, de 10 % de la quantité de carbone rejetée par des perturbations et de 2 % du flux de carbone dans le sol. Ils sont arrivés à la conclusion que le changement climatique aura un impact sur la dynamique de la séquestration du carbone dans les forêts et dans le sol et qu'il pourrait y avoir une rétroaction négative entre le $CO_2$ et le taux de croissance des arbres.

*Des interactions entre les cycles du carbone, de l'azote et d'autres éléments nutritifs peuvent atténuer tout effet éventuel de la fertilisation.*

Les activités de modélisation des interactions entre le cycle du carbone et de l'azote effectuées par Luxmoore, Wullscheleger et Hanson (1993) ont révélé que la fertilisation par le carbone n'entraînait aucune amélioration de la croissance. Pastor et Post (1988) ont cependant relevé une rétroaction positive entre ces deux cycles, qui étaient tributaires de la teneur en eau et de la température du sol. Rastetter *et al.* (1995) ont modélisé les interactions possibles des cycles du carbone et de l'azote et ont noté que les effets de l'interaction dépendront de la structure future de la végétation à long terme. Shaver *et al.* (1992) ont également jugé importantes de telles interactions entre les cycles du carbone et d'autres éléments nutritifs.

***Répartition potentielle des biomes***

*La répartition des biomes est en partie déterminée par des facteurs climatiques.*

Il est avéré que la répartition des biomes est surtout déterminée par le climat (Neilson, 1986 et 1987). Cette répartition est fonction des exigences écologiques des espèces (température moyenne et disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs dans le sol) et des interactions écologiques entre les espèces et leur milieu (Pastor et Post, 1990). Suffling (1995) a découvert que la fréquence des perturbations causées par le feu pouvait à elle seule expliquer 61 % des variations observées entre les types forestiers de la forêt boréale. Un taux de perturbation élevé modifie la composition des espèces d'une région forestière et accélère la réaction au changement climatique (Overpeck *et al.*, 1990).

*Selon les prévisions, les espèces d'arbres et les associations végétales devraient migrer vers des régions où le climat actuel est plus frais.*

Le réchauffement dû à l'effet de serre devrait modifier l'emplacement actuel des biomes. L'élévation de la température moyenne devrait repousser la limite forestière à des altitudes et latitudes supérieures (Wheaton et Singh, 1988; Singh, 1988; Kullman, 1990; Leemans et van den Born, 1994). En analysant l'impact du doublement des concentrations de $CO_2$ sur la forêt boréale de Scandinavie, Prentice, Sykes et Cramer (1991) se sont aperçus que cette zone s'était déplacée de plus de 1 000 km vers le nord en l'espace de 150 à 200 ans. Les auteurs d'une étude (Franklin *et al.* 1992) ont prévu qu'un doublement du $CO_2$ (c.-à-d. une hausse de 2,5 à 5 °C) équivaudrait à décaler de 500 à 1 000 m plus en altitude ou de 200 à 500 km plus au nord les conditions climatiques actuelles. À l'aide d'un modèle biogéographique tenant compte de l'humidité relative, de la tension de vapeur, de la température et de la vitesse du vent, Neilson (1993b) a prévu la répartition de la végétation selon divers scénarios de doublement du $CO_2$ et a pronostiqué un dépérissement majeur des forêts attribuable aux conditions de sécheresse découlant d'une évapotranspiration supérieure aux précipitations. Des simulations des déplacements de végétation dans l'est de l'Amérique du Nord effectuées à l'aide de trois MCG différents à doublement du $CO_2$ montrent que le changement de répartition de la végétation à prévoir au cours des 200 à 500 années ultérieures est d'une ampleur égale à celui survenu au cours des 10 000 dernières années (Overpeck *et al.*, 1991). La migration prévue vers le nord des zones climatiques forestières (Houghton et Woodwell, 1989) ainsi que l'extension vers le nord de la limite latitudinale des forêts (Lescop-Sinclair et Payette, 1995; Malcolm et Markham, 1997) devraient entraîner une réduction de la superficie des biomes de la toundra et subarctiques et une expansion et un décalage vers le nord de la région boréale et tempérée et des prairies (Leniham et Neilson, 1995). Toutefois, les prévisions à l'égard de la répartition des forêts boréales et tempérées et des prairies varient selon le MCG, le modèle biogéographique de la végétation et d'autres données d'entrée (VEMAP Members, 1995). À l'aide de modèles des trouées dans un état d'équilibre, Urban *et al.* (1993) ont constaté des migrations altitudinales de 500 à 1 000 m dans certaines écozones. Ils ont également noté que des changements de la structure d'âge et de la composition des espèces avaient de profonds effets sur la période et l'échelle (individu ou communauté) de reconstitution du couvert. Le changement de composition d'une communauté sera en partie provoqué par des espèces qui sont éliminées par la concurrence végétale ou qui ne sont pas adaptées aux nouvelles conditions climatiques. Ainsi, des essences d'épinette (*Picea* sp.) pourraient être évincées de la zone de transition entre les forêts boréale et feuillue, parce qu'elles sont incapables de se régénérer pendant des hivers chauds (Prentice *et al.*, 1993). Toutefois, d'après Perry *et al.* (1990), les limites des aires d'extension changeront selon les espèces individuelles, mais les espèces associées de longue date ne migreront pas individuellement, ce qui aura pour effet de faire apparaître dans différentes sites des associations végétales semblables à celles existant plus au sud. Il se peut que les changements d'aires d'extension des espèces d'arbres ne se produisent que des décennies ou des siècles après le changement climatique (Brubaker, 1986; Sirois *et al.*, 1994). Des simulations ont montré que des communautés ont continué de réagir au changement jusqu'à 300 ans après la stabilisation du climat. Au nombre des changements observés figurent l'accroissement de la biomasse de la toundra et de la forêt boréale et des modifications de la composition des forêts (Solomon, 1986).

*Les changements de la répartition des populations varieront d'une espèce à l'autre.*

Les communautés végétales des biomes évolueront à mesure que les espèces qui les composent réagiront au changement climatique (Kullman, 1990; Franklin *et al.*, 1992) et migreront vers de nouvelles régions (Neilson, 1987). Les archives palynologiques révèlent que les communautés passées des biomes étaient fort différentes de celles d'aujourd'hui, puisque que l'épinette blanche dominait alors la forêt boréale, que les thuyas étaient les essences dominantes de la zone argileuse de l'Ontario et que les populations de pin blanc se retrouvaient à 140 km au nord de leur aire d'extension actuelle (Liu, 1990). Dans nombre de cas, les communautés végétales sont en fait des groupements temporaires d'espèces modelés par les conditions environnementales qui règnent et ces associations évolueront avec le climat (Huntley et Webb, 1989).

*La vitesse du changement climatique influera sur la faculté d'établissement.*

La vitesse à laquelle se produira le changement climatique semble être le facteur le plus important influant sur la répartition future des biomes (Solomon et Bartlein, 1992). Toutefois, selon les prévisions de Starfield et Chapin (1996), la transformation du sud de la toundra canadienne en un écosystème forestier prendra 150 ans et la vitesse du changement climatique, qui influence les réactions de la végétation existante, n'aura pas d'effet sur la période nécessaire à l'évolution globale du type de biome.

**Répartition des essences**

*La répartition des essences est sensible aux conditions climatiques.*

Les limites des aires de répartition des essences sont souvent étroitement corrélées aux extrêmes de température et de précipitations (Davis *et al.*, 1986; Graham et Grimm, 1990; Davis et Zabinski, 1992). Des études effectuées en Amérique du Nord ont établi un lien entre la limite forestière et l'exposition à différents types de masse d'air (Larsen, 1971; Scott *et al.*, 1988). De plus, les résultats d'essais de transplantation menés pour établir la dépendance climatique de l'établissement de semis de *Quercus* sp. ont révélé que l'intensification du stress causé par la sécheresse estivale et le gel printanier déterminait les limites altitudinales inférieures et supérieures de l'aire d'extension (Neilson et Wullstein, 1983). La technique de modélisation de l'enveloppe climatique (Morse *et al.*, 1993) met à profit cette corrélation entre l'espèce végétale et le climat. Prentice *et al.* (1991) ont construit un modèle de la répartition basé sur les températures moyennes de juillet et de janvier et les précipitations annuelles pour établir les aires d'extension passées des espèces. En intégrant des changements climatiques attribuables à la variation de l'orbite de la Terre, ils ont découvert que les espèces forestières réagissent continuellement au changement climatique par des migrations, ajustant ainsi leurs aires d'extension aux conditions climatiques. Des archives palynologiques de l'est de l'Amérique du Nord et de l'Europe révèlent que des espèces végétales ont élargi leurs aires d'extension vers le nord et l'ouest au cours des périodes interglaciaires, dans certains cas provoquant leur extinction et, dans d'autres, des migrations (Davis, 1983). Une autre étude effectuée dans un transect coupant la limite forestière actuelle dans le nord du Québec a montré que cette limite forestière s'est déplacée vers le nord et vers le sud en réponse au changement climatique (Lavoie et Payette, 1996). Le risque d'extinction

est lié à la distance sur laquelle se déplacent les régions à climat propice et à la vitesse de déplacement de l'habitat (Davis et Zabinski, 1992) ainsi qu'aux possibilités de mouvement/migration qu'offre entre-temps le paysage. Selon les prévisions, le changement climatique devrait avoir les effets les plus profonds sur les populations vivant aux limites de leur aire d'extension (Cannell *et al.*, 1989; Davis et Zabinski, 1992; Thomas *et al.*, 1994) et entraîner des modifications de la disponibilité des éléments nutritifs dues à l'accélération de la décomposition du sol qui permet l'introduction d'espèces améliorant la fixation de l'azote et l'apparition de nouveaux rapports de concurrence (Pastor et Post, 1988; Pastor et Post, 1990). Lors de la modélisation de la réaction des aires d'extension de la pruche du Canada, du bouleau jaune, du hêtre et de l'érable à sucre au changement climatique, Davis et Zabinski (1992) ont découvert que des semis mieux adaptés au nouveau climat dominaient la couverture morte en l'espace de quelques décennies.

*Des études palynologiques ont permis de mesurer les vitesses de migration passées des espèces.*

La plupart des études de la répartition passée des essences s'appuient sur des résidus fossiles de pollen contenus dans le lit de lacs et de cours d'eau. Les populations d'arbres mûrs peuvent prendre de 100 à 200 ans pour réagir à un changement climatique important, de sorte que les archives palynologiques ne peuvent rendre compte des réactions à des événements climatiques brefs (d'une durée de moins de 200 ans), mais sont utiles pour suivre les tendances à long terme de la composition en espèces (Davis et Botkin, 1985). Gear et Huntley (1991) ont découvert qu'une population de pins sylvestres (*Pinus sylvestris*) a complètement disparu du nord de l'Écosse à la suite d'un refroidissement du climat. Ils ont montré que la vitesse de migration de cette essence (375 à 800 m par année) était inférieure d'un ordre de grandeur à celle du changement climatique qui s'est produit. Dans le cadre d'une étude des essences boréales poussant à la limite forestière, on a découvert dans les archives palynologiques des preuves que des espèces avaient réagi à un changement climatique rapide en moins de 150 ans, une période comparable à celle utilisée dans les modèles actuels (MacDonald *et al.*, 1993), et que la dispersion des graines, favorisée par le vent et le relief plat, peut se produire beaucoup plus rapidement (Ritchie et MacDonald, 1986). Dans le cadre d'autres études palynologiques, il a été montré que des taxons avaient déjà migré à raison de 100 à 1 000 m par année et que les taux de migration au sein des taxons sont similaires (Huntley et Webb, 1989). Il a été estimé que le taux maximal d'élévation de la température annuelle moyenne qui permettrait à certaines essences boréales de suivre la migration des aires de répartition serait de 0,015 °C par décennie (WWF, 1994). Certaines espèces végétales risquent de disparaître complètement en raison de l'extrême lenteur de leur migration, de l'insuffisance de diaspores et du morcellement accru du paysage dû à l'activité humaine (Matlack, 1994).

*L'impact sur les arbres mûrs ne devrait pas être discernable tant que n'auront pas été franchis les seuils de tolérance biologique, au-delà desquels apparaît le dépérissement.*

Les peuplements mûrs présentaient peu, voire aucun signe d'accélération de la croissance imputable au $CO_2$, contrairement aux semis qui, manifestement, s'étaient développés dans un milieu riche en $CO_2$ (Luxmoore *et al.*, 1993). Les arbres mûrs devraient être moins sensibles au changement climatique puisque, au cours des décennies ou des siècles qui se sont écoulés depuis leur

naissance, ils ont su s'adapter à des conditions climatiques variables (Franklin *et al.*, 1992; Woods et Davis, 1989). Cependant, l'élévation de la température et la diminution des précipitations finiront par avoir des effets sur les arbres mûrs, à mesure que ces derniers atteindront leurs seuils de tolérance physiologique (Davis et Zabinski, 1992), et pourraient provoquer une mortalité à grande échelle (Neilson, 1995).

***Processus écologiques***

*Il est avéré que des modifications de la température et des précipitations influent sur des facteurs abiotiques comme le pergélisol, la composition chimique du sol et les régimes des perturbations causées par le feu.*

Une étude de l'étendue passée et actuelle du pergélisol dans la forêt boréale canadienne a révélé une diminution de la superficie totale du pergélisol et un déplacement vers le nord de la région pergélisolée (Halsey *et al.*, 1995).

La respiration du sol est étroitement corrélée à la température moyenne (Raich et Schlesinger, 1992; Oechel et Vourlitis, 1994) et contrôle le flux de carbone dans le sol. L'élévation de la température du sol qui devrait accompagner le futur changement climatique accroîtra le taux de renouvellement du carbone et du méthane et pourrait entraîner une rétroaction positive à l'" effet de serre " (Christensen, 1991; Raich et Schlesinger, 1992; Lloyd et Taylor, 1994). Un climat engendrant un régime plus humide dans les sols de la toundra accroîtra le flux de méthane, tandis qu'un régime plus sec pourrait entraîner sa transformation en puits de méthane (Christensen, 1991).

Le changement climatique influera sur les régimes de perturbation (Davis et Zabinski, 1992), y compris la fréquence des incendies (Stocks, 1993 et Stocks *et al.*, 1996), les infestations d'insectes et les dégâts causés les tempêtes de vent (Clark, 1988; Gates, 1990; Overpeck *et al.*, 1990; Franklin *et al.*, 1992). Les modifications que subiront les régimes de perturbation pourraient être suffisamment importantes pour altérer ou détruire des écosystèmes forestiers existants (Loehle et LeBlanc, 1996). Payette *et al.* (1989) ont montré que la fréquence des incendies en forêt boréale présentait une zonation sud-nord et ont laissé entendre que la capacité de régénération après un incendie d'épinettes noires fixe les limites du biome. Torn et Fried (1992; ainsi que Fried et Torn, 1990) ont modélisé la fréquence des feux de végétation sous un scénario de doublement du $CO_2$ et ont découvert que la fréquence des incendies, la superficie détruite par le feu et le nombre de feux échappés augmentaient par comparaison avec un climat sans doublement du $CO_2$. Une simulation du triplement de la superficie détruite annuellement par le feu a provoqué des rejets de carbone presque deux fois plus élevés, révélant que des changements provoqués par le climat dans les régimes de perturbation auraient un impact significatif sur le bilan du carbone (Kurz *et al.*, 1992).

Les infestations de ravageurs forestiers devraient s'aggraver pour deux raisons. Premièrement, les hivers plus doux entraîneront un taux de survie plus élevé des insectes en hibernation qui se traduira par une augmentation des populations au printemps (Franklin *et al.*, 1992). Deuxièmement, on a déjà établi un lien entre des pullulations d'insectes, y compris la livrée des

forêts, la tordeuse des bourgeons de l'épinette et l'agrile du bouleau, et des conditions de sécheresse qui provoquent un stress hydrique et affaiblissent les mécanismes de défense de l'arbre (Gates, 1990; Franklin *et al.*, 1992).

Une intensification du renversement par le vent est à prévoir à mesure que les conditions climatiques deviendront plus extrêmes et provoqueront des tempêtes plus fréquentes et plus graves (Gates, 1990). Sur la côte, les tempêtes devraient s'aggraver à mesure que s'élargira l'écart entre les températures en mer et sur terre (Franklin *et al.*, 1992).

## RÉGION FORESTIÈRE BORÉALE

### *Écologie*

La région forestière boréale représente environ 75 % du territoire boisé du Canada (Winjum *et al.*, 1993) et forme une large bande depuis la côte du Labrador jusqu'au nord des Rocheuses. Ici, on examinera cette région comme une seule et même entité. Toutefois, les diverses écozones qui se retrouvent dans cette région présentent des différences importantes et parfois spectaculaires.

*La forêt boréale connaît généralement des hivers secs, froids et longs, et des étés humides, chauds et courts.*

En forêt boréale, le climat se caractérise par des étés humides, chauds et courts et par des hivers secs, froids et longs. Plus de la moitié des précipitations tombent en été. L'amplitude des températures annuelles atteint jusqu'à 100 °C (van Cleve *et al.*, 1983; Bonan et Shugart, 1989). Les températures annuelles moyennes varient entre -10 et -4,5 °C dans la partie intérieure du Yukon, entre 1 et 5,5 °C dans le nord de la région côtière de la Colombie-Britannique et entre -4 et 5,5 °C dans la vaste écozone du Bouclier boréal (ESWG, 1996). La plaine continentale septentrionale de la forêt boréale est enneigée jusqu'à huit mois par année, de sorte que la saison de croissance y est courte en comparaison de celle de la presqu'île Avalon où le climat est plus doux et plus humide en raison de l'effet modérateur de l'océan Atlantique (*idem*).

*La région est onduleuse et parsemée de lacs et de cours d'eau et les sols y ont une teneur élevée en matière organique.*

Les formes de relief y sont très variées. L'ouest est dominé par des montagnes avec de hauts sommets et des plateaux, le centre et l'est du pays, par les dépôts glaciaires et lacustres étendus du bouclier précambrien, et les basses terres de la baie d'Hudson, par une vaste plaine sédimentaire basse. Exception faite de la région montagneuse de l'ouest, cette région a un drainage irrégulier et compte de nombreux lacs de petite ou de moyenne taille dans le sud et de grands bassins hydrographiques bas dans le nord (*idem*). Ses sols ont des régimes d'humidité variant de mésoïques mouillés à secs; les tourbières oligotrophes sont courantes ((Payette *et al.*, 1989). Ces régions basses sont souvent ennoyées, pergélisolées périodiquement ou en permanence et propices au développement de la tourbe. Les plaines basses au nord du bouclier précambrien comptent 25 à 50 % de milieux humides et ont des sols organiques. On y trouve des brunisols, des chernozems noirs, des podzols humo-ferriques et des mésisols; le nord est dominé par des sols

organiques et des cryosols (ESWG, 1996). L'épaisse couche de mousse et de sol organique qui recouvre la majeure partie de la région contrôle le flux d'énergie et le cycle des éléments nutritifs et garde les températures du sol basses, empêchant ainsi la décomposition de la matière organique (Payette *et al.*, 1989).

*La forêt boréale est caractérisée par des peuplements monotypiques qui se sont établis à la suite de grandes perturbations.*

Cette région forestière est caractérisée par des peuplements étendus et souvent monotypiques d'épinettes blanches, d'épinettes noires, de pins gris, de sapins baumiers et de mélèzes laricins. Le peuplier faux-tremble et le peuplier baumier ont déjà formé une composante mineure dans cette forêt dominée par les conifères (Rowe, 1972). La proportion d'épinette noire et de mélèze laricin augmente à mesure que l'on se rapproche de la limite forestière (ESWG, 1996). La quantité de peuplier faux-tremble, de peuplier baumier et de saule va grandissant vers l'ouest, dans la zone de transition méridionale. L'écotone où commence à apparaître la végétation de steppe chevauche l'endroit où survient une hausse de 2 °C de la température moyenne (Singh et Wheaton, 1991). Dans l'est, cette zone de transition méridionale se caractérise par un mélange d'essences des régions tempérées, comme le pin blanc, le pin rouge, le bouleau jaune, l'érable à sucre et le frêne noir. (Rowe, 1972). Dans la zone de transition septentrionale, le climat plus rigoureux conjugué à des températures plus basses du sol transforme le paysage en une forêt claire à lichens qui fait graduellement place à la toundra(*idem.*).

*Une gamme très diversifiée d'espèces végétales et animales habitent la forêt boréale.*

Le caribou des bois, l'orignal, la martre, le lynx et l'ours noir sont les espèces de mammifères représentatives de la forêt boréale. Les régions montagneuses de l'ouest abritent également le grizzli et le mouflon de Dall, et leurs contreforts sont fréquentés par le caribou de la toundra. Au nombre des autres espèces, mentionnons le cerf-mulet et le cerf de Virginie dans la partie continentale méridionale, le wapiti sur les plateaux du nord, et le morse et le phoque le long du littoral du nord (ESWG, 1996). Le lagopède des saules, le lagopède à queue blanche, le lagopède des rochers, le tétras du Canada, le tétras sombre, la nyctale boréale, le grand-duc d'Amérique, le huart arctique, le huart à collier, le huart à gorge rousse, la buse à queue rousse, le geai de Steller, le pygargue à tête blanche, le faucon pèlerin et le balbuzard sont parmi les espèces d'oiseaux qu'on y trouve. De plus, des réserves naturelles, comme le parc national Wood Buffalo et la plaine Old Crow, au Yukon, ainsi que les nombreux milieux humides sont une source importante d'habitats de nidification et de repos pour les oiseaux chanteurs, les oiseaux de rivage et les oiseaux aquatiques migrateurs (*idem*). La paruline de Kirtland est une espèce d'oiseaux très étudiée de la forêt boréale, qui se reproduit dans les peuplements de pins gris. En 1989, un déclin rapide de sa population a entraîné l'adoption de plans de gestion-conservation au Canada et aux États-Unis (Botkin *et al.*, 1991). La survie des hardes de caribous est étroitement liée à la disponibilité du brout saisonnier. Une couche de neige épaisse couverte d'une croûte de glace restreignant l'accessibilité au brout en hiver et de faibles précipitations limitant son abondance en été influent sur la taille et la productivité des hardes (Maarouf *et al.*, 1994).

*Le feu est un processus écologique clé en forêt boréale.*

L'établissement d'essences boréales dépend souvent de l'exposition après incendie des lits de germination du sol minéral (Payette *et al.*, 1989). La libération des éléments nutritifs du sol et la composition de la végétation sont principalement régies par le feu (van Cleve *et al.*, 1983; Bonan et Shugart, 1989). Le cycle des feux augmente suivant un gradient nord et varie de 100 ans sous des latitudes centrales à environ 9 320 ans près de la limite forestière (Gagnon et Payette, 1985; Payette *et al.*, 1989). Après incendie, la composition des espèces comporte une proportion plus importante de bouleau à papier et de peuplier baumier. Des données historiques montrent que ces essences ont pu disséminer leurs graines sur de longues distances après des incendies et ont ainsi progressivement élargi leur aire d'extension jusque dans la toundra (Landhäusser et Wein, 1993). Payette *et al.* (1989) ont découvert que le rétablissement après incendie des espèces dépendait de la structure et de la composition de la forêt avant le feu. La biomasse de plantes vasculaires présente à la limite forestière a pris 22 ans pour revenir à son niveau avant incendie (Landhäusser et Wein, 1993).

*Les interactions des espèces sauvages modifient également la structure de la forêt.*

Le broutage d'espèces comme l'orignal influe également sur la composition et la qualité des essences. Il influence la productivité des sites, car il fait augmenter la quantité de lumière qui atteint le sol et fait souvent disparaître la composante feuillue dont se nourrissent de préférence les espèces sauvages (Wedeles et van Damme, 1995).

*La limite forestière septentrionale : interactions du climat et de la végétation.*

On a découvert que les populations d'arbres présentes à la limite forestière étaient des reliques de populations datant d'époques à climat plus chaud (Elliott, 1979). L'exposition au vent est un facteur d'agression de la végétation croissant à la limite forestière, dans le nord du Québec (Payette et Gagnon, 1985) où les branches se développent mieux sous la neige qui les protège contre les vents d'hiver (Payette *et al.*, 1989). Des études effectuées en Finlande ont permis de constater que la limite forestière septentrionale entre la forêt boréale et la toundra coïncide avec l'isotherme 10 °C moyenne du mois le plus chaud (Mikola, 1962). D'après les résultats d'une étude du bouleau à feuilles cordées effectuée à la limite forestière, la mortalité des bourgeons est directement liée à la température et le recrutement se fait grâce à des sujets abrités qui servent de semenciers (Maillette, 1987). Des études menées dans le nord de la forêt boréale canadienne ont montré que le feu joue un rôle important dans la répartition des essences forestières à proximité de la limite forestière, car la germination des graines dépend de l'exposition du sol minéral après incendie (Payette et Gagnon, 1985).

### *Description socio-économique*

La région forestière boréale compte quelque 3 600 000 habitants, soit environ 15 % de la population du Canada. Les principales activités économiques sont l'exploitation minière et forestière; la pêche sportive, la chasse, le tourisme et l'écotourisme sont des activités locales qui contribuent également à l'économie. Des centrales hydroélectriques assurent la subsistance de certaines

collectivités nordiques, et des activités d'exploration pétrolière et gazière contribuent à l'économie de certaines collectivités des Prairies. Bien que la plupart des collectivités vivent de l'une des industries ci-dessus, les activités de subsistance (pêche, chasse et piégeage) sont toujours courantes dans les écozones du Nord. Les activités de l'industrie forestière sont surtout axées sur la récole de la matière ligneuse à des fins de production de pâtes et papiers (ESWG, 1996).

La coupe à blanc est la principale méthode d'exploitation utilisée dans l'écosystème boréal. Les opérations ont évolué avec le temps, l'abattage manuel à la tronçonneuse et le débardage à câble ayant fait place à une exploitation mécanisée faisant appel à des abatteuses-groupeuses et à des débardeurs à pinces. Dans certains endroits, on utilise des abatteuses-porteuses qui transportent le bois vers des jetées et réduisent les impacts dans les parterres de coupe. Récemment, le bois à pâte a commencé à être transporté à l'usine non plus sous forme de billes courtes et de billes longues, mais plutôt sous forme de copeaux déchiquetés en forêt ou dans des jetées centrales situées dans la zone exploitée. Dans certains secteurs, la coupe à blanc sur de grandes superficies a été remplacée par des méthodes de coupe modifiées, y compris des techniques de coupe avec protection de la régénération et conservation de chicots et de bois gisant (grosses billes longues et courtes gisant sur le sol) ainsi que d'arbres sur pied éparpillés qui serviront de porte-graines (Sauder, 1994; Weetman, 1994). Des coupes progressives et des coupes de jardinage sont pratiquées dans des sites de plus grande valeur (Weetman, 1994) ou dans les forêts à structure mixte plutôt que monospécifique. Ayant constaté une augmentation de la proportion de peuplier faux-tremble dans les aires récoltées précédemment, les compagnies ont élargi l'éventail des essences qu'elles récolteront et ont modifié leur gamme de produits pour y inclure des panneaux à base de fibres de peuplier faux-tremble (Sauder, 1994). Les pratiques d'aménagement forestier suivent dans une certaine mesure des principes directeurs écologiques qui tiennent compte de l'impact de l'exploitation sur les autres utilisateurs de la forêt. Ainsi, on a tenté de modifier les opérations forestières dans certains endroits afin d'empêcher le caribou des bois de déserter des secteurs où des activités d'exploitation s'étaient déroulées (Cumming et Beange, 1993).

Au nombre des utilisations autres que l'exploitation forestière de cette région figurent la chasse et la pêche sportive pratiquées dans des stations éloignées uniquement accessibles par hydravion. La pêche et la chasse sont aussi pratiquées à des fins de subsistance et comme loisirs. En 1993, la chasse à l'orignal, à l'ours et au cerf a rapporté au total plus de 300 000 000 $CAN à l'économie de l'Ontario et a créé des emplois représentant 2 289 années-personnes (Legg, 1995). La chasse et les autres activités liées à la faune sont importantes pour les collectivités avoisinantes qui, en raison de leur éloignement, ont peu d'avenues de développement économique (Filion *et al.*, 1988). Des activités de chasse et de piégeage du petit gibier à des fins commerciales et de subsistance se déroulent également. Au nombre des utilisations sans prélèvement, on peut mentionner le canotage, le camping et la randonnée pédestre. Le tourisme est entravé par la faiblesse de l'infrastructure et des services attribuable à l'immensité de la région et à l'éloignement, facteurs qui réduisent l'attrait commercial potentiel et le flux de visiteurs (Lungren, 1995).

### *Impacts du changement climatique sur le milieu*

Température, ressources en eau et éléments nutritifs du sol

*La disponibilité des éléments nutritifs du sol devrait être plus grande à la suite d'une accélération de la décomposition dans le sol.*

Lors de l'analyse de la région boréale à l'aide d'un modèle des trouées, les réactions au changement climatique étaient provoquées par des changements du régime hydrique (Bonan *et al.*, 1990). L'interaction entre la végétation et la disponibilité des éléments nutritifs a entraîné une augmentation de la productivité dans les endroits où l'eau était disponible dans le sol et une diminution là où l'eau du sol était limitée (Pastor et Post, 1988). Une expérience de réchauffement effectuée dans l'Arctique a entraîné un accroissement de la disponibilité de l'azote à mesure que le taux de décomposition du sol augmentait, améliorant les teneurs en azote et phosphore disponibles dans le sol et dans la solution de sol (van Cleve *et al.*, 1990). Une température plus élevée a accentué la minéralisation de l'azote du sol et la sensibilité de la végétation à la disponibilité des éléments nutritifs du sol et a entraîné une augmentation de l'abondance des espèces feuillues et une diminution de la biodiversité (Chapin *et al.*, 1995). Une telle modification de la composition des espèces améliorera la disponibilité de l'azote puisque la litière sous le couvert des feuillus aura une teneur plus élevée en azote (Pastor et Post, 1990). D'après les résultats d'études contemporaines, la forêt boréale canadienne a été un puits de carbone jusqu'en 1969, mais il est de plus en plus manifeste que l'activité accrue du feu et des insectes qui a débuté pendant les années 70 en a modifié la structure au point où elle est maintenant devenue une source modérée de carbone. Aucun signe de fertilisation par le $CO_2$ n'a été relevé (Apps *et al.*, 1993).

Végétation

*La disponibilité de l'eau dans le sol régira la migration des espèces et les modifications de la composition.*

On pense que les changements qui surviendront à la limite septentrionale de la forêt dépendront de la température et du pergélisol, tandis qu'ils seront limités par l'eau du sol dans le sud (Kauppi et Posch, 1988). Dans des sols biens drainés, des simulations du changement climatique ont entraîné une diminution de la teneur en eau du sol et une augmentation de la proportion de peuplier faux-tremble et d'espèces de steppe. Dans les sites mal drainés, la gravité accrue des incendies a accéléré la transition vers des forêts mixtes (Emanuel *et al.*, 1985; Bonan *et al.*, 1990).

*Selon les prévisions, la superficie de la forêt boréale devrait diminuer et sa productivité pourrait augmenter.*

Singh (1988) a souligné que le changement climatique pourrait entraîner une réduction de la superficie de la forêt boréale du Québec atteignant jusqu'à 20 %. L'extrémité nord devrait être la plus sensible et connaître la plus forte croissance (Kauppi et Posch, 1985). Selon les observations de Wheaton et Singh (1988), la productivité devrait connaître une baisse atteignant jusqu'à 12 % à l'extrémité sud, mais une hausse atteignant jusqu'à 50 % dans sa partie centrale. Une hausse de

1 °C devrait amplifier l'accroissement radial des espèces boréales de 12 à 15 % et l'activité photosynthétique, de 12,5 % dans la partie médiane de la région boréale (Kokorin et Nazarov, 1995). Lors de simulations, Hartley et Marshall (sous presse) ont découvert que des perturbations plus fréquentes causées par le feu entraînaient une hausse de la productivité des forêts en raison de l'établissement d'un plus grand nombre de jeunes peuplements. Plöchl et Cramer (1995) ont utilisé un modèle écosystémique pour déterminer l'emplacement de l'aire d'extension de la toundra et de la taïga sous l'effet d'un doublement du $CO_2$ et ont laissé entendre que la superficie de ces deux biomes diminuerait en raison de leur migration vers le nord. Solomon et West (1987) ont simulé la dynamique des arbres dans le nord-ouest de l'Ontario et découvert que la dominance de l'épinette diminuait lentement à mesure qu'augmentait la proportion d'érable à sucre et de pin blanc dans le couvert sous l'effet d'un doublement du $CO_2$. On a observé une diminution de la PPN à la suite de l'apparition de conditions d'éclairement moins favorables. Bien qu'on n'ait trouvé aucune preuve concluante que le réchauffement actuel influait sur la productivité des espèces du nord de la forêt boréale (Payette *et al.*, 1989), on prévoit que la hausse des températures se traduira par une plus grande production d'arbustes et par une réduction de la proportion de plantes non vasculaires (Chapin *et al.*, 1995). Toutefois, une étude de l'activité photosynthétique effectuée à l'aide de données satellitaires compilées pendant 10 ans laisse supposer que des changements des régimes de croissance se produisent déjà, y compris un allongement de 12 jours de la saison de croissance au nord de 45 °N (Myneni *et al.*, 1997). Cette étude a également mis en évidence une tendance à la hausse de l'activité photosynthétique au nord de 45 °N accompagnée d'augmentations importantes dans les régions boisées du nord-ouest du Canada, mais de peu de changements dans les régions bordant la baie d'Hudson. D'après les archives palynologiques, les espèces devraient migrer vers le nord à mesure que les températures monteront et elles pourraient s'adapter et stocker plus efficacement le carbone (Oechel et Vourlitis, 1994). Dans les régions septentrionales, la diversité des espèces a diminué en raison de la disparition d'espèces moins abondantes et de l'établissement d'espèces caractéristiques d'autres biomes (Chapin *et al.*, 1995).

Insectes et maladies des arbres

*L'évolution du climat aura également des impacts sur la dynamique des populations des ravageurs forestiers.*

La température déclenche le cycle biologique des insectes, y compris leur émergence au printemps et leur croissance et leur développement. Dans une étude de la documentation effectuée par Gilbert et Raworth (1996), plus de 300 espèces ont montré une augmentation linéaire de leur taux de développement avec une hausse de la température. Toutefois, ces taux ont diminué lorsque les températures quotidiennes moyennes sont devenues supérieures à la normale. La disponibilité de l'habitat a une plus grande influence sur les populations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, le principal ravageur en forêt boréale, que les fluctuations du climat (Martinat, 1987). Une croissance plus rapide des arbres raccourcit la période pendant laquelle ce ravageur peut dévorer les jeunes aiguilles et peut provoquer des modifications de la dynamique des populations (Fleming et Volney, 1995). Dans une étude comparative des populations de l'Alaska et du Michigan du papillon tigré du Canada, Ayres et Scriber (1994) ont découvert que la qualité de l'hôte devenait de plus en plus importante à mesure que montaient les températures. Des

températures plus élevées accéléraient le rythme de développement des larves, mais la qualité de l'hôte et l'origine des populations modifiaient cet effet.

*Les ravageurs ont une très grande adaptabilité et seront en mesure de se soustraire aux impacts du changement climatique ou d'en tirer parti.*

Les insectes et les agents pathogènes ont généralement des populations importantes, une grande mobilité et des taux de fécondité imposants, tous des facteurs qui aident l'organisme à s'adapter au changement climatique (Fleming et Volney, 1995).

Feu

*La gravité de la saison des feux devrait augmenter.*

Dans le cadre d'une étude de l'indice de gravité saisonnière des feux (IGSF), Flannigan et Van Wagner (1991) ont découvert que l'IGSF, dans un scénario de 2 X $CO_2$, augmentait de 46 % et que ce phénomène était le plus marqué dans des régions où l'indice est actuellement faible. Il s'est avéré que la température était un facteur plus pertinent que l'humidité relative et que la séquence quotidienne des précipitations était plus significative que leur hauteur. Ainsi, la fréquence des incendies était étroitement corrélée à de longues successions de jours secs — moins de 1,5 mm de pluie par jour ou moins de 60 % d'humidité relative (Flannigan et Harrington, 1988). Starfield et Chapin (1996) ont toutefois constaté que des modifications de la végétation influaient davantage sur la fréquence des incendies que des changements des variables climatiques. Dans le cadre d'un examen de l'indice Forêt-Météo (IFM) dans un scénario de doublement du $CO_2$, Bergeron et Flannigan (1995) ont découvert que l'IFM diminuait dans l'est de la forêt boréale, mais augmentait dans l'ouest. Kadonaga (1997) a effectué une étude semblable dans le bassin du Mackenzie et est arrivé à la conclusion que le danger de feu augmentait, principalement pendant les mois de mai et de juin. Dans l'ensemble, les changements escomptés se traduiront par une saison des feux plus longue et par une teneur en humidité des combustibles plus faible qu'à l'heure actuelle et par une augmentation disproportionnée des feux échappés (Stocks, 1993). En forêt boréale, l'intensification des feux entraînera des rejets plus élevés de carbone dans l'atmosphère. Kasischeke *et al.* (1995) ont découvert qu'un accroissement de 50 % de la superficie détruite par le feu libérerait 27,1 à 51,9 Pg de carbone de plus dans l'atmosphère.

*L'interaction entre le feu et les ravageurs compliquera l'établissement de prévisions sur les impacts du changement climatique.*

La tordeuse du pin gris dépend de la disponibilité des fleurs du pin gris qui apparaissent vers la vingtième année. Des conditions propices à une infestation apparaissent après un incendie, élément déclencheur de la régénération de cette essence et de la création de peuplements étendus qui deviennent ensuite sensibles à l'action de ce ravageur. Par ailleurs, une proportion plus importante de la forêt demeure dans des classes d'âge plus vulnérables à la tordeuse du pin gris lorsqu'une protection intensive contre les incendies y est exercée (Volney, 1988).

Faune

*Le remplacement des essences dominantes du couvert réduit l'habitat des espèces fauniques qui lui sont associées.*

Une simulation de la réaction prévue de plusieurs espèces de la forêt feuillue et de la forêt boréale du centre du Michigan à un doublement du $CO_2$ a révélé un déclin très rapide de la surface terrière du pin gris. Selon les résultats obtenus, le pin gris perdrait 25 % de sa surface terrière moins de 90 jours après le début du changement climatique et serait remplacé par le peuplier faux-tremble et le chêne. Cette situation aurait pour effet de réduire, voire d'éliminer l'habitat de reproduction de la paruline de Kirtland au Michigan (Botkin *et al.*, 1991).

*Il faut s'attendre à une diminution du nombre et de la qualité des milieux humides dans la zone de transition entre la prairie et la forêt.*

Les nombreux milieux humides de cette zone constituent une ressource importante pour les populations d'oiseaux aquatiques du continent, notamment plus au sud des Grandes Plaines, pendant les années de sécheresse (Larson, 1995). Dans le cadre d'études hydrologiques détaillées des impacts du changement climatique sur les petits milieux humides des Prairies, Poiani et Johnson (1993) ont montré que des températures annuelles plus élevées semblables à celles prévues par divers modèles climatiques entraînaient des conditions plus sèches, que les précipitations moyennes soient moins ou plus élevées. Ces conditions se sont traduites par des eaux de surface moins étendues et par une couverture végétale plus dense. L'étude laissait entendre que les petits milieux humides qui ont une importance disproportionnée pour la sauvagine (Diamond et Brace, 1991; Poiani et Johnson, 1991) sont particulièrement vulnérables au réchauffement planétaire. Larson (1995) a fait des constatations similaires dans le cadre d'une étude des impacts potentiels du réchauffement climatique sur le nombre de milieux humides des prairies du nord. Les hausses de température provoquant une réduction des milieux humides n'étaient que partiellement compensées sous divers scénarios d'augmentation des précipitations. Larson (1995) est arrivé à la conclusion que les milieux humides de la zone de transition pourraient être encore plus sensibles au réchauffement que les cuvettes des Prairies, peut-être en raison de la forte évapotranspiration des saules et des autres espèces d'arbres poussant en bordure des milieux humides. Dans l'ensemble, il faut s'attendre à ce que les pertes de milieux humides dans l'écotone prairie-forêt boréale entraînent une diminution spectaculaire de la qualité et de la quantité d'habitats des oiseaux nicheurs et migrateurs (Poiani et Johnson, 1993; Larson, 1995) et à ce qu'elles soient un facteur déterminant dans le déclin récent des populations d'oiseaux aquatiques observé et attribué à l'empiétement de l'agriculture et à la perte de milieux humides causée par des sécheresses (Bethke et Nudds, 1995).

Une étude interdisciplinaire du climat passé et futur du bassin du Mackenzie illustre bien les prévisions de changement climatique qui sont caractéristiques de la région boréale (Cohen, 1997). Selon les prévisions établies à l'aide de modèles hydrologiques, les niveaux d'eau baisseraient à un point tel qu'ils ne pourraient être compensés par les augmentations prévues des précipitations. Ils devraient être encore plus bas que les niveaux extrêmement bas de 1995, notamment dans les régions importantes pour la sauvagine du sud de la zone de la prairie-parc. La baisse de

productivité des forêts de la région est probablement la conséquence la plus grave prévue par cette étude. Elle était attribuable à une combinaison de facteurs, y compris un doublement des superficies détruites par le feu d'ici 2050, un dépérissement massif des conifères causé par la sécheresse et une plus grande vulnérabilité aux insectes ravageurs. Plusieurs études des impacts du réchauffement mondial en forêt boréale ont aussi prévu des saisons des feux plus longues et des incendies probablement plus fréquents et plus étendus en raison de conditions météorologiques plus propices, de modifications des méthodes de lutte contre les incendies et d'un déclin ou d'un dépérissement éventuel des forêts (King et Neilson, 1992; Flannigan et Van Wagner, 1991; Wotton et Flannigan, 1993; Price et Rind, 1994; voir la section 3.3.4). Il faut s'attendre à ce que l'intensification des feux de forêt conjuguée à des activités d'exploitation forestière à grande échelle remodèle progressivement le paysage en des forêts plus jeunes et en voie de repeuplement et ait des incidences négatives sur les espèces sauvages tributaires des forêts mûres et des vieilles forêts, comme la martre, le pékan et le caribou (Wedeles et Van Damme, 1995).

## RÉGION FORESTIÈRE DE L'OUEST ET DU PACIFIQUE

### *Écologie*

*En raison de la grande hétérogénéité des paysages, il est difficile d'établir des prévisions générales sur le changement climatique.*

Cette région de colluvions et de montagnes où affleure la roche comprend une vallée intramontagnarde couverte de moraines glaciaires et d'une certaine quantité de dépôts fluviatiles. Sur la côte, les montagnes sont découpées par des fjords et des vallées glaciaires reposant sur des roches ignées et sur une assise rocheuse sédimentaire. Les brunisols et les podzols dominent la région et des tchernozioms couverts de prairies occupent les vallées basses. Des sols et une végétation uniques se retrouvent dans les îles de la Reine-Charlotte et dans certaines parties de l'île de Vancouver qui, en l'absence de glaciation antérieure, présentent des conditions d'habitat qui leur sont propres (ESWG, 1996). Les milieux montagnards se caractérisent par des cycles diurnes et saisonniers marqués et très variables (Price et Haslett, 1993), rendant difficile de mesurer les profils verticaux de température, éléments essentiels à la construction de modèles de circulation (*idem*). Les températures annuelles moyennes varient entre 0,5 et 7,5 °C dans la chaîne de montagnes intérieure et entre 4,5 et 9 °C dans la région côtière (ESWG, 1996). Les précipitations annuelles moyennes sont supérieures à 1 500 mm sur la côte et dans certains endroits de la Cordillère, mais n'atteignent même pas 300 mm dans la vallée aride, dans la région sous le vent et abritée de la pluie des Rocheuses (*idem*). C'est la raison pour laquelle des modèles spéciaux, comme le PRISM (Daly *et al.*, 1994), ont été élaborés. Ils font appel à des modèles altimétriques numériques pour répartir les données ponctuelles sur l'élévation et les précipitations dans les cellules du quadrillage et estimer les précipitations à différents endroits le long du versant.

*La région forestière de l'Ouest et du Pacifique comprend les régions forestières suivantes de Rowe : subalpine, montagnarde, côtière et du Columbia.*

La région forestière subalpine se compose des hautes terres montagneuses de la Colombie-Britannique et de l'Alberta et constitue une zone de transition entre la région forestière boréale et la région forestière montagnarde. Les essences typiques sont l'épinette d'Engelmann, le sapin subalpin et le pin tordu. On y trouve aussi des essences boréales, soit l'épinette noire, l'épinette blanche, le peuplier faux-tremble et des essences de la région montagnarde comme le douglas. La région forestière montagnarde occupe le plateau intérieur sec de la Colombie-Britannique et d'autres vallées des montagnes de cette dernière province et de l'Alberta. Les essences caractéristiques sont le douglas bleu, le pin tordu latifolié et le peuplier faux-tremble. De grandes prairies occupent des vallées fluviales (Rowe, 1972). La région forestière côtière fait partie de la forêt de la côte du Pacifique de l'Amérique du Nord et couvre la moitié méridionale de la côte de la Colombie-Britannique et ses îles. Les essences typiques sont le thuya géant, la pruche de l'Ouest, l'épinette de Sitka et le douglas vert qui y atteignent des dimensions imposantes et un âge avancé (Waring et Franklin, 1979). Les feuillus constituent une proportion mineure du couvert (Rowe, 1972). La région forestière du Columbia couvre la " zone humide " de l'intérieur produite par les Rocheuses. Elle est semblable à la région forestière côtière, mais les essences n'y sont pas aussi variées. Elle se caractérise par le thuya géant et la pruche de l'Ouest, auxquels sont associés le douglas vert, l'épinette d'Engelmann et le mélèze de l'Ouest.

*La phytomasse aérienne de cette région forestière constitue de vastes réservoirs de carbone.*

Les vieilles forêts qui y subsistent constituent un important réservoir de carbone et la répartition de leurs classes d'âge est attribuable aux feux de forte intensité dont elles ont été le siège (Johnson et Larson, 1991). Le facteur le plus important influençant la composition de ces forêts serait le régime hydrique effectif au cours de l'été relativement sec des régions montagnardes (Franklin *et al.*, 1992) qui se caractérise par les cycles diurnes et saisonniers marqués et très variables (Price et Haslett, 1993). Les communautés forestières sont une mosaïque d'associations d'espèces tributaires de la disponibilité de l'eau dans le sol (Kimmins et Lavender, 1992). La conversion de vieux peuplements de douglas en plantations provoque une augmentation à court terme de la séquestration du dioxyde de carbone qui s'inverse à plus long terme (Oliver *et al.*, 1990).

*Le régime d'humidité influe fortement sur le cycle des feux.*

Un examen de l'historique des feux dans le parc national Chutney a révélé que ni la mise en place d'un programme de lutte contre les incendies ni le parachèvement d'une grande route n'ont modifié le cycle de feux de 60 ans (1928-1988). Ce dernier, qui avait été de 130 ans entre 1788 et 1928, est toutefois dû à un climat plus humide (Masters, 1990).

*En raison de la grande hétérogénéité des paysages, les habitats disponibles sont très variés et la diversité des espèces sauvages très grande.*

Les mammifères caractéristiques sont le caribou des bois, l'orignal, la chèvre de montagne, le mouflon du Nord-Ouest, l'ours noir, le grizzli, la marmotte des Rocheuses, le cerf à queue noire, le cerf-mulet, le cerf de Virginie, le loup et la loutre. La côte reçoit des apports d'eau douce importants provenant des bassins versants de montagne et contribuant à la richesse et à la

diversité des espèces marines. Ces dernières comprennent le lion de mer, l'otarie à fourrure de l'Alaska, le phoque commun, l'épaulard, le cachalot macrocéphale, la baleine grise de Californie, le globicéphale du Pacifique, le rorqual bleu, ainsi que plusieurs espèces de saumons. Les espèces d'oiseaux typiques de cette région sont le tétras sombre, le geai de Steller et la pie bavarde accompagnés de l'huîtrier de Bachman, du colin de Californie, du colin des montagnes, du macareux huppé et de la mésange à dos marron (ESWG, 1996).

*La perte d'habitats provoquée par l'activité humaine menace les espèces.*

La province de la Colombie-Britannique a compilé des listes des espèces et des sous-espèces sauvages terrestres en fonction des dangers d'extinction qui les guettent. La Liste verte énumère les espèces dont la gestion se limite à assurer la disponibilité d'habitats. La Liste jaune donne les espèces qui font l'objet d'une gestion des populations et qui ne sont pas considérées comme en péril. La Liste bleue recense les espèces jugées menacées ou vulnérables et la Liste rouge, les espèces en danger de disparition. Dix-neuf pour cent de toutes les espèces de la province figuraient dans l'édition de 1993 de ces listes. La Liste rouge regroupait quatre espèces d'amphibiens, quatre espèces de reptiles, 31 espèces d'oiseaux et 25 espèces de mammifères. Parmi celles-ci figurent la grenouille léopard, le phrynosome de Douglas, le pélican blanc d'Amérique, le faucon pèlerin, la gélinotte des armoises, la chouette tachetée, le bruant à queue aiguë, la chauve-souris rousse, le lièvre d'Amérique, le castor de montagne, le campagnol de Townsend, la loutre de mer, le bison des bois et le mouflon de Dall. Deux espèces d'amphibiens, cinq de reptiles, 53 d'oiseaux et 27 de mammifères figurent sur la Liste bleue des espèces vulnérables. Ce sont entre autres la grenouille-à-queue, la couleuvre agile à ventre jaune, le grand héron, le cygne trompette, le campagnol à dos roux de Gapper, le grizzli, le caribou des bois et le mouflon d'Amérique (Harper *et al.*, 1994).

***Description socio-économique***

Quelque 3,25 millions de personnes, soit environ 13 % de la population canadienne, habitent dans la région forestière de l'Ouest et du Pacifique. L'exploitation forestière et minière, la production de pétrole et de gaz, le tourisme et la pêche y sont des activités économiques importantes. Les basses terres de la côte comptent parmi les terres agricoles les plus riches du pays. Des parcs provinciaux et nationaux ont été créés dans l'est des Rocheuses et dans la chaîne Columbia à des fins de protection de l'habitat et de conservation ainsi que comme sources d'activités touristiques et récréatives. L'exploitation forestière commerciale est la principale activité économique (ESWG, 1996).

Très diversifiée sur le plan écologique et très productive, cette région du Canada représente quelque 9 % de l'assise territoriale totale du pays, mais produit presque 50 % du volume de bois résineux. Environ le tiers du carbone rejeté lors de l'exploitation de ces vieilles forêts provient de l'utilisation de combustibles fossiles par les engins de récolte (Smith *et al.*, 1992). La coupe partielle ou la coupe à blanc sont les modes d'exploitation utilisés. La coupe partielle vise à conserver les attributs de la structure de la forêt. Près de 90 % des aires récoltées sont exploitées par coupes à blanc. Le bois coupé est transporté jusqu'à des dépôts transitoires situés en bordure des routes par débusquage ou, lorsque la déclivité empêche l'utilisation de véhicules, par

téléphérique. Les activités de préparation de terrain comprennent le scarifiage et le brûlage qui ont pour but d'exposer le sol minéral. Les efforts de reboisement consistent à favoriser la régénération naturelle et à planter des semis. La sélection des espèces utilisées pour reboiser différents sites se fonde maintenant sur l'adaptabilité au milieu (Harding, 1994).

La pêche sportive et commerciale, la chasse et le piégeage sont les utilisations autres que l'exploitation forestière dans cette région. En raison de l'hétérogénéité de sa topographie et de la diversité des espèces sauvages qu'elle abrite, cette région jouit d'un secteur écotouristique international diversifié reposant sur des activités sans prélèvement, comme le ski alpin, la randonnée pédestre, le camping, l'observation d'oiseaux, le canotage, la descente en eau vive et le kayak.

***Impacts du changement climatique sur le milieu***

Température, ressources en eau et éléments nutritifs du sol

Le taux d'évapotranspiration sera tôt ou tard régi par la disponibilité de l'eau dans le sol, car l'augmentation de l'évapotranspiration attribuable à la hausse des températures accroîtra les probabilités de sécheresse (Franklin *et al.*, 1992). Des températures du sol plus élevées accéléreront la décomposition, augmenteront probablement la quantité d'éléments nutritifs disponibles et réduiront la séquestration du carbone dans le sol (*idem*).

Les fluctuations de la quantité d'eau disponible influent énormément sur l'établissement des semis. Au printemps, les conditions propices à la plantation ne surviennent que cinq années sur dix aux faibles élévations. Des études ont indiqué que l'automne serait une saison plus souvent fiable pour ce qui est des conditions propices à la régénération. De plus, des variations de la quantité d'eau disponible ont eu des répercussions sur l'accroissement annuel de la surface terrière et portent à croire que des étés plus chauds et plus secs réduiraient la productivité des forêts (Spittlehouse, 1992).

Végétation

*L'augmentation des concentrations de $CO_2$ a eu des effets positifs sur la croissance des forêts de haute montagne.*

Dans le cadre d'une étude sur la forêt subalpine, LaMarche *et al.* (1984) ont constaté que la croissance des forêts avait tendance à être plus étroitement associée aux tendances des concentrations atmosphériques de $CO_2$ qu'à celles de la température. Ces constatations ont amené les auteurs à croire que les forêts subalpines souffrent d'une carence en $CO_2$. Price et Haslett (1993) ainsi que Dale et Franklin (1989) ont trouvé que des concentrations plus élevées de $CO_2$ contribuaient à l'accroissement radial spécifique. On a constaté que les plantes de haute montagne utilisaient plus efficacement le $CO_2$ que celles de basse montagne; il faut donc s'attendre à des réactions plus marquées à une hausse du $CO_2$ (Körner, 1992).

*Les espèces migreront plus en altitude.*

Certaines espèces migreront peut-être vers de plus hautes altitudes, mais la grande variabilité du relief pourrait donner une composition similaire des espèces à l'échelle du paysage (Kimmins et Lavender, 1992). Dale et Franklin (1989) ont prévu une invasion plus énergique par la pruche de l'Ouest et une diminution de la densité des tiges sous l'effet d'un doublement du $CO_2$. On pense aussi que les espèces résineuses pourraient être remplacées par des arbustes feuillus (Körner, 1992). Dans la région côtière, la superficie actuelle des forêts productives pourrait diminuer à la suite de l'incursion d'armoises et d'espèces de la steppe arbustive. La proximité relative de conditions climatiques appropriées aux sources de graines facilitera ces migrations ascendantes des espèces (Franklin *et al.*, 1992).

En ajoutant au modèle ZELIG des caractères phénologiques propres aux espèces, Burton et Cumming (1995) ont découvert que la productivité des forêts de l'Ouest et du Pacifique augmentera sous l'effet du changement climatique prévu. Les seules exceptions seront les forêts côtières des basses terres, qui devraient subir un stress causé par l'absence du refroidissement hivernal nécessaire à l'induction d'une tolérance au gel, et les forêts subalpines de l'intérieur dont la productivité restera stable, mais qui seront graduellement supplantées par des espèces végétales de plus basse montagne.

Insectes et maladies des arbres

Un climat plus chaud rendra les arbres montagnards plus vulnérables aux insectes et aux maladies. Une diminution de l'enneigement et l'altitude pourraient causer des dégâts aux racines pendant l'hiver (Kimmins et Lavender, 1992). De plus, des conditions climatiques plus chaudes pourraient créer des habitats/des conditions plus favorables à l'hibernation des agents pathogènes et accroître le stress thermique, rendant le milieu plus propice à des pullulations d'insectes et d'agents pathogènes (Franklin *et al.*, 1992).

Feu et vent

Ce sont les régimes de perturbation qui devraient connaître les changements les plus rapides (Franklin *et al.*, 1992). Les feux devraient être plus intenses et plus fréquents, avec des cycles plus rapprochés plus au nord, dans des régions où la biomasse est actuellement élevée. Johnson et Larson (1991) ont constaté que le cycle des feux dans les Rocheuses canadiennes, qui était de 50 ans avant 1730, était passé à 90 ans sous l'effet des conditions climatiques plus humides et plus fraîches qui ont prévalu après 1730. Cette constatation vient corroborer les prévisions d'une augmentation de la fréquence et de la gravité des feux dans la région sous l'effet d'un climat plus chaud et plus sec (Kimmins et Lavender, 1992). Dans la région côtière, le contraste plus marqué entre les températures de l'air sur terre et en mer pourrait être à l'origine de tempêtes plus intenses et de dégâts plus importants causés par le vent (Franklin *et al.*, 1992).

Faune

Plusieurs études effectuées dans des régions montagneuses de l'ouest des États-Unis ont permis de repérer des menaces pour la faune qui sont également applicables au Canada. Des modifications mineures de l'enneigement et de la période de fonte des neiges pourraient avoir des répercussions majeures sur les espèces de haute montagne et les espèces sauvages qui en dépendent (Inouye et McGuire, 1991; Galen et Stanton, 1993). De plus, dans les régions montagneuses où les gradients climatiques et écologiques sont souvent très prononcés, le changement climatique pourrait provoquer des bouleversements majeurs dans la répartition spatiale de l'habitat faunique. Ainsi, MacDonald et Brown (1992) ont étudié les impacts d'une hausse de 3 °C sur les mammifères vivant dans les montagnes du Grand Bassin du sud-ouest des États-Unis. Les chaînes de montagnes isolées du Grand Bassin offrent les conditions mésoïques fraîches nécessaires à une faune relique de mammifères boréaux provenant à l'origine des grandes chaînes de montagnes situées à l'est (les Rocheuses) et à l'ouest (la Sierra Nevada). Sous l'effet de réductions de la superficie des systèmes montagneux découlant d'un réchauffement climatique et dues à une migration ascendante des écosystèmes, les aires individuelles de répartition en montagne ont vu disparaître 35 à 96 % de leur habitat boréal et 9 à 62 % de leurs espèces boréales de mammifères. Il a été prévu que trois des quatorze espèces de mammifères disparaîtront de l'ensemble de la région du Grand Bassin. Dans le parc national de Yellowstone, la tendance actuelle au réchauffement et à un climat plus sec, si elle se maintient, devrait provoquer des incendies plus fréquents et plus importants, qui entraîneront le renouvellement des peuplements. Il s'ensuivra alors un remplacement des vieux peuplements par d'autres composés de classes d'âge plus jeunes et une diminution de l'habitat adapté aux espèces des vieilles forêts, comme la linnée boréale, le calypso bulbeux, la martre des pins et le vautour (Romme et Turner, 1990).

Dans la région des montagnes Rocheuses, l'habitat des salmonidés se limite aux cours d'eau où la température de l'air en juillet est inférieure à 22 °C. Des hausses de température de 1, 2, 3, 4 et 5 °C ont causé des pertes d'habitats de 16,2, 35,6, 49,8, 62 et 71 % respectivement. Le réchauffement plus important a repoussé les populations vers de plus hautes altitudes et les a éloignées du lit des principales rivières, jusque dans les cours d'eau d'amont (Keleher et Rahel, 1996).

Les grands carnivores dans les Rocheuses sont les loups, les couguars, les carcajous et les grizzlis. Ces deux dernières espèces sont les plus vulnérables à des changements du milieu, car elles ont besoin de pouvoir fouiller dans les débris et d'avoir accès à des ressources alimentaires de qualité au printemps et à l'automne respectivement. Le potentiel reproductif limité du grizzli et son mode de dispersion sont d'autres facteurs qui limitent l'adaptation de cette espèce à une nouvelle contrainte environnementale (Weaver *et al.*, 1996).

## RÉGION FORESTIÈRE FEUILLUE TEMPÉRÉE

### *Écologie*

*Cette région se caractérise par un relief peu accidenté, un climat soumis à l'influence modératrice de vastes étendues d'eau et des sols fertiles.*

La moitié orientale de cette région englobe certaines parties des hautes terres des Appalaches et les plaines côtières de Northumberland, avec de hautes terres composées de roches cristallines dures. La moitié occidentale est une mosaïque de plaines plates et de collines onduleuses reposant sur un substratum paléozoïque riche en carbonates. Les principaux types de sols sont des luvisols, formés par le substratum sédimentaire dans l'est et par des dépôts estuariens, morainiques et lacustres dans l'ouest, des gleysols et des brunisols (ainsi que des podzols dans le nord de l'aire d'extension de cette région). Le climat de la région forestière feuillue tempérée est modéré par l'océan Atlantique dans l'est et par les Grands Lacs dans l'ouest. La température annuelle moyenne varie entre 3,5 et 8 °C. La moitié orientale de cette région est située sur l'une des principales trajectoires de tempête de l'Amérique du Nord et les conditions météorologiques y sont plus variables. Les précipitations annuelles moyennes se situent entre 720 et 1 500 mm, l'est étant arrosé plus que l'ouest.

*La région forestière feuillue tempérée comprend la région forestière des feuillus et la région forestière des Grands Lacs et du Saint-Laurent de Rowe (1972).*

La région forestière des feuillus occupe une superficie relativement petite du sud de l'Ontario, non loin des lacs Huron, Ontario et Érié, et constitue le prolongement de la forêt caducifoliée du nord des États-Unis. Ses espèces caractéristiques sont l'érable à sucre, le hêtre, l'orme d'Amérique, le tilleul, le frêne rouge, le chêne blanc et le noyer cendré. Les forêts feuillues du sud comptent des spécimens de tulipier de Virginie, de magnolia acuminé, de nyssa sylvestre et de sassafras officinal qui sont aux limites septentrionales de leurs aires d'extension. Les conifères sont relativement peu nombreux et disséminés. La région forestière des Grands Lacs et du Saint-Laurent s'étend le long de la vallée du Saint-Laurent et du bassin des Grands Lacs. Elle se caractérise par un mélange relativement équilibré de feuillus et de conifères, y compris le pin rouge, le pin blanc, la pruche du Canada, le bouleau jaune, l'érable à sucre, l'érable rouge, le chêne rouge et l'orme d'Amérique. Située entre la région forestière boréale et la région forestière des feuillus, elle comprend des espèces représentatives de ces deux régions. La région forestière acadienne couvre la majeure partie des Maritimes. Ses essences caractéristiques sont l'épinette rouge, le sapin baumier, le bouleau jaune et l'érable à sucre (Rowe, 1972).

*Les limites régionales sont corrélées aux seuils de température.*

La limite nord de cette région est corrélée à l'isotherme minimale annuelle moyenne de -40 °C (Arris et Eagleson, 1989). Cette étroite corrélation avec la température est due aux conditions thermiques dont ont besoin les feuillus lors de la floraison, de la formation de graines, de la maturation (Cannell *et al.*, 1989) et du développement du tube pollinique (Pigot et Huntley, 1981). Des essais avec des semis ont montré que le déclenchement de la formation des bourgeons

était lié à une suite de jours courts accompagnée d'un écart de température donné (Heide, 1974). Il a également été découvert que le débourrement dépendait d'une période de refroidissement suivie de jours longs, une exigence qui prévenait les dégâts dus au gel (Heide, 1993). L'aire d'extension propre à une essence, comme le cerisier tardif, est souvent mieux décrite en fonction de l'évapotranspiration et des degrés-jours de croissance (Shao et Halpin, 1995).

L'aire d'extension historique établie à partir d'archives palynologiques d'essences comme le hêtre et la pruche laisse voir un mode de propagation dans lequel interviennent des agents de dispersion des graines, comme les geais et les pigeons (Webb, 1987). Ces archives révèlent un taux de migration de 20 à 25 km par siècle, taux considérablement inférieur à celui de 100 km qui aurait été nécessaire pour s'adapter à une élévation de 1 °C des températures moyennes (Davis, 1989). Le milieu local, les cycles de pullulation des insectes et des incendies, et la concurrence interspécifique sont d'autres facteurs limitant l'établissement de taxons de la forêt acadienne (Green, 1987).

Le cerf de Virginie, le raton laveur, l'orignal, le lynx roux, le putois d'Amérique, le campagnol, l'écureuil gris, l'écureuil noir, le lapin à queue blanche et la marmotte sont les espèces de mammifères caractéristiques. Parmi les espèces d'oiseaux figurent l'engoulevent bois-pourri, le cardinal à poitrine rose, l'aigrette bleue, la buse à épaulettes et le pic à tête rouge. Les espèces d'oiseaux rares dans la région sont le troglodyte de Caroline, le colin de Virginie et le héron vert. Les oiseaux marins sont le cormoran à aigrettes, le macareux moine, la marmette de Brünnick, la marmette de Troïl et le petit pingouin, qui forment tous des colonies de nidification dans l'est de la région. L'épaulard, la baleine à bec commune et diverses espèces de phoques sont au nombre des espèces marines fréquentant la côte de l'Atlantique et la voie maritime du Saint-Laurent (ESWG, 1996).

La portion ouest de la région, qui couvre le littoral nord des Grands Lacs, est la zone la plus urbanisée du Canada et la majeure partie des forêts présentes à l'origine ont été abattues pour faire place à des fermes, des vergers, des routes et des villes (*idem*). En raison des grands centres urbains et des villes satellites dans toute cette région écologique, il est essentiel que les décisions d'aménagement forestier tiennent compte de facteurs sociologiques et économiques. Ce type de gestion peut être appliqué dans des domaines comme les bassins versants municipaux, l'habitat faunique, les possibilités de loisirs de plein air, la production de matière ligneuse et le recyclage des déchets municipaux.

### *Description socio-économique*

Quelque 16,5 millions de personnes habitent la région forestière feuillue tempérée, soit environ 67 % de l'ensemble de la population canadienne. Dans l'est, l'exploitation forestière, l'agriculture, les mines et la pêche commerciale sont les principales activités économiques. Les loisirs, l'écotourisme et le tourisme y jouent également un rôle. Les industries de service et le secteur manufacturier sont les plus importants secteurs économiques de cette région, où vit près de la moitié de la population du Canada (ESWG, 1996).

Les activités d'exploitation forestière commerciale sont presque entièrement confinées à de petits boisés privés. Au nombre des produits forestiers figurent le bois de chauffage, les palettes, le bois de sciage, la pâte et les produits de carton ainsi que des produits non ligneux comme le sirop d'érable et les noix. L'exploitation forestière est mécanisée et fait appel à des tronçonneuses, à des abatteuses-groupeuses ou à des engins multifonctionnels; le bois est transporté jusqu'à un dépôt transitoire situé en bordure de la route, à l'aide de débardeurs à pinces ou à chenilles ou de tracteurs modifiés.

Les activités autres que l'exploitation forestière comprennent le piégeage ainsi que la chasse au petit gibier et autres animaux. Les zones naturelles de cette région fort urbanisée sont le siège de nombreuses activités récréatives pendant toute l'année. Près des centres urbains, les principales utilisations sont l'équitation, les excursions d'un jour, les pique-niques, les résidences secondaires, le vélo de montagne, la motoneige, le ski de fond et la randonnée pédestre. Le canotage, le camping et l'observation des oiseaux sont des activités pratiquées dans les forêts plus éloignées des centres urbains.

### *Impacts du changement climatique sur le milieu*

Température, ressources en eau et éléments nutritifs du sol

Dans le cadre de leur étude sur le dépérissement des essences feuillues au cours du dernier siècle (1910-1990), Auclair *et al.* (1996) ont constaté que le cycle de gel-dégel et le gel des racines associé à des conditions météorologiques extrêmes ont joué un rôle clé dans le dépérissement des forêts et que les dommages causés par le gel étaient fortement corrélés au dépérissement dû au stress engendré par la sécheresse et la chaleur. Les conditions météorologiques extrêmes à l'origine de tels dégâts étaient intimement liées à une élévation de la température moyenne de la planète.

Végétation

Après l'an 1400, le chêne, qui était l'essence dominante du sud de l'Ontario, a été supplanté par le hêtre *Quercus* et, ensuite, par le pin blanc, un changement reflétant l'apparition de conditions plus chaudes et plus sèches après le Petit âge glaciaire (Campbell et McAndrews, 1993). LeBlanc et Foster (1992) ont découvert qu'une hausse des températures qui ne serait accompagnée d'aucun changement des précipitations moyennes entraînerait un accroissement du taux de respiration pendant la saison de croissance, mais aucune modification de la photosynthèse. Il s'ensuivrait une réduction de l'accroissement radial et une intensification du stress climatique chez les chênes, phénomènes qui auraient pour résultat d'augmenter la mortalité dans les endroits secs des hautes terres, au centre de l'aire d'extension de cette essence.

Insectes et maladies des arbres

Selon une étude récente, une plus grande vulnérabilité à l'action d'insectes et de maladies serait liée à des saisons de croissance plus chaudes et à de plus faibles teneurs en eau disponible du sol (Jones *et al.*, 1993).

Faune

Les forêts qui subsistent encore dans la région forestière feuillue tempérée sont, dans nombre de cas, des îlots de biodiversité dans un paysage agressé de tous côtés par le développement. Dans les temps géologiques anciens, les espèces forestières étaient capables de modifier leurs aires d'extension à la suite d'un changement climatique sans avoir à contourner les obstacles que représentent aujourd'hui les routes, les chemins de fer, les terres agricoles, les grandes villes et leurs banlieues. La menace d'un changement climatique vient appuyer les demandes répétées pour que des investissements plus importants soient consentis afin de réduire le morcellement et la dégradation de l'habitat et d'accroître la connectivité fonctionnelle des peuplements encore existants (Markham, 1996; Malcolm et Markham, 1997).

Urbanisation

L'urbanisation, avec les routes, bâtiments, emprises et autres perturbations humaines qui l'accompagnent (Dorney et Leitner, 1985), morcelle le paysage forestier (Pearce, 1993). Les petits habitats isolés sont, en plus, agressés par les concentrations plus importantes de polluants présentes près des sources industrielles. Le combat que livrent les espèces pour l'habitat est perdu d'avance : l'étalement urbain et le développement industriel ne cessent de gruger ce qui reste de forêt (Riley et Mohr, 1994). Certaines espèces sauvages s'adaptent à la vie urbaine, tandis que d'autres ne peuvent faire face à la diminution de l'habitat disponible, à l'absence de couloirs de migration et au risque d'être traitées comme une espèce " nuisible ". Les espèces végétales sont incapables de migrer assez rapidement pour échapper à l'urbanisation et sont menacées de disparition à moins que ne soient créés des réseaux de réserves qui leur fourniront un habitat approprié.

## IMPACTS POTENTIELS SUR LE SECTEUR FORESTIER

*Impacts sur le marché mondial du bois d'œuvre*

Sohngen *et al.* (sous presse) et Perez-Garcia *et al.* (sous presse) ont découvert que l'" effet de serre " avait le potentiel d'accroître les volumes de la récolte et de réduire les prix. Perez-Garcia *et al.* (sous presse) ont comparé l'impact du changement climatique sur le secteur forestier mondial dans deux situations : avec des niveaux de récolte restant assujettis à la possibilité annuelle de coupe antérieure dans les principaux pays producteurs et en l'absence d'une telle restriction. Ce dernier scénario permettait d'exploiter le surcroît de productivité découlant du changement climatique et celui des régions encore inexploitées. Ils ont constaté que, quels que soient le MCG et le scénario économique utilisés, la production canadienne de billes de sciage, de bois d'oeuvre, de bois à pâte et de contreplaqué augmentait ou restait la même et que les propriétaires forestiers du Canada ressentaient les effets de la baisse des prix. Dans le cadre de son analyse du secteur forestier mondial, Binkley (1988) s'est aperçu que la récolte du bois à pâte résineux et des billes de sciage augmentait respectivement en moyenne de 27,3 et de 36,5 % au Canada, tandis que leur prix sur le marché diminuait en moyenne de 44,5 et de 19,5 % respectivement.

*Impacts sur le marché américain du bois d'oeuvre*

Le USDA Forest Service a effectué une simulation du secteur forestier américain et a constaté que la croissance et le matériel sur pied des forêts augmentaient, respectivement jusqu'à 24 et 35 % de plus, tandis que la consommation ne s'accroissait que de 1 à 3 %. Cette différence a été imputée à l'augmentation du matériel sur pied dans les jeunes peuplements non encore exploitables, puisque les effets du changement climatique ne se feront entièrement sentir que 50 ans plus tard (Joyce *et al.*, 1995) et qu'il faut du temps pour modifier la capacité et la technologie des centres de transformation afin de tirer parti des espèces et des volumes nouveaux (Joyce 1995). Mills et Haynes (1995) et Joyce *et al.* (1995) ont souligné que l'abondance du bois résineux découlant de l'augmentation du matériel sur pied fera chuter les prix et réduira l'utilisation de bois de feuillus, puisque des proportions accrues de fibre résineuse entreront dans la composition de fabrication de certains produits de papier. De plus, selon les prévisions, les importations canadiennes reculeront pour n'atteindre plus que 18 % sur le marché américain, étant donné l'augmentation du matériel sur pied exploitable dans les forêts américaines du nord-ouest de la côte du Pacifique d'ici 2040. Sohngen et Mendelsohn (en cours de révision) ont souligné qu'un réchauffement modéré (3 °C) aurait des effets économiques plus bénéfiques sur le marché américain du bois d'oeuvre qu'un réchauffement plus marqué (6 °C).

*Impacts sur le marché canadien du bois d'oeuvre*

L'évolution de divers facteurs provoquée par le changement climatique aura des effets directs et indirects sur la possibilité annuelle de coupe, qui fixe dans une large mesure le niveau de la récolte dans la plupart des forêts aménagées du Canada (Rothman et Herbert, 1997). Au nombre de ces facteurs figurent les prévisions de croissance et de volume, la période de rétablissement des peuplements, l'exploitabilité économique et opérationnelle et les pertes causées par les insectes et les incendies. Une simulation a montré que la productivité de la forêt américaine augmentait de façon significative dans les écosystèmes du nord et de haute montagne et que l'accroissement de la PPN des forêts résineuses septentrionales atteignait jusqu'à 40 % (Joyce *et al.*, 1995). Les forêts situées encore plus au nord que celles visées par cette étude pourraient connaître des augmentations équivalentes ou même supérieures, puisque l'effet de serre prévu augmente avec la latitude. Selon les estimations de Van Kooten (1990), l'augmentation potentielle du niveau de la récolte au Canada serait de 7,5 %, tandis que Joyce *et al.* (1995) l'ont évaluée à 3 % pour les États-Unis. D'après Binkley et van Kooten (1994), l'impact global sur le secteur forestier du Canada ne serait pas significatif. En effet, ce dernier est en mesure de s'adapter aux espèces dominantes pendant et après le changement climatique, de pratiquer des coupes de récupération dans les peuplements moribonds, de reboiser les aires récoltées à l'aide d'essences mieux adaptées au climat prévu et de déplacer ses opérations vers des endroits où les ressources sont plus abondantes. De plus, la contribution du secteur forestier à l'économie de la plupart des pays industrialisés est réduite (Binkley et van Kooten, 1994). Toutefois, les pertes dues aux incendies et aux insectes pourraient réduire les niveaux de rendement soutenu à long terme. Dans le cadre du projet du bassin du Mackenzie, on prévoyait un déclin général de la productivité des forêts sous l'effet de la conjugaison de plusieurs facteurs, notamment l'augmentation des superficies incendiées et de la vulnérabilité aux insectes et aux maladies ainsi que la mortalité massive causée par la sécheresse (Cohen, 1997).

L'impact sur le bien-être des Canadiens (le gain global pour les consommateurs et les producteurs) dépend de la sensibilité du marché national aux changements de l'offre et de la demande (van Kooten et Arthur, 1989). Des solutions commerciales simples, comme un gel arbitraire des niveaux de l'approvisionnement en bois, peuvent faire plus de tort que de bien, car les prix deviendront plus instables (Brazee et Mendelsohn, 1990). Les résultats d'une analyse effectuée par van Kooten (1990) montrent que, en raison de l'Accord de libre-échange Canada-États-Unis et dans l'hypothèse où les niveaux d'exportation vers les États-Unis se maintiennent, le bien-être des Canadiens ne s'améliorera que si la production américaine n'augmente pas. Les collectivités tributaires des forêts seront les plus touchées, puisque les facteurs sociaux directement et indirectement reliés à l'économie se détérioreront si le secteur des produits forestiers est obligé de réduire ses niveaux d'emploi (Beckley, 1995).

*Impacts sur les activités sans prélèvement*

Le changement climatique peut aussi avoir des effets sur des activités autres que l'exploitation forestière, y compris le ski alpin et le camping. Dans le sud de la forêt boréale, l'industrie du ski alpin pourrait être complètement anéantie en raison du manque de neige. Le recours à une utilisation plus intensive de la neige artificielle et la relocalisation des pistes à de plus hautes altitudes pourraient toutefois atténuer cet effet. Un climat plus chaud et plus sec allongerait la saison offrant des conditions fiables de camping. Cette activité deviendrait plus attrayante non seulement en elle-même, mais également comme complément à d'autres loisirs comme la randonnée pédestre, le canotage et l'observation d'oiseaux. Il s'ensuivrait un accroissement de l'activité économique dans les collectivités voisines des régions de camping, mais non sans risquer d'y provoquer une plus grande dégradation de l'environnement (Wall, 1988).

## SUGGESTIONS DE STRATÉGIES D'ADAPTATION ET DE GESTION

### *Influer sur le flux de carbone*

Réduire les émissions de gaz à effet de serre

Au nombre des stratégies d'adaptation figurent des interventions humaines pour accroître la séquestration du carbone (Apps et Kurz, 1991). Il faut que les instances politiques s'engagent à appuyer des stratégies qui englobent la réduction de l'étalement urbain, l'adoption de pratiques forestières durables et des études connexes qui répertorient et conservent les ressources génétiques et biologiques (Ehrlich et Wilson, 1991). Il est clair qu'il faut mettre en place des politiques qui réduisent les émissions de GES (van Kooten *et al.*, 1992). Des restrictions concernant l'usage des combustibles fossiles (Dudley *et al.*, 1996) ainsi que des règlements sur les émissions (Horgan, 1989) contribueraient à réduire les concentrations atmosphériques de polluants et les impacts sur les forêts du Canada.

Favoriser la séquestration du carbone

La mise au point de solutions de rechange aux combustibles fossiles et aux produits forestiers, conjuguée à l'établissement de plantations forestières énergétiques (d'essences pour bois de feu)

sur des terrains dénudés, permettrait d'accroître la superficie boisée pouvant servir de puits de carbone (Heath *et al.*, 1993). Sohngen et Mendelsohn (sous presse) ont découvert que les forêts des États-Unis pourraient agir comme puits de carbone à court et à long terme. On pourrait prolonger la durée de stockage du carbone dans les produits en bois en réduisant la vitesse de décomposition du produit (Dewar, 1990). L'adoption de la " gestion des produits forestiers " (harmonisation d'un produit final à la révolution d'une essence permettant de séquestrer véritablement et pendant plus longtemps le carbone dans le bois) permettrait de séquestrer une plus grande quantité de carbone après la production (*idem).* Cependant, la combustion de combustibles fossiles génère un flux de carbone beaucoup plus important qui pourrait être contrebalancé par des mesures sylvicoles à long terme (Oliver *et al.*, 1990). Toutefois, à court terme, il est plus rentable de gérer les forêts à des fins de séquestration du carbone que d'introduire, en autres choses, une nouvelle technologie efficace ou des sources de combustibles de remplacement. Le coût des options sylvicoles serait de 6 $ US/tonne métrique (tm) et de 11 $ US/tm, tandis que celui de l'adoption d'une nouvelle technologie varierait entre 34 $ US/tm et 363 $ US/tm (Winjum *et al.*, 1993). Le boisement des terres agricoles abandonnées est un moyen peu coûteux, efficace et souvent proposé pour restreindre le flux actuel de carbone libéré par les écosystèmes terrestres (Birdsey, 1990; Hendrickson, 1990; van Kooten, 1991; van Kooten *et al.*, 1992; Dudley *et al.*, 1996). Sedjo (1989) a étudié la faisabilité d'un tel projet à l'échelle mondiale. De plus, l'aménagement des forêts en vue de la production d'un maximum de biomasse, et non d'un rendement soutenu maximal, et sur de plus longues rotations accroîtrait la quantité de carbone séquestrée par unité de surface (Cooper, 1984; Hook, 1990). Enfin, la quantité de carbone rejetée par les forêts à la suite des demandes exercées par les populations humaines serait réduite si on utilisait le bois comme une ressource ultime de luxe et si l'on trouvait des moyens pour réduire la demande de combustible et de nourriture (Oliver *et al.*, 1990). Les stratégies d'atténuation qu'offre le reboisement peuvent déboucher sur un meilleur aménagement forestier et leurs répercussions à long terme doivent être prises en compte (Sohngen et Mendelsohn, sous presse). Il importe toutefois de souligner que les chercheurs ont porté peu attention aux questions touchant la lutte contre le feu — à savoir les coûts d'intervention et la capacité des organismes de lutte contre les feux de forêt de limiter les pertes dans les forêts assurant la séquestration du carbone à des niveaux qui permettront une séquestration de l'ampleur prévue.

### *Gestion de la biodiversité et des réserves*

Biodiversité et extinction

L'un des plus grands défis de la conservation de la biodiversité est que nous ignorons ce qu'est un niveau " normal " ou " fonctionnel " de biodiversité (Giles, 1994). La gestion de la biodiversité devrait être basée sur une stratégie écosystémique qui permet de préserver les habitats et les processus (Franklin, 1992). Toutes les ressources des forêts (y compris la faune, la matière ligneuse et son extraction, le tourisme et la biodiversité) devraient faire l'objet d'une gestion globale et intégrée (Clark *et al.*, 1996). On estime que les taux d'extinction actuels sont 100 à 1 000 fois supérieurs à ceux de l'époque précédant l'apparition de l'homme et que ceux de l'avenir seront dix fois plus élevés qu'à l'heure actuelle. Dans un écosystème isolé, le nombre d'espèces est fonction de la superficie du territoire (Wilson, 1989), mais le taux d'extinction potentiel est plus étroitement apparenté à la proportion d'espèces endémiques qu'au nombre total

d'espèces (Pimm *et al.*, 1995). À l'heure actuelle, les politiques de gestion de la faune et des forêts ont des effets aussi, voire plus importants sur la végétation que le changement climatique (Starfield et Chapin, 1996), et une modification de la végétation amènera un changement de l'habitat de nombreuses espèces et ébranlera la santé et la biodiversité de l'écosystème (Graham et Grimm, 1990; Pimentel *et al.*, 1992). La disparition ou le déclin d'une espèce peut entraîner la perte de toute une branche du réseau trophique, puisque des relations proie-prédateur, hôte-ravageur seront rompues (Paine, 1995). La diminution de 40 % de l'abondance des oiseaux zooplanctonophages observée après qu'une hausse de 1,4 °C de la température moyenne du courant de la Californie ait entraîné la disparition de 80 % de la population de zooplancton en est un bon exemple (Hill, 1995). En règle générale, les populations isolées comme celles vivant sur des îles (ou dans un îlot isolé de réserve naturelle) sont plus susceptibles d'extinction (MacArthur *et al.*, 1973). Les espèces occupant un même territoire interagissent les unes avec les autres, de sorte que les activités d'une espèce donnée ont de profonds effets sur la survie d'une autre. Ainsi, l'empoisonnement du chien de prairie a été lié à la quasi-extinction du furet à pattes noires (*Mustela nigripes*). L'existence de liens aussi étroits constitue le principal argument à l'appui de la conservation de la biodiversité, puisque la disparition d'une seule espèce peut avoir un effet en cascade aboutissant à la disparition de nombre d'espèces accompagnatrices (Miller *et al.*, 1994).

Bien que le changement climatique puisse s'échelonner sur plusieurs décennies, la réaction de la végétation peut, quant à elle, s'étaler sur plusieurs siècles (Solomon, 1986). Il s'ensuit un non-appariement ou un déséquilibre entre les conditions biotiques et physiques de l'habitat d'une espèce, déséquilibre encore accentué par un changement climatique plus rapide. Dans une telle situation, la menace d'extinction et de perte de biodiversité est plus grande (Malcolm et Markham, 1996). Lors de la remise en état d'habitats qui sont en concurrence avec des activités humaines (p. ex., habitat de reproduction des oiseaux aquatiques et agriculture), il faudrait faire converger les efforts vers les régions où la valeur de l'habitat est élevée et celle de l'agriculture faible : les chances d'empiétement futur sur l'habitat seront ainsi moins grandes (Bethke et Nudds, 1995).

La plupart des espèces peuvent s'adapter et s'adapteront à un changement climatique graduel, mais les mécanismes d'évolution sont limités en présence d'un changement rapide. Le changement climatique pourrait affecter des processus physiologiques comme la respiration et canaliser une plus grande quantité d'énergie vers le maintien de la température corporelle plutôt que vers le stockage d'énergie en prévision de la migration. Il pourrait avoir comme effets indirects de faire disparaître des ressources alimentaires et de réduire la disponibilité de l'eau. La disparition d'espèces clés aura un effet en cascade sur la multitude d'interactions biotiques (McAllister et Dalton, 1992).

Réserves naturelles

Les réserves existantes sont souvent des endroits isolés abritant de petites populations parfois exposées à un isolement génétique. Le changement climatique est source de contraintes physiologiques et d'interactions concurrentielles nouvelles qui font courir aux populations périphériques, aux espèces géographiquement confinées et aux populations génétiquement appauvries un plus grand risque d'extinction (Peters et Darling, 1985; Malcolm et Markham,

1997). La capacité limite d'une réserve est non seulement liée à sa superficie, mais également au nombre d'habitats différents qu'elle abrite (Graham, 1988). Les réserves sont vulnérables au changement climatique à deux égards. En premier lieu, le changement climatique peut réduire la superficie effective de l'habitat en raison des activités dans les zones tampons. En second lieu, il peut entraîner la disparition des conditions climatiques propices à l'habitat dans une partie ou dans l'ensemble de la réserve dont la création avait pour but de les protéger (Graham, 1988; Murcia, 1995). Ce sont les raisons pour lesquelles la conception de réserves doit faire appel à une gestion d'aménagement du paysage, l'objectif étant d'aider les espèces à migrer vers des endroits présentant des conditions climatiques plus appropriées (Webb, 1992; Dudley *et al.*, 1996), de rajuster les limites de la réserve aux accidents naturels du relief et d'aménager des emprises écologiques pour traverser ou contourner des ouvrages artificiels comme des routes ou des barrages (Harris et Cropper, 1992). Une telle méthode aurait recours à un réseau de réserves et de couloirs, engloberait une variété de paramètres topographiques et de types de sol (World Resource Institute, 1990), accroîtrait ainsi le nombre d'associations possibles d'espèces et réduirait le morcellement de l'habitat, ce qui aurait pour effet de faire diminuer les probabilités d'extinction des espèces (Graham et Grimm, 1990). C'est pourquoi il faudrait établir des réseaux de réserves et de couloirs de raccordement qui permettront de gérer de façon durable les forêts qui peuvent servir d'habitat transitoire ou permanent à certaines espèces.

Markham et Malcolm (1996) ont souligné que la conservation de la complexité écologique et le maintien de la résilience de l'écosystème sont les facteurs les plus importants pour réduire les impacts du changement climatique. Ils sont d'avis qu'une stratégie devrait, pour atteindre cet objectif, comporter un réseau de réserves offrant des habitats " répétitifs ", un morcellement faible et une grande connectivité, ainsi que des politiques de réduction des facteurs d'agression anthropique et de conservation de la biodiversité.

### *Gestion des ressources*

#### Stratégies sylvicoles

Le changement climatique prévu confrontera les aménagistes à des saisons de plantation plus courtes, à une activité accrue des insectes et du feu et à une mortalité plus grande due à la sécheresse (Farnum, 1992). Selon Farnum (1992), les aménagistes peuvent faire face à ces changements en répartissant leurs stratégies d'intervention en trois volets. Le premier comporte le recours à des prescriptions sylvicoles, comme l'éclaircie, qui pourront aider le matériel sur pied existant à supporter l'élévation des températures. Le deuxième est consacré aux programmes génétiques destinés à repérer ou à améliorer des semis résistants à la sécheresse au cours des dix prochaines années (voir aussi Hogan, 1989; Harding, 1994). Le troisième a trait aux programmes de longue haleine qui concernent les besoins génétiques et physiologiques éventuels des arbres après les dix premières années (Farnum, 1992). De plus, il faut s'efforcer de planter des espèces mieux adaptées, de créer un sous-étage dans les forêts mixtes et d'utiliser des espèces et des sources de semences diversifiées (Ledig et Kitzmiller, 1992) afin d'accroître la variabilité génétique et le recours à la succession naturelle par les prescriptions sylvicoles (Heath *et al.*, 1993). Simultanément, la pratique de coupes de récupération, l'utilisation de nouvelles espèces et l'usage du bois reconstitué contribueront à allonger les révolutions forestières. Des révolutions

plus longues permettront aux forêts de jouer un rôle plus important dans la séquestration du carbone et de réduire la vulnérabilité des espèces sauvages à l'extinction.

Les décisions en matière de lutte contre les ravageurs doivent tenir compte du fait que les arbres victimes de stress hydrique sont plus vulnérables aux infestations d'insectes phytophages (Mattson et Haack, 1987).

Selon Farnum (1992), suivre les progrès de la technologie et repérer les facteurs menaçant la forêt au cours des années à fort effet de serre pourrait aider à établir les priorités des programmes de recherche, de façon à mettre en relief les projets permettant de faire face aux impacts du changement climatique.

Perturbations

Les pullulations d'insectes et les feux de forêt croissent avec l'augmentation de la sécheresse et la fréquence de températures supérieures à la normale. Il est possible qu'il y ait une rétroaction positive entre le changement climatique et les régimes de perturbation des forêts, car les activités de séquestration du carbone ne devraient pas influer considérablement sur l'accroissement prévu des rejets de carbone attribuable à l'intensification de ces deux types de perturbation et de la décomposition dans le sol (Kurz *et al.*, 1995).

La lutte contre les incendies devrait s'intensifier dans les secteurs où sont concentrées des ressources de valeur et le brûlage dirigé pourrait être de plus en plus utilisé pour réduire la quantité de combustibles dans les régions où les ressources ont moins de valeur (Stocks, 1993). Il est évident que les plans d'aménagement ne devront pas endommager irrémédiablement la résilience des forêts (Pollard, 1991) et qu'ils devront prévenir la déforestation et la dégradation du milieu (Heath *et al.*, 1993).

Méthodes d'aménagement

L'aménagiste doit connaître la quantité de stress que peut supporter un écosystème avant de présenter des dégâts graves (discontinuité) ainsi que la synergie possible des facteurs en interaction (Malcolm et Markham, 1996); ce sont là de bonnes raisons justifiant la mise en application de solutions dites " sans regrets ". Ainsi, le reboisement des terres agricoles abandonnées afin d'accroître la séquestration du carbone ne constitue certes pas une solution à long terme au problème de l'augmentation des concentrations atmosphériques de $CO_2$, mais procure toutefois d'autres avantages, y compris des zones de loisirs et une biomasse commercialisable supplémentaires (Myers, 1995), et une plus grande connectivité des forêts. Un aménagement écologiquement durable et le recours à des moyens de lutte biologique contribueront à garder les écosystèmes forestiers en bonne santé, qu'il y ait ou non changement climatique (Pimentel *et al.*, 1992). L'adoption de stratégies différentes selon les diverses parties de l'aire d'extension d'une espèce peut également constituer des politiques du " sans regrets ". Ainsi, on pourra raccourcir la révolution à l'extrémité sud de l'aire d'extension afin de minimiser les pertes et pratiquer un reboisement intensif dans la partie centrale de l'aire. Pour réduire les pertes (ou les coûts) que le changement climatique pourrait entraîner, on peut concentrer les

investissements dans les régions les moins sensibles au changement climatique, ajouter des espèces ou des variétés nouvelles et prévoir des changements opérationnels et techniques, y compris la relocalisation d'usines (Singh et Wheaton, 1991).

Reconnaître les limites du savoir

Selon Franklin *et al.* (1992), les surprises seront chose courante, car nous ne pouvons modéliser toutes les variables du milieu et les interactions des espèces qui s'y trouvent. Nous savons qu'un changement climatique nous attend, mais nous ne connaissons pas ses impacts sur le milieu forestier. C'est pourquoi nous ne devons pas nous limiter à un scénario ou à une stratégie d'adaptation unique (Pollard, 1987). Nous devons aussi réaliser que le changement climatique est une grande inconnue en aménagement forestier (Pollard, 1991). C'est peut-être pour cette raison que Kurz et Apps (1993) ont proposé que les aménagistes renoncent au concept de gestion d'un état stationnaire, qui suppose que les régimes de perturbation ne subissent aucun changement. De la même façon, Franklin *et al.* (1992) sont persuadés qu'il faut changer notre philosophie et non plus simplement planter des arbres, mais plutôt conserver la complexité de l'écosystème. Tous les changements qu'il est proposé d'apporter à la théorie de gestion rejoignent l'idée de Holling (1973) qui a suggéré de gérer les systèmes écologiques en fonction de leur résilience plutôt que de leur stabilité. La résilience est la persistance des rapports au sein de l'écosystème en présence d'un changement. Cette perspective préconise de n'exclure aucune option et présume que nous ne connaissons que très peu la façon dont un écosystème réagira à un changement donné. Un changement du mode de gestion s'impose donc : il faut oublier les concepts de stabilité et de gestion en fonction de niveaux d'équilibre, de possibilité maximale de coupe et de rendement constant de la récolte.

## RECHERCHE ET LACUNES DES CONNAISSANCES

### *Enrichissement de la base de connaissances*

*La fertilisation par le $CO_2$, l'absorption de carbone et les interactions avec d'autres éléments nutritifs et leur disponibilité sont toujours entachées de beaucoup d'incertitude.*

Étant donné que les modèles du climat et de la végétation s'appuient toujours dans une certaine mesure sur les cycles des éléments nutritifs, il faut approfondir la recherche sur les interactions du $CO_2$ et d'autres émissions, car leurs concentrations augmentent simultanément (Allen, 1990). Pour améliorer les modèles biologiques actuels, il faut connaître plus en détail les cycles du carbone, du méthane et de l'azote (Woodwell, 1987; Christensen, 1991; Bonan, 1993) et l'interaction entre les processus physiques (p. ex., albédo de la surface, profil de la température) et biologiques (p. ex., cycle des éléments nutritifs, décomposition) de l'écosystème du sol (Dixon et Turner, 1991). Les impacts combinés du $CO_2$, des éléments nutritifs du sol et du climat sur les écosystèmes forestiers ne sont pas bien connus (Oechel, 1990). Il faut également mieux comprendre l'interaction entre la démographie et la physiologie végétales et les conditions du milieu, comme la concurrence végétale, le patrimoine génétique, la variance de la succession stationnelle et l'interaction hôte-agent pathogène et ses effets sur le cycle du carbone et le potentiel de séquestration (McGraw et Fetcher, 1992; Heath *et al.*, 1993). Il faut également

enrichir nos connaissances sur la relation entre le climat et la croissance des arbres (van Kooten, 1991) afin d'être en mesure de prévoir avec une plus grande précision les seuils de tolérance physiologique des arbres mûrs aux conditions climatiques (Dobson *et al.*, 1989; Peine et Martinka, 1992). Des études échelonnées sur de plus longues périodes (plus d'une ou de trois saisons de croissance) aideraient à prévoir les impacts à long terme, comme l'adaptation de la photosynthèse à des températures plus élevées (Eamus et Jarvis, 1989).

Il faut de plus parfaire nos connaissances sur les mécanismes régissant les taux de migration de la flore et de la faune (Oechel, 1990). Il importe de mieux comprendre la biologie des populations, y compris les processus écosystémiques de recrutement, d'établissement, de croissance, de mortalité, de perturbation due au feu et aux ravageurs, ainsi que la faune (Neilson et Running, 1996). Au nombre des difficultés que pose l'évaluation des impacts du changement climatique sur la flore et la faune figure le manque de connaissances sur la répartition des espèces et sur l'importance relative des espèces pour la santé de l'écosystème (Pimentel *et al.*, 1992). De plus, il faut mieux connaître les impacts du changement climatique sur la qualité de l'habitat, y compris ceux sur les milieux humides (Poiani et Johnson, 1993), et leurs interactions avec la composition des espèces (Oechel, 1990). Il conviendrait d'étudier de façon plus détaillée l'impact du déboisement sur le changement climatique (Woodwell, 1987; Dobson *et al.*, 1989). Enfin, il est nécessaire de mieux comprendre les interactions de la pollution atmosphérique et du cycle des éléments nutritifs avec des facteurs non climatiques comme la croissance et la répartition de la population mondiale (Heath *et al.*, 1993). Toutes ces lacunes dénotent l'insuffisance des connaissances sur les effets causaux du changement climatique (Parry *et al.*, 1996). Il est particulièrement inquiétant de constater les lacunes résultant du manque de recherche interdisciplinaire et interrégionale, et de l'absence de méthodes permettant d'extrapoler à l'échelle régionale les données propres à un site et vice-versa (Graham *et al.*, 1990).

### *Amélioration de la collecte et du partage des données*

L'intensification des efforts de surveillance peut combler certaines de ces lacunes. Il faudrait surveiller systématiquement les phénomènes météorologiques à l'échelle mondiale (Woodwell, 1987) et inclure la collecte de données sur des paramètres à différentes échelles spatiales ainsi que sur les profils verticaux (Dobson *et al.*, 1989; Lawford et Cohen, 1991). Les données sur la troposphère font gravement défaut (Michaels et Knappenberger, 1996). La surveillance biologique devrait notamment englober la composition des espèces et le rythme et l'emplacement de la déforestation (Woodwell, 1987) et des mesures plus précises des interactions hydrologiques (Lawford et Cohen, 1991). La surveillance des régions (p. ex., les limites forestières de l'étage alpin et de la région nordique) et des processus (p. ex., cycle des feux, établissement des semis et intensité des tempêtes) sensibles au climat procurera des données fort utiles sur la réaction du milieu (Graham *et al.*, 1990). De meilleures données sur la croissance de la biomasse, sur la mortalité et sur les perturbations des forêts contribueront à construire des modèles plus précis de la végétation et de la séquestration du carbone (Heath *et al.*, 1993). La surveillance des écosystèmes déjà agressés aidera à définir les seuils physiologiques à l'égard de la disponibilité de l'eau et de la température et leurs interactions (Davis et Zabinski, 1992). L'observation des zones de transition qui seront les premières à subir des changements (Heath *et al.*, 1993) et de

l'évolution incessante de la végétation peut servir à surveiller la progression du changement climatique (Körner, 1992).

Pour être efficace, la recherche sur le changement climatique doit être : (1) effectuée de façon assez souple pour appuyer et promouvoir des études interdisciplinaires (Dobson *et al.*, 1989), et (2) intégrée à un cadre politique qui permette la mise en oeuvre commune de solutions définies à l'échelle mondiale et régionale (Woodwell, 1989; Oechel, 1990).

***Perfectionnement des modèles actuels***

La plupart des prévisions concernant le changement climatique proviennent de l'intégration des connaissances actuelles à des modèles du climat ou de l'évolution de la végétation. Les actuels MCG ne sont pas conçus pour être utilisés à l'échelle régionale, car ils ne tiennent pas compte de la géographie et des processus locaux (Sulzman *et al.*, 1995). Il faut élargir leur résolution afin d'améliorer leurs capacités prédictives à l'échelle régionale et saisonnière et à l'égard des phénomènes extrêmes (Markham, 1996).

La majorité des modèles actuels de la végétation font appel à des fonctions de réponse climatique qui partent implicitement de l'hypothèse que les essences forestières pousseront là où les conditions de l'habitat seront propices et que de telles conditions sont uniquement fonction du climat (Loehle et LeBlanc, 1996). Pour parfaire ces modèles, on peut élargir leur portée et multiplier le nombre de processus clés dont ils tiennent compte. Pour améliorer l'interaction entre les modèles climatiques et biologiques (Heath, 1993), on peut les coupler via des processus biochimiques pour mieux simuler les cycles du carbone et de l'azote (Bonan, 1993). Les travaux d'Alcamo *et al*. (1994a et 1994b) et de Neilson (1995) (prévision des types de végétation à l'aide de modèles couplés) vont dans ce sens. L'absence d'interactions aussi détaillées est notamment soulignée par Claussen (1994), qui l'attribue à des comparaisons de séquences d'utilisation indépendante et intégrée de modèles prédictifs de la végétation (BIOME) et du climat (ECHAM). Comme prochaine étape, on pourrait intégrer les perturbations et leurs interactions à la végétation et au climat (Overpeck *et al.*, 1990). C'est là une amélioration importante, car l'intensification des perturbations naturelles est largement reconnue comme le premier signe de changement climatique (Joyce *et al.*, 1990). L'inclusion de modules sur le bilan hydrique (Stephenson, 1990) est un moyen d'intégrer des modèles du climat et de la végétation et de les améliorer tous deux. En plus de l'évolution de la végétation, les modèles devraient prendre en compte les processus liés aux populations fauniques et l'ampleur du déséquilibre entre l'habitat et le climat (Malcolm et Markham, 1996). Pour apporter des améliorations de ce type, il faut combler les lacunes des connaissances relevées dans la littérature. De plus, il faut élaborer des modèles comportant des facteurs non climatiques pour évaluer l'influence et les effets du changement climatique sur les pratiques futures d'aménagement forestier (Zuidema *et al.*, 1994). Il faut mettre au point des modèles des zones de transition et de leurs réactions au changement climatique, car ils pourraient nous donner un meilleur aperçu de la phase de transition dans laquelle nous sommes peut-être déjà engagés, par opposition à des conditions d'équilibre qui ne se matérialiseront peut-être jamais (Neilson, 1993a).

## CONCLUSIONS

*Le changement climatique est un facteur important que doivent prendre en compte les responsables de l'aménagement forestier actuel et futur au Canada.*

Au Canada, l'aménagement forestier est en pleine mutation, délaissant la production de matière ligneuse au profit de la gestion des écosystèmes. Ces dernières années, les provinces ont élaboré des stratégies visant à accroître la superficie des zones protégées et ont adopté, par l'entremise de leurs ministères responsables des forêts ou de leurs associations professionnelles, des codes de pratiques forestières et de nouvelles lois sur l'aménagement des forêts mettant l'accent sur la durabilité des ressources et la biodiversité. L'industrie a eu plusieurs différends avec les États-Unis au sujet du bois d'oeuvre résineux et doit maintenant affronter la concurrence plus vive exercée par les plantations tropicales sur le marché mondial (Rothman et Herbert, 1997; Sohngen *et al.*, sous presse). Le changement climatique est un élément omniprésent de ces changements sociaux, politiques et économiques.

*Notre ignorance pourrait nous faire du tort.*

Parmi les problèmes environnementaux qui nous attendent, les plus graves pourraient bien être ceux que nous ne connaissons pas encore, et la recherche devrait s'employer à enrichir nos connaissances plutôt qu'à approfondir des éléments que nous connaissons déjà (Myers, 1995). Le changement climatique constitue un autre facteur d'agression des écosystèmes forestiers du Canada. Bien qu'il puisse sembler négligeable pour l'heure, il a le potentiel d'influer énormément sur la santé future des écosystèmes boisés du Canada.

## REMERCIEMENTS

Cet examen a pu être réalisé grâce au financement accordé par Environnement Canada et par le Service canadien des forêts dans le cadre de l'Étude pan-canadienne.

Nous désirons remercier de leur aide J. Baker (ministère des Richesses naturelles de l'Ontario), P. Kertland et D. Rothman (Environnement Canada). A. Kenney et D. Puric-Mladenovic (Centre de foresterie urbaine, Université de Toronto) ont beaucoup contribué à la section sur l'urbanisation. Nous avons eu la chance de pouvoir consulter les versions préliminaires des sections sur les forêts des rapports régionaux de l'ÉPC, ce qui a facilité notre tâche. Nous voulons remercier tout particulièrement R. Stewart (Service canadien des forêts) et E. Wheaton (Saskatchewan Research Council), qui ont formulé des commentaires et des suggestions très utiles.

RÉFÉRENCES

Alcamo, J., Kreileman, G. J. J., Krol, M. S. et Zuidema, G. (1994a). Modelling the global society-biosphere-climate system, Part 1: Model description and testing, *Water, Air and Soil Pollution*, 76:1-35.

Alcamo, J., van den Born, G. J., Bouwman, A. F., de Haan, B. J., Klein Goldewijk, K. K., Klepper, O., Krabec, J., Leemans, R., Olivier, J. G. J., Toet, A. M. C., de Vries, H. J. M. et van der Woerd, H. J. (1994b). Modelling the global society-biosphere-climate system, Part 2: Computed scenarios, *Water, Air and Soil Pollution*, 76:37-78.

Allen Jr., P. A. (1990). Plant response to rising carbon dioxide and potential interaction with air pollutants, *Journal of Environmental Quality*, 19:15-34.

Apps, M. J. et Kurz, W. A. (1991). Assessing the role of Canadian forests and forest sector activities in the global carbon balance, *World Resource Review*, 3:333-344.

Apps, M. J., Kurz, W. A., Luxmoore, R. J., Nilsson, L. O., Sedjo, R. A., Schmidt, R. et Simpson, L. G. (1993). Boreal forests and tundra, *Water, Air and Soil Pollution*, 70:39-53.

Arris, L. L. et Eagleson, P. A. (1989). Evidence of a physiological basis for the boreal-deciduous ecotone in North America, *Vegetation*, 82:55-58.

Auclair, A. N. D., Lill, J. T. et Revenga, C. (1996). The role of climate variability and global warming in the dieback of northern hardwoods, *Water, Air and Soil Pollution*, 91:163-186.

Ayres, M. P. et Scriber, J. M. (1994). Local adaptation to regional climates, dans *Papilio canadensis* (*Lepidoptera*: *Papilionidae*), *Ecological Monographs*, 64 :465-482.

Beckley, T. M. (1995). Community stability and the relationship between economic and social well-being in forest dependant communities, *Society and Natural Resources*, 8:261-266.

Bergeron, Y. et Flannigan, M. D. (1995). Predicting the effects of climate change on fire frequency in the southeastern Canadian boreal forest, *Water, Air and Soil Pollution*, 82:437-444.

Bethke, R. W. et Nudds, T. D. (1995). Effects of climate change and land use on duck abundance in Canadian prairie-parklands, *Ecological Applications*, 5:588-600.

Beuker, E. (1994). Long-term effects of temperature on the wood production of *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst, in old provenance experiments, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 9:34-45.

Billings, W. D., Peterson, K. M., Luken, J. O. et Mortensen, D. A. (1984). Interaction of increasing atmospheric carbon dioxide and soil nitrogen on the carbon balance of tundra microcosms, *Oecologia*, 65:26-29.

Binkley, C. S. (1988). " A case study of the effects of $CO_2$-induced climatic warming on forest growth and the forest sector, B. economic effects on the world's forest sector ", dans *The Impact of Climatic Variation on Agriculture*, Parry, M. L., Carter, T. R. et Konijn, N. T. (dir.), Kluwer Academic Press, Dordrecht (Pays-Bas), p. 197-221.

Binkley, C. S. et van Kooten, G. C. (1994). Integrating climatic change and forests: economic and ecologic assessments, *Climatic Change*, 28:91-110.

Birdsey, R. A. (1990). " Carbon budget realities at the stand and forest level ", dans *Are Forests the Answer? Proceedings of the 1990 Society of American Foresters, National Convention held July 29-August 1, 1990, Washington, DC*, SAF Publication 90-02, Society of American Foresters, Bethesda (Md.), p. 181-186.

Bonan, G. B. (1993). Do biophysics and physiology matter in ecosystem models?, *Climatic Change*, 24:281-285.

Bonan, G. B. and Shugart, H. H. (1989). Environmental factors and ecological processes in boreal forests, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20:1-28.

Bonan, G. B., Shugart, H. H. et Urban, D. L. (1990). The sensitivity of some high-latitude boreal forests to climatic parameters, *Climatic Change*, 16:9-29.

Botkin, D. B., Woodby, D. A. et Nisbet, R. A. (1991). Kirtland's warbler habitats: a possible early indicator of climatic warming, *Biological Conservation*, 56:63-78.

Bray, J. R. (1956). Gap-phase replacement in a maple-basswood forest, *Ecology*, 37:598-600.

Brazee, R. and Mandelsohn, R. (1990). A dynamic model of timber markets, *Forest Science*, 36:255-264.

Brubaker, L. B. (1986). Responses of tree populations to climatic change, *Vegetation*, 67:119-130.

Bugmann, H. (1994). *On the ecology of mountainous forests in changing climate: a simulation study*, diss. de doctorat, École polytechnique fédérale, Zurich (Suisse).

Burton, I. (1997). " Suggestion for the Treatment of Adaptation in the IPCC Special Report on Regional Impacts of Climate Change ", dans *IPCC Regional Meeting*, AES, Downsview (Ont.), 27 p.

Burton, P. J. et Cumming, S. G. (1995). Potential effects of climatic change on some western Canadian forests, based on phenological enhancements of a patch model of forest succession, *Water, Air and Soil Pollution*, 82:401-414.

Campbell, I. D. et McAndrews, J. H. (1993). Forest disequilibrium caused by rapid Little Ice Age cooling, *Nature (London)*, 366:336-338.

Cannell, M. G. R., Grace, J. et Booth, A. (1989). Possible impacts of climatic warming on trees and forests in the United Kingdom: a review, *Forestry*, 62:337-364.

Chapin III, F. S., Shaver, G. R., Giblin, A. E., Nadelhoffer, K. J. et Laundre, J. A. (1995). Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate, *Ecology*, 76:649-711.

Christensen, T. (1991). Arctic and sub-arctic soil emissions: possible implications for global climate change, *Polar Record*, 27:205-210.

Clark, J. S. (1988). Effect of climate change on fire regimes in northwestern Minnesota, *Nature*, 334:233-235.

Clark, T. W., Paquet, P. C. et Curlee, A. P. (1996). Special section: large carnivore conservation in the Rocky Mountains of the United States and Canada, *Conservation Biology*, 10:936-939.

Claussen, M. (1994). On coupling global biome models with climate models, *Climate Research*, 4:203-221.

Cohen, S. J. (1997). *Mackenzie Basin Impact Study Final Report - Executive Summary*, Environnement Canada, Toronto (Ont.).

Comins, H. N. et McMurtrie, R. E. (1993). Long-term response of nutrient-limited forests to $CO_2$ enrichment: equilibrium behavior of plant-soil models, *Ecological Applications*, 3:666-681.

Cook, E. R. et Cole, J. (1991). On predicting the response of forests in eastern North America to future climatic change, *Climatic Change*, 19:271-282.

Cooper, C. F. (1984). Carbon storage in managed forests, *Canadian Journal of Forest Research*, 13:155-166.

Crowley, T. J. et North, G. R. (1988). Abrupt climate change and extinction events in earth history, *Science*, 240:996-1002.

Cumming, H. G. et Beange, D. B. (1993). Survival of woodland caribou in commercial forests northern Ontario, *Forestry Chronicle*, 69:579-588.

Cure, J. D. et Acock, B. (1986). Crop response to carbon dioxide doubling: a literature survey, *Agricultural and Forest Meteorology*, 38:127-145.

D'Arrgio, R. D. et Jacoby Jr., G. C. (1993). Secular trends in high northern latitudes temperature reconstructions based on tree rings, *Climatic Change*, 25:163-177.

Dale, V. H. et Franklin, J. F. (1989). Potential effects of climate change on stand development in the Pacific Northwest, *Canadian Journal of Forest Research*, 19:1581-1590.

Daly, C., Neilson, R. P. et Phillips. D. L. (1994). A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, 33:140-158.

Davis, M. B. (1989). Lags in vegetation response to greenhouse warming, *Climatic Change*, 15:75-82.

Davis, M. B. (1983). Quaternary history of deciduous forests of eastern North America and Europe, *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 70:550-563.

Davis, M. B. et Botkin, D. B. (1985). Sensitivity of cool-temperate forests and their fossil pollen record to rapid temperature change, *Quaternary Research*, 23:327-340.

Davis, M. B., Woods, K. D., Webb, S. L. et Futyma, R. P. (1986). Dispersal versus climate: expansion of *Fagus* and *Tsuga* into the Upper Great Lakes region, *Vegetation*, 67:93-104.

Davis, M. B. et Zabinski, C. (1992). " Changes in geographical range resulting from greenhouse warming: effects on biodiversity in forests ", dans *Global Warming and Biological Diversity*, Peters, R. L. et Lovejoy, T. E. (dir.), Yale University Press, New Haven (Conn.), p. 297-308.

Deming, D. (1995). Climatic warming in North America: analysis of borehole temperatures, *Science*, 268:1576-1577.

Dewar, R. C. (1990). A model of carbon storage in forests and forest products, *Tree Physiology*, 6:417-428.

Diamond, A. W. et Brace, R. K. (1991). " Climate and waterfowl populations ", dans *Symposium on Impacts of Climatic Change and Variability on the Great Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 245-257.

Diaz, S., Grime, J. P., Harris, J. et McPherson, E. (1993). Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide, *Nature (London)*, 364:616-617.

Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C. et Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems, *Science*, 263:185-190.

Dixon, R. K. et Turner, D. P. (1991). The global carbon cycle and climate change: responses and feedbacks from below-ground systems, *Environmental Pollution*, 73:245-262.

Dobson, A., Jolly, A. et Rubenstein, D. (1989). The greenhouse effect and biological diversity, *Trends in Ecology and Evolution*, 4:64-68.

Dorney, J. R. et Leitner, L. A. (1985). Woodlot scale: a method for rapid assessment of woodlot values, *Environmental Management*, 9:27-33.

Dudley, N., Jeanrenaud, J.-P. et Markham, A. (1996). Conservation in boreal forests under conditions of climate change, *Silva Fennica*, 30:379-383.

Eamus, D. et Jarvis, P. G. (1989). The direct effects of increase in the global atmospheric $CO_2$ concentration on natural and commercial temperate trees and forests, *Advances in Ecological Research*, 19:1-55.

Ecological Stratification Working Group-ESWG (1996). *A National Ecological Framework for Canada*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa (Ont.), 125 p.

Ehrlich, P. R. et Wilson, E. O. (1991). Biodiversity studies: science and policy, *Science*, 253:758-762.

Elliott, D. L. (1979). The current regenerative capacity of northern Canadian trees, Keewtin, N.W.T., Canada: some preliminary observations, *Arctic and Alpine Research*, 11:243-251.

Emanuel, W. R., Shugart, H. H. et Stevenson, M. P. (1985). Climate change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes, *Climatic Change*, 7:29-43.

Farnum, P. (1992). " Forest adaptation to global climate change through silvicultural treatments and genetic improvement ", dans *Implications of Climate Change for Pacific Northwest Forest Management*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 15, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 81-84.

Filion, F. L., Parker, S. et DuWors, E. (1988). *The Importance of Wildlife to Canadians: Demand for Wildlife to 2001*, Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 29 p.

Flannigan, M. D. et Harrington, J. B. (1988). A study of the relation of meteorology variables to monthly provincial area burned by wildfires in Canada, *Journal of Applied Meteorology*, 27:441-452.

Flannigan, M. D. et van Wagner, C. E. (1991). Climatic change and wildfires in Canada, *Canadian Journal of Forest Research*, 21:66-72.

Fleming, R. A. et Volney, J. A. (1995). Effects of climate change on insect defoliator population processes in Canada's boreal forest: some plausible scenarios, *Water, Air and Soil Pollution*, 82:445-454.

Franklin, J. F., Swanson, F. J., Harmon, M. E., Perry, D. A., Spies, T. A., Dale, V. H., McKee, A., Ferrell, W. K., Means, J. E., Gregory, S. V., Lattin, J. D., Schowalter, T. D. et Larsen, D. (1992). " Effects of global climatic change on forests in northwestern North America ", dans

*Global Warming and Biological Diversity*, Peters, R. L. et Lovejoy, T. E. (dir.), Yale University Press, New Haven (Conn.), p. 244-257.

Fried, J. S. et Torn, M. S. (1990). Analysing localised climate impacts with the changed climate fire modelling system, *Natural Resource Modelling*, 4:229-253.

Gagnon, R. et Payette, S. (1985). Régression holocène du couvert conifèrien à la limite des forêts (Québec nordique), *Canadian Journal of Botany*, 63:1213-1225.

Galen, C. et Stanton, M. L. (1993). Short-term responses of alpine buttercups to experimental manipulations of growing season length, *Ecology*, 74:1052-1058.

Gates, D. M. (1990). Climate change and forests, *Tree physiology*, 7:1-5.

Gear, A. J. et Huntley, B. (1991). Rapid changes in the range limits of Scots pine 4000 years ago, *Science*, 251:544-547.

Gelbspan, R. (1995). The heat is on, *Harper's Magazine*, décembre, p. 31-37.

Gholz, H. L. (1982). Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest, *Ecology*, 63:469-481.

Gilbert, N. et Raworth, D. A. (1996). Insects and temperature - a general theory, *Canadian Entomologist*, 128:1-13.

Giles, B. E. (1994). Genetic biodiversity: analysing the data, *Trends in Ecology and Evolution*, 9:317-319.

Grabherr, G., Gottfried, M. et Pauli, H. (1994). Climate effects on mountain plants, *Nature (London)*, 369, 448 p.

Graham, R. L., Turner, M. G. et Dale, V. H. (1990). How increasing $CO_2$ and climate change affect forests, *BioScience*, 40:575-587.

Graham, R. W. (1988). The role of climatic change in the design of biological reserves: the paleoecological perspective for conservation biology, *Conservation Biology*, 2:391-391.

Graham, R. W. et Grimm, E. C. (1990). Effects of global climate change on the patterns of terrestrial biological communities, *Trends in Ecology and Evolution*, 5:289-292.

Green, D. G. (1987). Pollen evidence for the postglacial origins of Nova Scotia's forests, *Canadian Journal of Botany*, 65:1163-1179.

Greenough, J.A., Apps, M.J. et Kurz, W.A. (1997). Influence of methodology and assumptions on reported national carbon flux inventories: an illustration from the Canadian forest sector, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2(2-3): 267-283.

Halsey, L. A., Vitt, D. H. et Zoltai, S. C. (1995). Disequilibrium response of permafrost in boreal continental western Canada to climate change, *Climatic Change*, 30:57-73.

Hänninen, H. (1991). Does climate warming increase the risk of frost damage in northern trees?, *Plant, Cell and Environment*, 14:449-454.

Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S., Ruedy, R., Russell, G. et Stone, P. (1988). Global Climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model, *Journal of Geophysical Research*, 93:9341-9364.

Harding, L. E. (1994). " Threats to diversity of forest ecosystems in British Columbia ", dans *Biodiversity in British Columbia: Our Changing Environment*, Harding, L. E. et McCullum, E. (dir.), Environnement Canada, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), p. 245-278.

Harper, B., Canning, S., Fraser, D. et Munro, W. T. (1994). " Provincial lists of species at risk ", dans *Biodiversity in British Columbia: Our Changing Environment*, Harding, L. E. et McCullum, E. (dir.), Environnement Canada, Service canadien de la faune, Ottawa (Ont.), p. 16-23.

Harris, L. D. et Cropper Jr., W. P. (1992). " Between the devil and the deep blue sea: implications of climate change for Florida's fauna ", dans *Global Warming and Biological Diversity*, Peters, R L et Lovejoy, T E (dir.), Yale University Press, New Haven (Conn.), p. 309-324.

Hartley, I. et Marshall, P. (1997). " Modelling forest Dynamics in the Mackenzie Basin under a changing climate ", dans *Mackenzie Basin Impact Study Final Report*, Cohen, S. J. (dir.), Environnement Canada, Toronto (Ont.), p. 143-153.

Heath, L. S., Kauppi, P. E., Burschel, P., Gregor, H.-D., Guderian, R., Kohlmaier, G. H., Lorenz, S., Overdieck, D., Scholz, F., Thomasius, H. et Weber, M. (1993). Contribution of temperate forests to the world's carbon budget, *Water, Air and Soil Pollution*, 70:55-69.

Heide, O. M. (1993). Dormancy release in beech buds (*Fagus sylvatica*) requires both chilling and long days, *Physiologia Plantarum*, 89:187-191.

Heide, O. M. (1974). Growth and dormancy in Norway spruce ecotypes (*Picea abies*). I. Interactions of photoperiod and temperature, *Physiologia Plantarum*, 30:1-12.

Hendrickson O. Q. (1990). How does forestry influence atmospheric carbon?, *Forestry Chronicle*, 66:469-472.

Hill, D. K. (1995). Pacific warming unsettles ecosystems, *Science*, 267:1911-1912.

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4:1-23.

Hook, D. D. (1990). " Silvicultural strategies and carbon budget relationships in the forests of the eastern United States ", dans *Are Forests the Answer? Proceedings of the 1990 Society of American Foresters, National Convention held July 29-August 1, 1990, Washington, DC,* SAF Publication 90-02, Society of American Foresters, Bethesda (Md.), p. 193-198.

Horgan, J. (1989). Greenhouse America - a global warming may destroy U.S. forest and wetlands, *Scientific American*, 260:20-21.

Houghton, R. A. et Woodwell, G. M. (1989). Global climate change, *Scientific American*, 260:36-44.

Hunt, H. W., Trlica, M. J., Redente, E. F., Moore, J. C., Dentling, J. K., Kittel, T. G. F., Walter, D. E., Fowler, M. C., Klein, D. A. et Elliott, E. T. (1991). Simulation model for the effects of climate change on temperate grassland ecosystems, *Ecological Modelling*, 53:205-246.

Huntley, B. et Webb III, T. (1989). Migration: species' response to climatic variations caused by changes in the earth's orbit, *Journal of Biogeography*, 16:5-19.

Idso, K. B. et Idso, S. B. (1994). Plant responses to atmospheric $CO_2$ enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years' research, *Agricultural and Forest Meteorology*, 69:153-203.

Inouye, D. W. et McGuire, A. D. (1991). Effects of snowpack on timing and abundance of flowering in *Delphinium nelsonii (Ranunculaceae)*: Implications for climate change, *American Journal of Botany*, 78:977-1001.

Intergovernmental Panel on Climate Change (1996). *Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. et Maskell, K. (dir.), Cambridge University Press, New York (N.Y.), 878 p.

Jacoby Jr., G. C. et D'Arrgio, R. D. (1995). Tree ring width and density and evidence of climatic and potential forest change in Alaska, *Global Biogeochemical Cycles*, 9:227-234.

Jacoby Jr., G. C. et D'Arrgio, R. D. (1989). Reconstructed northern hemisphere annual temperature since 1671 based on high-latitude tree ring data from North America, *Climatic Change*, 14:39-59.

Jacoby Jr., G. C, D'Arrgio, R. D. et Davaajamts, T. (1996). Mongolian tree rings and 20th-century warming, *Science*, 273:771-773.

Jenkinson, D. S., Adams, D. E. et Wild, A. (1991). Model estimates of $CO_2$ emissions from soil in response to global warming, *Nature (London)*, 351:304-306.

Johnson, A. H., Cook, E. R. et Siccama, T. G. (1988). Climate and red spruce growth and decline in the northern Appalachians, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 85:5369-5373.

Johnson, E. A. et Larson C. P. S. (1991). Climatically induced change in fire frequency in the southern Canadian Rockies, *Ecology*, 72:194-201.

Jones, E. A., Reed, D. D., Morz, G. D., Liechty, H. O. et Cattelino, P. J. (1993). Climate stress as a precursor to forest decline: paper birch in northern Michigan, 1985-1990, *Canadian Journal of Forest Research*, 23:229-233.

Joyce, L. A. (1995). " Executive Summary ", dans *Productivity of America's Forests and Climate Change*, Joyce, L. A. (dir.), USDA Forest Service, Fort Collins (Colo.), General Technical Report RM-271, p. 1-2.

Joyce, L. A., Fosberg, M. A. et Comanor, J. M. (1990). *Climate Change and America's Forests*. U.S.D.A., Forest Service, Fort Collins (Colo.), General Technical Report RM-187, 12.

Joyce, L. A., Mills, J. R., Heath, L. S., McGuire, A. D., Haynes, R. W. et Birdsey, R. A. (1995). Forest sector impacts from changes in forest productivity under climate change, *Journal of Biogeography*, 22:703-713.

Kadonaga, L. (1997). " Forecasting future fire susceptibility in the Mackenzie Basin ", dans *Mackenzie Basin Impact Study Final Report*, Cohen, S. J. (dir.), Environnement Canada, Toronto (Ont.), 154-162.

Kasischke, E. S., Christensen Jr., N. L. et Stocks, B. J. (1995). Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests, *Ecological Applications*, 5:437-41.

Kauppi, P. et Posch, M. (1988). " A case study of the effects of CO2 induced climatic warming on forest growth and the forest sector: A. Productivity reactions of northern boreal forests ", dans *The Impact of Climatic Variations on Agriculture. Vol. I: Assessment in cool Temperate and Cold Regions*, Parry, M. L., Carter, T. R. et Konjin, N. T. (dir.), Kluwer Academic Press, Dordrecht (Pays-Bas), p. 183-195.

Kauppi, P. et Posch, M. (1985). Sensitivity of boreal forests to possible climatic warming, *Climatic Change*, 7:45-54.

Keeling, C. D., Chin, J. F. S. et Whorf, T. P. (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric $CO_2$ measurements, *Nature (London)*, 382:146-149.

Keleher, C. J. et Rahel, F. J. (1996). Thermal limits of salmonid distributions in the Rocky Mountain Region and potential habitat loss due to global warming: a geographic information system (GIS) approach, *Transactions of the American Fisheries Society*, 125 :1-13.

Kienast, F. et Luxmoore, R. J. (1988). Tree-ring analysis and conifer growth responses to increased atmospheric $CO_2$ levels, *Oecologia*, 76:487-495.

Kimmins, J. P. et Lavender, D. P. (1992). Ecosystem-level changes that may be expected in a changing global climate: a British Columbia perspective, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 11:1061-1068.

King, G. A. et Neilson, R. P. (1992). The transient response of vegetation to climate change: a potential source of $CO^2$ to the atmosphere, *Water, Air and Soil Pollution*, 64:365-383.

Kohlmaier, G. H., Häger, C., Würth, G., Lüdeke, M. K. B., Ramge, P., Bedeck, F.-W., Kindermann, J. et Lang, T. (1995). Effects of the age class distribution of the temperate and boreal forests on the global $CO_2$ source-sink function, *Tellus*, 47B:212-231.

Kokorin, A. O. et Nazarov, I. M. (1995). The analysis of growth parameters of Russian boreal forests in warming, and its use in [a] carbon budget model, *Ecological Modelling*, 82:139-150.

Körner, Ch. (1992). Response of alpine vegetation to global climate change, *Catena Supplement*, 22:85-96.

Kullman, L. (1990). Dynamics of altitudinal tree-limits in Sweden: a review, *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 44:103-116.

Kurz, W.A. et Apps, M.J. (1995). An analysis of future carbon budgets of Canadian boreal forests, *Water, Air and Soil Pollution*, 82: 321-331.

Kurz, W. A. et Apps, M. J. (1993). Contribution of northern forests to the global C cycle: Canada as a case study, *Water, Air and Soil Pollution*, 70:163-176.

Kurz, W.A., Apps, M.J., Beukema, S.J. et Lekstrum, T. (1995), 20$^{th}$ century carbon budget of Canadian forests, *Tellus*, 47B: 170-177.

Kurz, W. A., Apps, M. J., Stocks, B. J. et Volney, W. J. (1995). " Global climate change: disturbance regimes and biospheric feedbacks of temperate and boreal forests ", dans *Biotic Feedbacks in the Global Climate System - Will the Warming Feed the Warming?*, Woodwell, G. M. et Mackenzie, F. T. (dir.), Oxford University Press, New York (N.Y.), p. 119-133.

Kurz, W. A., Apps, M. J., Webb, T. M. et McNamee, P. J. (1992). *The Carbon Budget of the Canadian Forest Sector: Phase I*. For. Can., Northwest Reg., Edmonton, Alberta, Inf. Rep. NOR-X-326. 93.

LaMarche Jr., V. C., Graybill, D. A., Fritts, H. C. et Rose, M. R. (1984). Increasing atmospheric carbon dioxide: tree ring evidence of growth enhancement in natural vegetation, *Science*, 225:1019-1021.

Landhäusser, S. M. et Wein, R. W. (1993). Postfire vegetation recovery and tree establishment at the Arctic treeline: climate-change vegetation response hypotheses, *Journal of Ecology*, 81:665-672.

Larsen, J. A. (1971). Vegetational relationships with air mass frequencies: boreal forest and tundra, *Arctic*, 24:177-197.

Larson, D. L. (1995). Effects of climate on numbers of northern prairie wetlands, *Climatic Change*, 30:169-180.

Lavoie, C. et Payette, S. (1996). The long-term stability of the boreal forest limit in subarctic Québec, *Ecology*, 77:1226-1233.

Lawford, R. G. et Cohen, S. J. (1991). " The impacts of climatic variability and change in the Mackenzie Delta ", dans *Mackenzie Delta: environmental interactions and implications of development*, Marsh, P. et Ommanney, C. S. L. (dir.), Saskatoon (Sask.), p. 155-172.

LeBlanc, D. C. et Foster, J. K. (1992). Predicting effects of global warming on growth and mortality of upland oak species in the midwestern United States: a physiologically based dendroecological approach, *Canadian Journal of Forest Research*, 22:1739-1752.

Ledig, F. T. et Kitzmiller, J. H. (1992). Genetic strategies for reforestation in the face of global climate change, *Forest Ecology and Management*, 50:153-169.

Leemans, R. et van den Born, G. J. (1994). Determining the potential distribution of vegetation, crops and agricultural productivity, *Water, Air and Soil Pollution*, 76:133-161.

Legg, D. (1995). *The Economic Impact of Hunting for Large Mammals in Ontario, 1993*, Resource Stewardship and Development Branch, Ontario Ministry of Natural Resources, Ontario, 7.

Leniham, J. M. et Neilson, R. P. (1995). Canadian vegetation sensitivity to projected climate change at three organisational levels, *Climatic Change*, 30:27-56.

Lescop-Sinclair, K. et Payette, S. (1995). Recent advance of the arctic treeline along the eastern coast of Hudson Bay, *Journal of Ecology*, 83:929-936.

Liu, K.-B. (1990). Holocene paleoecology of the Boreal forest and Great Lakes - St. Lawrence forest in northern Ontario, *Ecological Monographs*, 60:179-212.

Lloyd, J. et Taylor, J. A. (1994). On the temperature dependence of soil respiration, *Functional Ecology*, 8:315-323.

Loehle, C. et LeBlanc, D. (1996). Model-based assessments of climate change effects on forests: a critical review, *Ecological Modelling*, 90:1-31.

Long, S P. (1991). Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric $CO_2$ concentration: has its importance been underestimated?, *Plant, Cell and Environment*, 14:729-739.

Lüdeke, M. K. B., Dönges, S., Otto, R. D., Kindermann, J., Badeck, F.-W., Ramge, P., Jäkel, U. et Kohlmaier, G. H. (1995). Responses in NPP and carbon stores of the northern biomes to a $CO_2$-induced climatic change, as evaluated by the Frankfurt Biosphere Model (FBM), *Tellus*, 47B:191-205.

Lungren, J. O. (1995). " The tourism space penetration process in northern Canada and Scandinavia: a comparison ", dans *Polar Tourism: Tourism in the Arctic and Antarctic Regions*, Hall, C. M. et Johnston, M. E. (dir.), John Wiley and Sons, Toronto (Ont.), p. 43-61.

Luxmoore, R. J., Wullschleger, S. D. et Hanson, P. J. (1993). Forest responses to $CO_2$ enrichment and climate warming, *Water, Air and Soil Pollution*, 70:309-323.

Maarouf, A. R., Jacobs, J. D. et Perkins, E. A. (1994). " An analysis of the recent instrumental record of climate for northern Labrador and Quebec for conditions unfavourable to caribou ", dans *George River Caribou Workshop*, Labrador Institute for Northern Studies, held January 27-29, 1994, Labrador City, Labrador, Memorial University of Newfoundland.

MacArthur, R. H., Diamond, J. M. et Karr, J. R. (1973). Density compensation in island faunas, *Ecology*, 53:330-342.

MacDonald, G. M., Edwards, T. W. D., Moser, K. A., Pienitz, R. et Smol, J. P. (1993). Rapid response of treeline vegetation and lakes to past climate warming, *Nature (London)*, 361:243-246.

MacDonald, K. A. et Brown, J. H. (1992). Using montane mammals to model extinctions due to global change, *Conservation Biology*, 6:409-415.

Maillette, L. (1987). Effects of bud demography and elongation patterns on *Betula cordifolia* near the tree line, *Ecology*, 68:1251-1261.

Malcolm, J.R. et Markham, A. (1997). *Climate change threats to the national parks and protected areas of the United States and Canada*, World Wildlife Fund Report, juin 1997, Washington (D.C.).

Malcolm, J. R. et Markham, A. (1996). Ecosystem resilience, biodiversity and climate change: setting limits, *Parks*, 6:38-49.

Manabe, S. et Stouffer, R. J. (1993). Century scale effects of increase atmospheric $CO_2$ on the ocean-atmosphere system, *Nature*, 364:215-218.

Manabe, S. et Wetherald, R. T. (1987). Large-scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide, *Journal of Atmospheric Sciences*, 44:1211-1235.

Manabe, S. et Wetherald, R. T. (1980). On the distribution of climate change resulting from an increase in $CO_2$ content of the atmosphere, *Journal of Atmospheric Science*, 37:99-118.

Markham, A. (1996). Potential impacts of climate change on ecosystems: a review of implications for policymakers and conservation biologists, *Climate Research*, 6:179-191.

Markham, A. et Malcolm, J. R. (1996). " Biodiversity and wildlife: adaptation to climate change ", dans *Adapting to Climate Change: Assessment and Issues*, Smith, J. B., Bhatti, N., Menzhulin, G., Benioff, R., Budyko, M. I., Campos, M., Jallow, B. et Rijsberman, F. (dir.), Springer, New York (N.Y.), p. 384-401.

Martinat, P. J. (1987). " The role of climatic variation and weather in forest insect outbreaks ", dans *Insect Outbreaks*, Barbosa, P. et Schultz, J. C. (dir.), Academic Press, Inc., San Diego (Ca.), p. 241-268.

Masters, A. M. (1990). Changes in forest fire frequency in Kootenay National Park, Canadian Rockies, *Canadian Journal of Botany*, 68:1763-1767.

Matlack, G. R. (1994). Plant species migration in a mixed-history forest landscape in Eastern North America, *Ecology*, 75:1491-1502.

Mattson, W. J. et Haack, R. A. (1987). The role of drought stress in provoking outbreaks of plant-eating insects, *BioScience*, 37:110-118.

McAllister, D. E. et Dalton, K. W. (1992). How global warming affects species survival, *Canadian Biodiversity*, 2:7-14.

McConnaughay, K. D. M., Berntson, G. M. et Bazzaz, F. A. (1993). Plant responses to carbon dioxide, *Nature (London)*, 361, 24 p.

McGraw, J. B. et Fetcher, N. (1992). " Response of tundra plant populations to climatic change ", dans *Arctic Ecosystems in a Changing Climate*, Chapin III, F. S., Jefferies, R. L., Reynolds, J. F., Shaver, G. R. et Svoboda, J. (dir.), Academic Press, Inc., Toronto (Ont.), p. 359-376.

Melillo, J. M., McGuire, A. D., Kicklighter, D. W., Moore III, B., Vorosmarty, C. J. et Schloss, A. L. (1993). Global climate change and terrestrial net primary production, *Nature (London)*, 363:234-240.

Michaels, P. J. et Knappenberger, P. C. (1996). Human effect on global climate?, *Nature*, 384, 522 p.

Mikola, P. (1962). " Temperature and growth neat the northern timber line ", dans Koslowski, T. T. (dir.), *Tree Growth*, Ronald Press, New York (N.Y.), p. 265-274.

Miller, B., Ceballos, G. et Reading, R. (1994). The prairie dog and biotic diversity, *Conservation Biology*, 8:677-681.

Mills, J. R. et Haynes, R. W. (1995). " Influence of Climate Change on Supply and Demand for Timber ", dans *Productivity of America's Forests and Climate Change*, Joyce, L. A. (dir.), USDA Forest Service, Fort Collins (Colo.), General Technical Report RM-271, p. 46-55.

Monserud, R. A., Tchebakova, N. M. et Leemans, R. (1993). Global vegetation change predicted by the modified Budyko model, *Climatic Change*, 25:59-83.

Mooney, H. A., Drake, B. G., Luxmoore, R. J., Oechel, W. C. et Pitelka, L. F. (1991). Predicting ecosystem response to elevated $CO_2$ concentrations: what has been learned form laboratory experiments on plant physiology and field observations?, *Bioscience*, 41:96-104.

Morse, L. E., Kunther, L. S., Maddox, G. D., Honey, L. L., Thurman, C. M., Kartesz, J. T. et Chaplin, S. J. (1993). *The Potential Effects of Climate Change on the Native Vascular Flora of North America: A Preliminary Climate Envelopes Analysis*, The Nature Conservancy, Arlington (Va.), EPRI TR-103330.

Murcia, C. (1995). Edge effects in fragmented forests: implications for conservation, *Trends in Ecology and Evolution*, 10:58-62.

Musselman, R. C. et Fox, D. G. (1991). A review of the role of temperate forests in the global $CO_2$ balance, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 41:798-807.

Myers, N. (1995). Environmental unknowns, *Science*, 269:358-360.

Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G. et Nemani, R. R. (1997). Increased plant growth in northern high latitudes from 1981-1991, *Nature*, 386:698-702.

Neilson, R. P. (1987). Biotic regionalization and climatic controls in western North America, *Vegetation*, 70:135-147.

Neilson, R. P. (1986). High-resolution climatic analysis and southwest biogeography, *Science*, 232:27-34.

Neilson, R. P. (1995). A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance, *Ecological Applications*, 5:362-385.

Neilson, R. P. (1993a). Transient ecotone response to climatic change: some conceptual and modelling approaches, *Ecological Applications*, 3:385-395.

Neilson, R. P. (1993b). Vegetation redistribution: a possible biosphere source of $CO_2$ during climate change, *Water, Air and Soil Pollution*, 70:659-673.

Neilson, R. P. et Marks, D. (1994). A global perspective of regional vegetation and hydrological sensitivities from climatic change, *Journal of Vegetation Science*, 5:715-730.

Neilson, R. P. et Running, S. W. (1996). " Global dynamic vegetation modelling coupling biogeochemistry and bigeography models ", dans *Global Change and Terrestrial Ecosystems*, Walker, B. et Steffen, W. (dir.), Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), p. 451-465.

Neilson, R. P. et Wullstein, L. H. (1983). Biogeography of two southwest American oaks in relation to atmospheric dynamics, *Journal of Biogeography*, 10:275-296.

Oechel, W. C. (1990). " Understanding the impacts of climatic change on northern ecosystems ", dans *Impacts of Climatic Change on Natural Ecosystems, with Emphasis on Boreal and Arctic/Alpine Areas, held November 27-29, 1990 in Trondheim, Norway*, Holten, J. I., Paulsen, G. et Oechel, W. C. (dir.), Trondheim (Norvège), NINA, p. 5-8.

Oechel, W. C. et Vourlitis, G. L. (1994). The effects of climate change on land-atmosphere feedbacks in arctic tundra regions, *Tree*, 9:324-329.

Oliver, C. D., Kershaw Jr., J. A. et Hinckley, T. M. (1990). " Effect of harvest of old growth Douglas-fir and subsequent management on carbon dioxide levels in the atmosphere ", dans *Are Forests the Answer? Proceedings of the 1990 Society of American Foresters, National Convention held July 29-August 1, 1990, Washington, D.C.*, SAF Publication 90-02, Society of American Foresters, Bethesda (Md.), p. 187-192.

Overpeck, J. T., Bartlein, P. J. et Webb III, T. (1991). Potential magnitude of future vegetation change in eastern North America: comparisons with the past, *Science*, 254:692-695.

Overpeck, J. T., Rind, D. et Goldberg, R. (1990). Climate-induced changes in forest disturbance and vegetation, *Nature (London)*, 343:51-53.

Paine, R. T. (1995). A conversation on refining the concept of keystone species, *Conservation Biology*, 9:962-964.

Parry, M. L., Carter, T. R. et Hulme, M. (1996). What is a dangerous climate change?, *Global Environmental Change*, 6:1-6.

Pastor, J. et Post, W. M. (1988). Response of northern forests to $CO_2$-induced climate change, *Nature (London)*, 334:55-58.

Payette, S., Filion, L., Delwaide, A. et Bégin, C. (1989). Reconstruction of tree-line vegetation response to long-term climate change, *Nature (London)*, 341:429-432.

Payette, S. et Gagnon, R. (1985). Late Holocene deforestation and tree regeneration in the forest-tundra of Québec, *Nature (London)*, 313:570-572.

Payette, S., Morneau, C., Sirois, L. et Desponts, M. (1989). Recent fire history of the northern Québec biomes, *Ecology*, 70:656-673.

Pearce, C. M. (1993). " Coping with forest fragmentation in southwestern Ontario ", dans *Size and Integrity Standards for Natural Heritage Areas in Ontario*, Poser, S. F., Crins, W. J. et Beechy, T. J. (dir.), Provincial Parks and Natural Heritage Policy Branch, Ontario Ministry of Natural Resources, Toronto (Ont.), p. 100-113.

Peine, J. D. et Martinka, C. J. (1992). " Impacts of climate change on mountain protected areas - implications for management ", dans *Proceedings of the IVth World Congress on National Parks and Protected Areas, Caracas, Venezuela, held February 10-21, 1992.*

Perez-Garcia, J., Joyce, L. A., Binkley, C. S. et McGuire, A. D. (sous presse). Economic impacts of climatic change on the global forest sectors: an integrated ecological/economic assessment, *Critical reviews of environmental science and technology*.

Perry, D. A., Brochers, J. G., Brochers, S. L. et Amaranthus, M. P. (1990). Species migrations and ecosystem stability during climate change: the below-ground connection, *Conservation Biology*, 4:266-274.

Peters, R. L. (1990). Effects of global warming on forests, *Forest Ecology and Management*, 35:13-33.

Peters, R. L. et Darling, J. D. S. (1985). The greenhouse effect and nature reserves, *BioScience*, 35:707-717.

Pigot, C. D. et Huntley, J. P. (1981). Factors controlling the distribution of *Tilia cordata* at the northern limits of its geographical range. III. Nature and causes of seed sterility, *New Phytologist*, 87:817-839.

Pimentel, D., Stachow, U., Takacs, D. A., Brubaker, H. W., Dumas, A. R., Meaney, J. J., O'Neil, J. A. S., Onsi, E. et Corzilius, D. B. (1992). Conserving biological diversity in agriculture/forestry systems, *BioScience*, 42:354-62.

Pimm, S. L., Russel, G. J., Gittleman, J. L. et Brooks, T. M. (1995). The future of biodiversity, *Science*, 269:347-350.

Plöchl, M. et Cramer, W. P. (1995). Coupling global models of vegetation structure and ecosystem processes - an example from Arctic and boreal ecosystems, *Tellus*, 47B:240-250.

Poiani, K. A. et Johnson, W. C. (1991). Global warming and Prairie wetlands, *BioScience*, 41:611-618.

Poiani, K. A. et Johnson, W. C. (1993). Potential effects of climate change on a semi-permanent prairie wetland, *Climatic Change*, 24:213-232.

Pollard, D. F. W. (1987). " Forestry and Climate Change: Facing Uncertainty ", dans *E.B. Eddy Distinguished Lecture Series*, Faculty of Forestry, Université de Toronto, Toronto (Ont.), p. 18-39.

Pollard, D. F. W. (1991). Forestry in British Columbia: planning for future climate change today, *Forestry Chronicle*, 67:336-341.

Pollard, D. F. W. (1985). A forestry perspective on the carbon dioxide issue, *Forestry Chronicle*, 61:312-318.

Prentice, I. C., Bartlein, P. J. et Webb III, T. (1991). Vegetation and climate changes in eastern North America since the last glacial maximum, *Ecology*, 72:2038-2056.

Prentice, I. C., Sykes, M. T. et Cramer, W. P. (1991). The possible dynamic response of northern forests to global warming, *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1:129-135.

Prentice, I. C., Sykes, M. T. et Cramer, W. P. (1993). A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes, *Ecological Modelling*, 65:51-70.

Price, C. et Rind, D. (1994). Possible implications of global climate change on global lightning distribution and frequencies, *Journal of Geographic Research*, 99, 10823 p.

Price, M. F. et Haslett, J. R. (1993). " Complexities of climate change in the mountains ", dans *Parks, Peaks and People - a collection of papers arising from an international consultation on protected areas in mountain environments, held in Hawaii Volcanoes National Park, October 26-November 2, 1991*, Hamilton, L. S., Bauer, D. P. et Takeuchi, H. F. (comp. et dir.), East-West Center, Program on Environment, Honolulu (Hawaii), p. 37-49.

Raich, J. W. et Schlesinger, W. H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation climate, *Tellus*, 44B:81-99.

Rastetter, A. B., Rayan, M. G., Shaver, G. R., Melillo, J. M., Nadelhoffer, K. J., Hobbie, J. E. et Aber, J. D. (1991). A general biogeochemical model describing the response of C and N cycles in terrestrial ecosystems to changes in CO2, climate and N deposition, *Tree Physiology*, 9:101-126.

Riley, J. L. et Mohr, P. (1994). *The Natural Heritage of Southern Ontario's Settled Landscapes - A Review of Conservation and Restoration Ecology for Land-use Planning*, Ontario Ministry of Natural Resources, Aurora (Ont.), 78 p.

Rind, D., Goldberg, R., Hansen, J., Rosenzweig, C. et Ruedy, R. (1990). Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought, *Journal of Geophysical Research*, 95:9983-10004.

Ritchie, J. C. et MacDonald, G. M. (1986). The patterns of post-glacial spread of white spruce, *Journal of Biogeography*, 13:527-540.

Rizzo, B. et Wiken, E. (1992). Assessing the sensitivity of Canada's ecosystems to climate change, *Climatic Change*, 21:37-55.

Roberts, L. (1988). Is there life after climate change?, *Science*, 242:1010-1012.

Romme, W. H. et Turner, M. G. (1990). Implications of global climate change for biogeographic patterns in the greater Yellowstone system, *Conservation Biology*, 5:373-386.

Root, T. (1988). Environmental factors associated with avian distributional boundaries, *Journal of Biogeography*, 15:489-505.

Rose, D. W., Ek, A. R. et Belli, K. L. (1987). " A conceptual framework for assessing impacts of carbon dioxide change on forest industries ", dans *The Greenhouse Effect, Climate Change, and U.S. Forests*, Shands, W. E. et Hoffman, J. S. (dir.), The Conservation Foundation, Washington (D.C.), p. 259-275.

Rosenzweig, C. et Parry, M. L. (1994). Potential impact of climate change on world food supply, *Nature (London)*, 367:133-138.

Rothman, D. S. et Herbert, D. (1997). " The socio-economic implications of climate change in the forest sector of the Mackenzie Basin ", dans *Mackenzie Basin Impact Study Final Report*, Cohen, S. J. (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 221-237.

Rowe, J. S. (1972). *Forest regions of Canada*, Canadian Forestry Service Publication No. 1300, Information Canada, Ottawa (Ont.), 172 p.

Ryan, K. C. (1991). Vegetation and wildland fire: implications of global climate change, *Environment International*, 17:169-178.

Sauder, E. A. (1995). " Harvesting practices for alternative silvicultural systems in the Canadian boreal forest ", dans *Proceedings: Innovative Silviculture Systems in Boreal Forests, held October 2-8, 1994, Edmonton, Alberta*, Bamsey, C. R. (dir.), Clear Lake Ltd., Edmonton (Alb.), p. 56-60.

Schindler, D. W., Beaty, K. G., Fee, E. J., Cruikshank, D. R., DeBruyn, E. R., Findlay, D. L., Linsey, G. A., Shearer, J. A., Stainton, M. P. et Turner, M. A. (1990). Effects of climatic warming on lakes of the Central Boreal forest, *Science*, 250:967-970.

Schneider, S. H. (1989). The changing climate, *Scientific American*, 261:70-79.

Scott, P. A., Fayle, D. C. F., Bentley, C. V. et Hansell, R. I. C. (1988). Large-scale changes in atmospheric circulation interpreted from patterns of tree growth at Churchill, Manitoba, Canada, *Arctic and Alpine Research*, 20:199-211.

Sedjo, R. (1989). Forests: a tool to moderate global warming?, *Environment*, 31:14-20.

Shao, G. et Halpin, P. N. (1995). Climate controls of eastern North American coastal tree and shrub distributions, *Journal of Biogeography*, 22:1083-1089.

Shaver, G. R., Billings, W. D., Chapin III, F. S., Giblin, A. E., Nadelhoffer, K. J., Oechel, W. C. et Rastetter, E. B. (1992). Global change and the climate balance of arctic ecosystems, *Bioscience*, 42:433-441.

Shugart, H. H., Antonovsky, M. Y., Jarvis, P. G. et Sandford, A. P. (1986). " $CO_2$, climatic change and forest ecosystems ", dans *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems*, Bolin, B., Döös, B. R., Jäger, J. et Warrick, R. A. (dir.), SCOPE 29, John Wiley and Sons, New York (N.Y.), p. 475-521.

Singh, B. (1988). *Les répercussions d'un changement climatique sur les ressources naturelles du Québec. Sommaire du changement climatique, SCC 88-08*, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ont.), 11 p.

Singh, T. et Wheaton, E. E. (1991). Boreal forest sensitivity to global warming: implications for forest management in western interior Canada, *Forestry Chronicle*, 67:342-348.

Sirois, L., Bonan, G. B. et Shugart, H. H. (1994). Development of a simulation model of the forest-tundra transition zone of northeastern Canada, *Canadian Journal of Forest Research*, 24:697-706.

Smith, N., Dunsworth, G., Hawkins, C. et Northway, S. (1992). " An overview $CO_2$ budget for MacMillan Bloedel Ltd: are we a source of a sink? ", dans *Implications of Climate Change for Pacific Northwest Forest Management*, Wall, G. (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 15, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 123.

Sohngen, B. L. et Mendelsohn, R. (sous examen). *Valuing the market impact of large scale ecological change.*

Sohngen, B. et Mendelsohn, R. (sous presse). A dynamic model of forest carbon storage in the United States during climatic change, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*.

Sohngen, B., Mendelsohn, R., Sedjo, R. et Lyon, K. (1997, sous presse). " Climate change impacts: the case of global timber markets ", dans *Annual Meeting of the American Agricultural Economics Association,* Toronto (Ont.), Canada.

Solomon, A. M. (1986). Transient response of forests to $CO_2$-induced climate change: simulation modelling experiments in eastern North America, *Oecologia*, 68:567-579.

Solomon, A. M. et Bartlein, P. J. (1992). Past and future climate change response by mixed deciduous-coniferous forest ecosystems in northern Michigan, *Canadian Journal of Forest Research*, 22:1727-1738.

Solomon, A. M. et West, D. C. (1987). " Simulating forest ecosystem responses to expected climate change in eastern North America: applications to decision making in the forest industry ", dans *The Greenhouse Effect, Climate Change, and the U.S. Forests,* Shands, W. E. et Hoffman, J. S. (dir.), The Conservation Foundation, Washington (D.C.), p. 189-217.

Spittlehouse, D. L. (1992). " Effects of climate variability on forest regeneration and productivity ", dans *Implications of Climate Change for Pacific Northwest Forest Management*, Wall, G. (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 15, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 124.

Starfield, A. M. et Chapin III, F. S. (1996). A dynamic model of arctic and boreal vegetation change in response to global changes in climate and land use, *Ecological Applications*, 6:842-864.

Stephenson, N. L. (1990). Climatic control of vegetation distribution: the role of water balance, *American Naturalist*, 135:649-670.

Stocks, B. J. (1993). Global warming and forest fires in Canada, *The Forestry Chronicle*, 69:290-293.

Stocks, B. J., Lee, B. S. et Martell, D. L. (1996). " Some potential carbon budget implications of fire management in the boreal forest ", dans *Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*, Apps, M. J. et Price, D. T. (dir.), Springer-Verlag, Berlin (Allemagne), p. 89-96.

Suffling, R. (1995). Can disturbance determine vegetation distribution during climate warming? a boreal test, *Journal of Biogeography*, 22:501-508.

Sulzman, E. W., Poiani, K. A. et Kittel, T. G. F. (1995). Modelling human-induced climatic change: a summary for environmental managers, *Environmental Management*, 19:197-224.

Thomas, J. A., Moss, D. et Pollard, E. (1994). Increased fluctuations of butterfly populations towards the north edges of species' ranges, *Ecography*, 17:215-220.

Thomson, D. J. (1995). The seasons, global temperature and precession, *Science*, 268:59-68.

Torn, M. S. et Fried, J. S. (1992). Predicting the impacts of global warming on wildland fire, *Climatic Change*, 21:257-274.

Urban, D. L., Harmon, M. E. et Halpern, C. B. (1993). Potential response of pacific northwestern forests to climatic change, effects of stand age and initial composition, *Climatic Change*, 23:247-266.

van Cleve, K., Oechel, W. C. et Hom, J. L. (1990). Response of black spruce (*Picea mariana*) ecosystems to soil temperature modification in interior Alaska, *Canadian Journal of Forest Research*, 20:1530-1535.

van Cleve, K., Oliver, L., Schlentner, R., Vierick, L. A. et Dyrness, C. T. (1983). Productivity and nutrient cycling in taiga forest ecosystems, *Canadian Journal of Forest Research*, 13:747-766.

van Kooten, G. C. (1990). Climatic change impacts on forestry: economic issues, *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 38:701-710.

van Kooten, G. C. (1991). *Economic Issues Relating to Climate Change Effects on Canada's Forests*, The University of British Columbia, Department of Agricultural Economics and Department of Forest Resources Management, University of British Columbia, Forest Economics and Policy Analysis Research Unit, Working Paper 151, 52 p.

van Kooten, G. C. et Arthur, L. M. (1989). Assessing economic benefits of climate change on Canada's boreal forest, *Canadian Journal of Forest Research*, 19:463-470.

van Kooten, G. C., Arthur, L. M. et Wilson, W. R. (1992). Potential to sequester carbon in Canadian forests: some economic considerations, *Canadian Public Policy*, XVIII:127-138.

VEMAP Members (1995). Vegetation/ecosystem modelling and analysis project: comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and $CO_2$ doubling, *Global Biogeochemical Cycles*, 9:407-437.

Volney, W. J. A. (1988). Analysis of historic jack pine budworm outbreaks in the prairie provinces of Canada, *Canadian Journal of Forest Research*, 18:1152-1158.

Walker, B. H. (1991). Ecological consequences of atmospheric and climate change, *Climatic Change*, 18:301-316.

Wall, G. (1988). *Les répercussions du changement climatique sur le tourisme et les loisirs en Ontario. Sommaire du changement climatique, SCC 88-05*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 16 p.

Walters, C. (1986). *Adaptive Management of Renewable Resources*, MacMillan Publishing Company, New York (N.Y.), 374 p.

Waring, R. H. et Franklin, J. F. (1979). Evergreen coniferous forests of the Pacific Northwest, *Science*, 204:1380-1386.

Watt, A. S. (1947). Pattern and process in the plant community, *Journal of Ecology*, 35:1-22.

Weaver, J. L., Paquet, P. C. et Ruggiero, L. F. (1996). Resilience and conservation of large carnivores in the Rocky Mountains, *Conservation Biology*, 10:964-976.

Webb III, T. (1992). " Past changes in vegetation and climate: lessons for the future ", dans *Global Warming and Biological Diversity*, Peters, R. L. et Lovejoy, T. E. (dir.), Yale University Press, New Haven (Conn.), p. 59-75.

Webb, S. L. (1987). Beech range extension and vegetation history: pollen stratigraphy of two Wisconsin lakes, *Ecology*, 68:1993-2005.

Wedeles, C. H. R. et van Damme, L. (1995). *Effects of Clear-cutting and Alternative Silvicultural Systems on Wildlife in Ontario's Boreal Mixedwoods*, NODA Northern Forestry Program, Sault-Sainte-Marie (Ont.), NODA/NFP Technical Report TR-19. 56.

Weetman, G. F. (1995). " Silvicultural systems in Canada's boreal forest ", dans *Proceedings: Innovative Silviculture Systems in Boreal Forests, held October 2-8, 1994, Edmonton, Alberta*, Bamsey, C. R. (dir.), Clear Lake Ltd., Edmonton (Alb.), p. 5-17.

Wheaton, E. E. et Singh, T. (1988). *L'exploration de l'incidence du changement climatique sur la forêt boréale et l'économie forestière de l'ouest du Canada. Sommaire du changement climatique, SCC 89-02*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada Downsview (Ont.), 18 p.

Wilson, E. O. (1989). Threats to biodiversity, *Scientific American*, 261:60-66.

Winjum, J. K., Dixon, R. K. et Schroeder, P. E. (1993). Forest management and carbon storage: an analysis of 12 key forest nations, *Water, Air and Soil Pollution*, 70:239-257.

Woods, K. D. et Davis, M. B. (1989). Paleoecology of range limits: beech in the upper peninsula of Michigan, *Ecology*, 70:681-696.

Woodwell, G. M. (1987). Forests and climate: surprises in store, *Oceanus*, 29:71-75.

Wotton, B. M. et Flannigan, M. D. (1993). Length of fire season in a changing climate, *The Forestry Chronicle*, 69:187-192.

World Wildlife Fund (1994). *Critical levels and ecological limits to climate change*, déclaration de l'atelier de Washington.

Zuidema, G., van den Born, G. J., Alcamo, J. et Kreileman, G. J. J. (1994). Simulating changes in the global land cover as affected by economic and climatic factors, *Water, Air and Soil Pollution*, 76:163-198.

## ANNEXE 6A NOMS VERNACULAIRES ET SCIENTIFIQUES DES ESPÈCES CITÉES DANS LE TEXTE

**Plantes**

| | | |
|---|---|---|
| Sorgho | *Sorghum bicolor* (L.) Moench | *Panicoideae* |
| Maïs | *Zea mays* L. | *Panicoideae* |
| Blé | *Triticum aestirum* L. | *Pooideae* |
| | | |
| Linnée boréale | *Linneea borealis* | *Caprifoliaceae* |
| Calypso bulbeux | *Calypso bulbosa* | *Orchidaceae* |
| | | |
| Érable rouge | *Acer rubrum* L. | *Aceraceae* |
| Érable à sucre | *Acer sacharum* Marsh. | *Aceraceae* |
| Bouleau jaune | *Betula alleghaniensis* Briton | *Betulaceae* |
| Bouleau à feuilles cordées | *Betula cordifolia* Regel. | *Betulaceae* |
| Bouleau à papier | *Betula papyrifera* Marsh. | *Betulaceae* |
| Thuya(s) | *Thuja* sp. | *Cupressaceae* |
| Thuya géant | *Thuja plicata* Donn | *Cupressaceae* |
| Hêtre à grandes feuilles | *Fagus grandifolia* Ehrh. | *Fagaceae* |
| Chêne blanc | *Quercus alba* L. | *Fagaceae* |
| Chêne rouge | *Quercus rubra* L. | *Fagaceae* |
| Noyer cendré | *Juglans cinerea* L. | *Juglandaceae* |
| Sassafras officinal | *Sassafras albidum* (Nutt.) Nees | *Lauraceae* |
| Tulipier de Virginie | *Liriodendron tulipifera* L. | *Magnoliaceae* |
| Magnolia acuminé | *Magnolia acuminata* L. | *Magnoliaceae* |
| Nyssa sylvestre | *Nyssa sylvatica* Marsh. | *Nyssaceae* |
| Frêne noir | *Fraxinus nigra* Marsh. | *Oleaceae* |
| Frêne rouge | *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. | *Oleaceae* |
| Sapin baumier | *Abies balsamea* (L.) Mill. | *Pinaceae* |
| Sapin subalpin | *Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt. | *Pinaceae* |
| Mélèze laricin | *Larix decidua* L. | *Pinaceae* |
| Mélèze de l'Ouest | *Larix occidentalis* Nutt. | *Pinaceae* |
| Épinette d'Engelmann | *Picea engelmannii* Parry | *Pinaceae* |
| Épinette blanche | *Picea glauca* (Moench.) Voss. | *Pinaceae* |
| Épinette noire | *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. | *Pinaceae* |
| Épinette rouge | *Picea rubens* Sarg. | *Pinaceae* |
| Épinette de Sitka | *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. | *Pinaceae* |
| Pin gris | *Pinus bankisiana* Lamb. | *Pinaceae* |
| Pin tordu latifolié | *Pinus contorta* Dougl. | *Pinaceae* |
| Pin rouge | *Pinus resinosa* Ait. | *Pinaceae* |
| Pin blanc | *Pinus strobus* L. | *Pinaceae* |
| Pin sylvestre | *Pinus sylvestris* L. | *Pinaceae* |
| Douglas | *Pseudotsuga* Carr. | *Pinaceae* |
| Douglas bleu | *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* (Beissn.) Franco. | *Pinaceae* |

| | | |
|---|---|---|
| Douglas vert | *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* (Mirb.) Franco | *Pinaceae* |
| Pruche du Canada | *Tsuga canadensis* (L.) Carr. | *Pinaceae* |
| Pruche de l'Ouest | *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. | *Pinaceae* |
| Cerisier tardif | *Prunus serotina* Ehrh. | *Rosaceae* |
| Peuplier(s) | *Populous* sp. | *Salicaceae* |
| Peuplier baumier | *Populous balsamifera* L. | *Salicaceae* |
| Peuplier faux-tremble | *Populous tremuloides* Michx. | *Salicaceae* |
| Saule(s) | *Salix* sp. | *Salicaceae* |
| Orme d'Amérique | *Ulmus americana* L. | *Ulmaceae* |
| Tilleul d'Amérique | *Tilia americana* L. | *Tiliaceae* |

**Insectes**

Coléoptères

| | | |
|---|---|---|
| Agrile du bouleau | *Agrillus anxius* Gory | *Buprestidae* |
| Scolyte des cônes du pin blanc | *Conophthorus coniperda* Schwarz | *Scolytidae* |
| Charançon du pin blanc | *Pissodes strobi* Peck | *Curculimidae* |

Lépidoptères

| | | |
|---|---|---|
| Livrée des forêts | *Malacosoma disstria* Nort. | *Lasiocampidae* |
| Papillon tigré du Canada | *Papilio canadensis* R. & J. | *Papilionidae* |
| Tordeuse des bourgeons de l'épinette | *Choristoneura fumiferana* Clem. | *Tortricidae* |
| Tordeuse du pin gris | *Choristoneura pinus* Freeman | *Tortricidae* |

**Amphibiens et reptiles**

| | | |
|---|---|---|
| Grenouille-à-queue | *Ascaphus truei* | *Ascaphidae* |
| Grenouille léopard | *Rana pipiens* | *Ranidae* |
| Phrynosome de Douglas | *Phrynosoma douglassi* | *Iguanidae* |
| Couleuvre agile à ventre jaune | *Coluber constrictor mormon* | *Colubridae* |

**Oiseaux**

Ansériformes

| | | |
|---|---|---|
| Bernache du Canada | *Branta canadensis* | *Anatidae* |
| Cygne trompette | *Cygnus buccinator* | *Anatidae* |

Caprimulgiformes

| | | |
|---|---|---|
| Engoulevent bois-pourri | *Caprimulgus vociferus* | *Caprimulgidae* |

Charadriiformes

| | | |
|---|---|---|
| Petit pingouin | *Alca torda* | *Alcidae* |
| Macareux moine | *Fratercula arctica* | *Alcidae* |
| Macareux huppé | *Fratercula cirrhata* | *Alcidae* |

| | | |
|---|---|---|
| Marmette de Brünnich | *Uria lomvia* | *Alcidae* |
| Marmette de Troïl | *Uria aalge* | *Alcidae* |
| Huîtrier de Bachman | *Haematopus bachmani* | *Haematopodidae* |
| Ciconiiformes | | |
| Grand héron | *Ardea herodias* | *Ardeidae* |
| Héron vert | *Butorides virescens* | *Ardeidae* |
| Aigrette bleue | *Egretta caerulea* | *Ardeidae* |
| Falconiformes | | |
| Buse à queue rousse | *Buteo jamaicensis* | *Accipitridae* |
| Buse à épaulettes | *Buteo lineatus* | *Accipitridae* |
| Pygargue à tête blanche | *Haliaeetus leucocephalus* | *Accipitridae* |
| Balbuzard | *Pandion haliaetus* | *Accipitridae* |
| Faucon pèlerin | *Falco peregrinus* | *Falconidae* |
| Autour des palombes | *Accipiter gentilis* | *Accipitridae* |
| Galliformes | | |
| Gélinotte huppée | *Bonasa umbellus* | *Phasianidae* |
| Colin de Californie | *Callipela californica* | *Phasianidae* |
| Gélinotte des armoises | *Centocercus urophasianus* | *Phasianidae* |
| Colin de Virginie | *Colinus virginianus* | *Phasianidae* |
| Tétras du Canada | *Dendragapus canadensis* | *Phasianidae* |
| Tétras sombre | *Dendragapus obscurus* | *Phasianidae* |
| Lagopède des saules | *Lagopus lagopus* | *Phasianidae* |
| Lagopède à queue blanche | *Lagopus leucurus* | *Phasianidae* |
| Lagopède des rochers | *Lagopus mutus* | *Phasianidae* |
| Colin des montagnes | *Oreortyx pictus* | *Phasianidae* |
| Gaviiformes | | |
| Huart arctique | *Gavia arctica* | *Gaviidae* |
| Huart à collier | *Gavia immer* | *Gaviidae* |
| Huart à gorge rousse | *Gavia stellata* | *Gaviidae* |
| Passériformes | | |
| Geai de Steller | *Cyanocitta stelleri* | *Corvidae* |
| Pie bavarde | *Pica Pica* | *Corvidae* |
| Bruant à queue aiguë | *Ammodramus caudacutus* | *Emberizidae* |
| Paruline de Kirtland | *Dendroica kirtlandii* | *Emberizidae* |
| Cardinal à poitrine rose | *Pheucticus ludovicianus* | *Emberizidae* |
| Mésange à dos marron | *Parus rufescens* | *Paridae* |
| Troglodyte de Caroline | *Thryothorus ludovicianus* | *Toroglodytidae* |

| | | |
|---|---|---|
| Pélécaniformes | | |
| Pélican blanc d'Amérique | *Pelecanus erythrorhynchos* | *Pelecanidae* |
| Cormoran à aigrettes | *Phalacrocorax auritus* | *Phalacrocoracidae* |
| Piciformes | | |
| Pic à tête rouge | *Melanerpes erythrocephalus* | *Picidae* |
| Strigiformes | | |
| Nyctale boréale | *Aegolius funereus* | *Strigidae* |
| Grand-duc d'Amérique | *Bubo virginianus* | *Strigidae* |
| Chouette tachetée | *Strix occidentalis* | *Strigidae* |

**Mammifères**

| | | |
|---|---|---|
| Carnivores | | |
| Loup | *Canis lupus* | *Canidae* |
| Couguar | *Felis concolor* | *Felidae* |
| Lynx du Canada | *Lynx lynx* | *Felidae* |
| Lynx roux | *Lynx rufus* | *Felidae* |
| Loutre de mer | *Enhydra lutris* | *Mustelidae* |
| Carcajou | *Gulo gulo* | *Mustelidae* |
| Loutre de rivière | *Lutra canadensis* | *Mustelidae* |
| Martre d'Amérique | *Martes americana* | *Mustelidae* |
| Martre des pins | *Martes americana abietinodies* | *Mustelidae* |
| Pékan | *Martes pennanti* | *Mustelidae* |
| Putois d'Amérique | *Mephitis mephitis* | *Mustelidae* |
| Furet à pattes noires | *Mustela nigripes* | *Mustelidae* |
| Raton laveur | *Procyon lotor* | *Procyonidae* |
| Grizzli | *Ursus arctos* | *Ursidae* |
| Ours noir | *Urus americanus* | *Ursidae* |
| Chiroptères | | |
| Chauve-souris rousse | *Lasiurus borealis* | *Vespertilionidae* |
| Lagomorphes | | |
| Lièvre d'Amérique | *Lepus americanus* | *Leopridae* |
| Lapin à queue blanche | *Sylvilagus floridanus* | *Leopridae* |
| Rongeurs | | |
| Castor de montagne | *Aplodontia rufa* | *Aplodontidae* |
| Campagnols | Fam. Muridae | *Muridae* |
| Campagnol de Townsend | *Microtus townsendii* | *Muridae* |
| Campagnol à dos roux de Gapper | *Clethrionomys gapperi* | *Muridae* |
| Chien de prairie | *Cynomys pp.* | *Sciuridae* |

| | | |
|---|---|---|
| Marmotte des Rocheuses | *Marmota caligata* | *Sciuridae* |
| Marmotte commune | *Marmota monax* | *Sciuridae* |
| Écureuil gris / noir | *Sciurus carolinesis* | *Sciuridae* |
| <u>Artiodactyles</u> | | |
| Bison des bois | *Bison bison athabascae* | *Bovidae* |
| Chèvre des montagnes | *Oreamnos americanus* | *Bovidae* |
| Mouflon du Nord-Ouest | *Ovis canandensis californiana* | *Bovidae* |
| Mouflon d'Amérique | *Ovis canandensis canadensis* | *Bovidae* |
| Mouflon de Dall | *Ovis dalli* | *Bovidae* |
| Orignal | *Alces alces* | *Cervidae* |
| Wapiti | *Cervus elaphus canadensis* | *Cervidae* |
| Cerf mulet / cerf à queue noire | *Odocoileus hemionus* | *Cervidae* |
| Cerf de Virginie | *Odocoileus virginianus* | *Cervidae* |
| Caribou | *Rangifer taradus* | *Cervidae* |
| Caribou des bois | *Rangifer tarandus caribou* | *Cervidae* |
| Caribou de la toundra | *Rangifer tarandus groenlandicus* | *Cervidae* |
| <u>Pinnipèdes</u> | | |
| Phoque(s) | Ord. Pinnipèdes | *Pinnipedia* |
| Morse | *Odobenus rosmarus* | *Odobenidae* |
| Lion de mer de Steller | *Eumetopias jubata* | *Otariidae* |
| Otarie à fourrure de l'Alaska | *Callorhinus ursinus* | *Otariidae* |
| Phoque commun | *Phoca vitulina* | *Phocidae* |
| <u>Cétacés</u> | | |
| Rorqual bleu | *Balaenoptera musculus* | *Balenopteridae* |
| Globicéphale du Pacifique | *Globicephala macrorhyncha* | *Delphinidae* |
| Épaulard | *Orcinus orca* | *Delphinidae* |
| Baleine grise de Californie | *Eschrichtius robustus* | *Eschrichtidae* |
| Cachalot macrocéphale | *Physeter catodon* | *Physeteridae* |
| Baleine à bec commune | *Hyperoodon amapullatus* | *Ziphiidae* |
| <u>Primates</u> | | |
| Homme | *Homo sapiens* | *Hominidae* |

Sources :

Banfield, A. W. F. (1974). *The Mammals of Canada*, University of Toronto Press, Toronto, 438 p.

Behler, J. L. et F. W. King. (1979). *The Audobon Society Field Guide to North American Reptiles and Amphibians*, Alfred A. Knopf, New York, 718 p.

Boror, D. J. et R. E. White. (1970). *A Field Guide to the Insects of America North of Mexico*, Houghton Mifflin Company, Boston, 404 p.

The Committee on Classification and Nomenclature of the American Ornithologists Union. (1983). *Check-List of North American Birds*, Allen Press Inc., Kansas, 877 p.

Farrar, J. L. (1995). *Les arbres du Canada*. Fides et le Service canadien des forêts avec la collaboration du Groupe Communication Canada, Édition, 502 p.

Spellenberg, R. (1979*). The Audobon Society Field Guide to North American Wildflowers - Western Region*, Alfred A. Knopf, New York, 862 p.

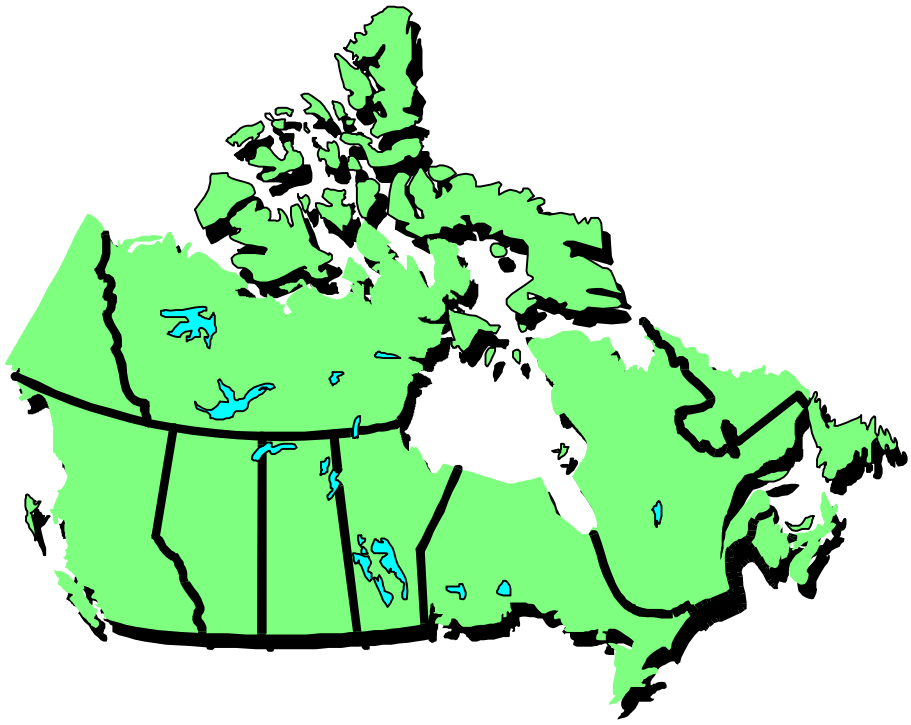
Watson, L. et M. J. Dallwitz. (1992). *The Grass Genera of the World*, Cambridge University Press, Cambridge, 1 038 p.

# CHAPITRE SEPT

# ÉTUDE PAN-CANADIENNE SUR LA VARIABILITE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUES -

# SECTEUR DE L'ÉNERGIE

*Gilles Mercier*[1]



1. Bureau de la recherche et du développement énergétiques, Ressources naturelles Canada, 580, rue Booth, Ottawa (Ont.) K1A 0E4; téléphone : (613) 995-9454; télécopieur : (613) 995-6146; courriel : gmercier@ncan.gc.ca

## RÉSUMÉ

Le Canada est doté d'une variété de ressources énergétiques qui ne sont cependant pas réparties équitablement dans tout le pays. Les produits pétroliers raffinés et le gaz naturel répondent à 60 % de la demande totale en énergie primaire. Le secteur industriel est le principal consommateur d'énergie. Pour ce qui est de la demande régionale, l'Ontario occupe le premier rang. Les combustibles fossiles constituent la plus grande source anthropique de gaz à effet de serre (GES), et le secteur des transports est le principal contributeur de ces émissions. Ce tableau ne devrait pas beaucoup changer d'ici 2020.

La plupart des études citées dans la documentation portent sur des impacts extrapolés à partir des MCG, dont les calculs sont basés sur des concentrations de $CO_2$ dans l'atmosphère deux fois supérieures aux teneurs préindustrielles. Ces modèles supposent que toutes les régions du Canada jouiront de températures plus élevées. Les régions du sud pourraient recevoir des précipitations annuelles moindres tandis que d'autres régions, comme la baie James et le Labrador, en recevraient plus que maintenant.

Même si le secteur de l'énergie n'est pas uniformément sensible aux conditions climatiques, on s'accorde à dire que la production hydroélectrique et la demande d'énergie seraient particulièrement touchées. C'est difficile à prévoir avec confiance en raison du degré d'incertitude des modèles climatiques actuels. Cependant, certaines études indiquent que le potentiel hydroélectrique augmenterait, particulièrement au Labrador et dans le Nord québécois. Ce potentiel serait vraisemblablement réduit en Ontario, dans les Prairies et probablement dans le sud-est de la Colombie-Britannique, en raison de précipitations moindres et de l'évaporation entraînées par le réchauffement. La quantité d'énergie nécessaire pour le chauffage des locaux diminuerait, mais la demande de climatisation dans le sud du Canada annulerait partiellement ces économies d'énergie.

Le changement climatique pourrait influer sur les activités en mer des sociétés pétrolières, en raison de facteurs comme la réduction de la glace de mer et la présence des icebergs. De plus, l'infrastructure de la distribution de l'énergie dans le Nord canadien pourrait souffrir de la fonte du pergélisol. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes pourrait avoir des effets néfastes sur les secteurs de l'exploitation en mer et de la distribution de l'énergie.

Les changements possibles au chapitre de la production, du transport et de l'utilisation de l'énergie nécessitent des mesures d'adaptation si on veut que le secteur soit durable. Il existe peu d'études sur l'adaptation étant donné que la majeure partie de la littérature porte sur l'atténuation. Les rares informations sur l'adaptation n'indiquent pas quelles mesures pourraient être efficaces, ni les coûts de leur mise en oeuvre. Les intervenants croient que l'impact des éventuelles politiques de limitation des GES sur le secteur de l'énergie serait plus important que celui du changement climatique en soi. Ils sont également d'avis que la capacité d'adaptation du secteur est grande, à condition que le changement climatique se fasse graduellement.

## INTRODUCTION

L'énergie joue un rôle important dans la vie de tous les Canadiens. Le chauffage, les transports, les communications, les procédés de fabrication et même les loisirs nécessitent de l'énergie. Un vaste territoire, un climat rigoureux, une population dispersée et des industries énergivores font des Canadiens de grands consommateurs d'énergie. Le secteur de l'énergie est donc devenu un élément majeur de l'économie canadienne. Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) sont principalement dues à la consommation d'énergie. La réponse du Canada au changement climatique peut influer sur la façon dont l'énergie est produite et utilisée dans notre pays. Ce chapitre décrit la nature de ce secteur, définit brièvement son rôle dans les émissions de GES et poursuit sur les impacts possibles du changement climatique.

La plupart des études de la littérature portent sur les impacts possibles, basés sur les résultats des MCG, qui supposent un doublement des teneurs en $CO_2$ dans l'atmosphère. Ainsi, les impacts décrits ci-après sont basés, mais non pas uniformément, sur ce scénario de « $2xCO_2$ ».

### *Description du secteur de l'énergie*

Le Canada, beaucoup plus que tout autre pays, est doté d'une vaste gamme de ressources énergétiques, dont la distribution varie d'une région à l'autre. Le Québec, la Colombie-Britannique, l'Ontario, Terre-Neuve et le Manitoba ont des ressources hydrologiques. Les ressources en combustibles fossiles, comme le gaz naturel, le pétrole brut, les sables bitumineux et le charbon, se trouvent principalement en Alberta, en Colombie-Britannique, en Saskatchewan et en Nouvelle-Écosse. Le nord de la Saskatchewan contient de riches dépôts d'uranium. Il y a des gisements marins de pétrole et de gaz naturel dans les provinces de l'Atlantique ainsi que dans le Nord canadien. De toutes ces sources d'énergie, ce sont les combustibles fossiles qui produisent le plus de GES, particulièrement du $CO_2$, en raison de leur teneur en carbone et de leur grande utilisation.

Après la production, ces ressources sont soit traitées et utilisées localement, soit transportées à l'état brut ou sous forme de produits raffinés dans les autres provinces et à l'étranger. Le Canada exploite quelques-uns des plus longs pipelines du monde et, à titre de nation commerçante, est un exportateur net de toutes les sources d'énergie. Il est aussi un gros exportateur d'énergie contenue dans des produits non énergétiques (c.-à-d. des produits issus de procédés industriels énergivores, comme l'aluminium).

L'utilisation des combustibles fossiles permet la production d'énergie mécanique (p. ex., les véhicules) ou d'électricité (p. ex., les centrales thermiques). Des réactions nucléaires contrôlées, alimentées à l'uranium, produisent de l'électricité. Les sources d'énergie renouvelable à potentiel élevé au Canada sont le vent, le soleil, l'eau et la biomasse; elles produisent de la chaleur et de l'électricité. La biomasse peut également être convertie en carburants.

L'énergie est un élément important de l'économie canadienne. En 1995, la valeur de la production énergétique totale équivalait à 7,2 % du PIB. La valeur des exportations d'énergie totalisait 25 milliards de dollars (9,5 % des exportations totales). Le secteur de l'énergie employait 300 000 personnes, soit 2,6 % de la main-d'œuvre totale. Toutes les régions du

Canada profitent directement ou indirectement de la richesse générée par les activités énergétiques.

Le secteur de l'énergie présente des variations selon les régions, qui sont sujettes à différentes situations d'offre et de demande et à des prix différents pour l'énergie. Le chauffage des locaux, les procédés de fabrication et les activités de transport, qui font appel aux combustibles fossiles, sont particulièrement sensibles aux coûts de l'énergie.

Charbon

Le Canada possède de grandes ressources en charbon, situées en Colombie-Britannique, en Alberta, en Saskatchewan et en Nouvelle-Écosse. Les réserves récupérables de charbon représentent plus de cent fois la production annuelle actuelle. La majeure partie du charbon exploitée en Alberta, en Saskatchewan et en Nouvelle-Écosse sert à la production d'électricité. Étant donné que les mines ne se trouvent pas nécessairement près des marchés, il a fallu établir un important réseau de transport ferroviaire et maritime. La production de la Colombie-Britannique est en grande partie exportée à l'étranger pour la sidérurgie. L'Ontario importe du charbon de l'Alberta et des États-Unis pour la production d'électricité et la fabrication d'acier.

La production de charbon a atteint 75 millions de tonnes en 1995, pour des ventes de 2,4 milliards de dollars. L'Alberta est le principal producteur et utilisateur de charbon. La majeure partie de l'électricité de l'Alberta (83 %), de la Saskatchewan (69 %) et de la Nouvelle-Écosse (74 %) est produite avec du charbon.

Gaz naturel

La principale source de gaz naturel est le bassin sédimentaire de l'Ouest canadien, mais l'exploitation des champs au large des Maritimes (p. ex., à l'île de Sable, en Nouvelle-Écosse) devrait commencer en 2001. Le reste des réserves classiques prouvées dans le bassin sédimentaire de l'Ouest est estimé à 1,9 billion de mètres cubes (Bmc), ce qui correspond à environ 12,5 ans d'approvisionnement au rythme de production actuel. Les réserves de gaz des régions non classiques (régions pionnières, filons houillers) sont estimées à 1,3 Bmc. Les ressources totales en gaz pourraient être beaucoup plus élevées. Le gaz naturel à l'état brut comprend de la vapeur d'eau, des éléments hydrocarbonés plus lourds que le méthane et des polluants, comme le sulfure d'hydrogène et le dioxyde de carbone, qui doivent être éliminés afin de répondre aux normes de qualité requises pour le transport par gazoduc. Un important réseau de ces gazoducs distribue le gaz naturel aux clients dans tout le Canada et aux États-Unis. Le gaz naturel est surtout utilisé pour le chauffage et les procédés de fabrication. Selon Ressources naturelles Canada, sa demande totale devrait augmenter, passant de 148 milliards de mètres cubes (Mmc) en 1995 à 195 Mmc en 2020, la demande interne étant à peu près égale aux exportations. De tous les combustibles fossiles, le gaz naturel est celui qui a la plus faible teneur en carbone.

**Tableau 7.1 Réserves de pétrole brut**

| | Réserves établies restantes (Mmc) |
|---|---|
| Régions classiques | 590 |
| Régions pionnières | 191 |
| Sables bitumineux | 575 |

Source : Office national de l'énergie, 1994

Pétrole brut et équivalents

Cette catégorie inclut le pétrole brut léger et lourd, les alcanes à cinq carbones et plus (éléments hydrocarbonés), le bitume (à l'exclusion des sables bitumineux) et le pétrole brut synthétique (obtenu lors de la valorisation du bitume brut à partir des sables bitumineux). Les provinces de l'Ouest, particulièrement l'Alberta, en sont les principaux producteurs. La production du grand champ d'Hibernia, au large de la côte est, devrait débuter en 1998 et on prévoit exploiter d'autres champs, comme Terra Nova. Le tableau 7.1 illustre les réserves établies restantes au Canada. Les régions classiques ont un rapport réserve/production d'environ 8 ans, rapport qui a été maintenu pendant quelques années, à mesure qu'on découvrait de nouvelles réserves classiques de pétrole.

Il y a d'importants gisements de sables bitumineux dans le nord de l'Alberta et de la Saskatchewan. Ces sables sont extraits, le pétrole en est séparé et ensuite enrichi pour en faire du pétrole brut synthétique. Les sables bitumineux peuvent aussi être séparés *in situ*. Tout procédé de séparation nécessite de l'eau. Les sables bitumineux remplaceront la production de pétrole classique au cours des prochaines décennies, et les exportations canadiennes nettes de pétrole devraient augmenter lentement au cours des dix années à venir.

Comme pour le gaz naturel, une importante infrastructure de pipelines, principalement dans le sud du pays, transporte le pétrole brut jusqu'aux raffineries en Colombie-Britannique, en Alberta, en Saskatchewan, en Ontario et au Québec, et aux États-Unis. Dans le Nord, un pipeline va de Norman Wells (T.N.-O.) à Edmonton. Cependant, un pipeline sera converti en 1998 pour transporter de Montréal à Sarnia du pétrole passant par Portland (Maine).

Le pétrole brut est la plus importante source d'énergie au Canada, répondant à 30 % de la demande d'énergie primaire. L'Alberta contribue pour 78 % à la production totale, qui atteignait 312 000 $m^3$ par jour en 1995. Même si le Canada est un exportateur net de pétrole, il en importe pour des raisons de géographie et de qualité, principalement de la mer du Nord, afin de répondre aux besoins du Québec et des provinces de l'Atlantique.

Production d'électricité

L'électricité est principalement produite à partir de l'eau, du charbon et de combustible nucléaire. La capacité installée totale est de plus de 115 gigawatts (GW), dont 56 % en hydroélectricité. En 1995, les compagnies d'électricité provinciales possédaient environ 83 % de la capacité installée totale. La production totale a atteint 535 gigawatts-heures (GW/h), dont 43 étaient exportés aux États-Unis. Le commerce interprovincial s'élevait à 42 GW/h en 1995.

Au Québec, en Colombie-Britannique, à Terre-Neuve et au Manitoba, il s'agit principalement d'hydroélectricité. La plupart des centrales hydroélectriques se servent de barrages, mais il y a de

nombreuses installations au fil de l'eau le long du Saint-Laurent et dans les Prairies. Le Canada était le plus grand producteur d'hydroélectricité du monde en 1996.

En Alberta, en Nouvelle-Écosse et en Saskatchewan, le charbon est le principal combustible. Les centrales au charbon sont généralement situées à proximité des mines de charbon, afin de réduire les coûts de transport. Toutefois, l'Ontario est une exception. Ontario Hydro doit importer du charbon des États-Unis et des provinces de l'Ouest, parce qu'elle ne possède aucune ressource houillère récupérable.

Le Canada possède 22 réacteurs nucléaires, la plupart en Ontario. À l'instar des centrales thermiques, les réacteurs se trouvent à proximité des rivières. Des problèmes techniques temporaires ont obligé Ontario Hydro et New-Brunswick Power à fermer quelques-uns de leurs réacteurs pour effectuer des réparations, ce qui a donné lieu à une utilisation de combustibles fossiles plus grande que prévue pour produire de l'électricité et, de là, à des émissions accrues de $CO_2$.

Sources d'énergie renouvelable

Les sources d'énergie renouvelable comprennent les petites centrales hydroélectriques (définies ici comme celles de capacité inférieure à 20 mégawatts), le vent, le soleil (cellules photovoltaïques, systèmes de chauffage solaire actif) et la biomasse. Les grandes centrales hydroélectriques sont également considérées comme une source d'énergie renouvelable. Dans le présent rapport, ces dernières sont traitées séparément en raison de leur importance relative comparativement aux autres sources d'énergie renouvelable. À l'exception de la biomasse, la production d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable n'émet pas de GES. La biomasse est généralement considérée comme neutre en ce qui a trait aux émissions nettes de $CO_2$, étant donné que le carbone qu'elle contient provient de l'atmosphère. Ces ressources, ainsi que l'efficacité et l'efficience des technologies des énergies renouvelables, dépendent beaucoup des conditions météorologiques et climatiques.

Les petites installations hydroélectriques se trouvent principalement sur les petits cours d'eau. Ce sont souvent des centrales au fil de l'eau mais, dans certains cas, on doit également construire un petit barrage. Ces centrales ne représentent qu'une infime partie de la capacité hydroélectrique installée au Canada. La plupart de ces installations appartiennent à des intérêts privés. On s'intéresse de plus en plus à ce type de centrales parce que l'on peut utiliser les petits cours d'eau pour produire de l'électricité et que la construction en est plus rapide. Même si les coûts d'immobilisation par unité de capacité sont plus élevés que pour les grandes centrales hydroélectriques, les petites installations nécessitent des investissements initiaux moindres.

Exception faite des grandes centrales hydroélectriques, la biomasse est la plus importante source d'énergie renouvelable. Dans ce contexte, on y inclut les déchets de biomasse provenant des pâtes et papiers, les résidus forestiers et des scieries, les déchets solides municipaux, les céréales et les résidus de culture. La bioénergie, sous la forme de chaleur et d'électricité, représente environ 6 % de l'offre totale d'énergie primaire au Canada; c'est l'industrie des pâtes et papiers qui est le principal producteur et utilisateur de bioénergie. Le bois représente également environ 7 % du chauffage domestique primaire. On prévoit une plus grande utilisation de la biomasse;

c'est pourquoi on fait des recherches afin de développer des plantations d'arbres et des pratiques de gestion forestière.

L'énergie éolienne et l'énergie solaire jouent un rôle marginal dans l'offre d'énergie au Canada, même si le pays possède d'importantes ressources éoliennes et solaires. Le principal obstacle au déploiement d'installations éoliennes et solaires est le coût relativement bas de l'énergie de sources classiques. Néanmoins, dans tout le pays, on s'intéresse de plus en plus aux parcs d'éoliennes.

Toute contrainte sur les combustibles fossiles, qui pourrait être imposée à la suite de limites fixées sur les GES, pourrait augmenter la demande en ressources d'énergie renouvelable.

***Demande d'énergie***

Le secteur industriel est le plus gros utilisateur d'énergie au Canada, avec 43 % de la demande d'énergie finale totale. Les pâtes et papiers, la sidérurgie, la fonte et l'affinage des métaux, la pétrochimie et l'industrie chimique sont les principaux consommateurs, et le gaz naturel et les produits pétroliers raffinés comblent plus de 56 % de la demande. Le secteur des transports (25 % de la demande finale totale) est en grande partie concentré dans les véhicules routiers et utilise des combustibles fossiles (surtout de l'essence et du diesel). Le secteur résidentiel utilise l'énergie pour, en ordre d'importance, le chauffage des locaux et de l'eau, l'éclairage, les électroménagers et la climatisation des locaux. Le gaz naturel et l'électricité répondent à plus de 80 % de cette demande. Le secteur commercial (édifices commerciaux et publics) utilise principalement le gaz naturel et l'électricité pour le chauffage des locaux, l'éclairage et les moteurs auxiliaires.

La demande d'énergie primaire totale devrait augmenter d'environ 23 % d'ici 2020. Pour toutes les sources d'énergie, sauf le nucléaire, elle sera à la hausse au cours des 25 prochaines années. Le secteur industriel demeurera le plus important utilisateur d'énergie au Canada. La demande d'énergie dans le secteur résidentiel devrait diminuer en raison d'une croissance plus lente du parc immobilier, de la mise en oeuvre d'initiatives encourageant les propriétaires à consommer moins d'énergie et plus efficacement, et du remplacement des vieux électroménagers par des nouveaux, moins énergivores. La part de la demande d'énergie du secteur commercial demeurera inchangée, tandis que celle du secteur industriel augmentera de 38 % d'ici 2020. La part du secteur des transports restera la même et, d'après les prévisions actuelles, la demande finale ne montre qu'un léger changement dans l'utilisation des différents carburants.

À l'échelle régionale, l'Ontario est le plus gros consommateur d'énergie, et les projections indiquent qu'elle conservera cette position au cours des 25 prochaines années (tableau 7.2). La demande totale d'énergie primaire y est satisfaite principalement par les produits pétroliers raffinés, l'électricité d'origine nucléaire et le gaz naturel. D'ici 2020, le gaz naturel et les produits pétroliers raffinés demeureront les principales sources d'énergie, répondant à 61 % de la demande primaire (comparativement à 55 % en 1995).

**Tableau 7.2 Demande d'énergie primaire par région (en petajoules)**

| Régions | 1995 | 2020 | Croissance annuelle (%) |
|---|---|---|---|
| Atlantique | 810 | 1 045 | 1,02 |
| Québec | 1 766 | 2 132 | 0,76 |
| Ontario | 3 789 | 4 608 | 0,79 |
| Prairies | 3 402 | 4 007 | 0,66 |
| Colombie-Britannique et Territoires | 1 207 | 1 657 | 1,28 |
| **Canada** | **10 974** | **13 449** | **0,82** |

Source : Ressources naturelles Canada, 1997

Environ 53 % de la demande d'énergie primaire dans les provinces de l'Atlantique est satisfaite par les produits pétroliers raffinés, et cette part ne devrait pas beaucoup changer à l'avenir. Au Québec, les produits pétroliers raffinés et l'hydroélectricité répondent à 73 % de la demande, et on ne prévoit pas de changement d'ici 2020. Dans les Prairies, le gaz naturel satisfait 50 % de la demande d'énergie primaire et il devrait continuer à être la source énergétique préférée au cours de la période de prévision. Enfin, les produits pétroliers raffinés et le gaz naturel dominent les autres sources d'énergie (satisfaisant 64 % de la demande) en Colombie-Britannique. Les projections ne prévoient pas non plus de changement majeur de la demande dans cette province.

Comme on peut le voir, les combustibles fossiles satisfont la majeure partie de la demande énergétique canadienne. Cette situation devrait demeurer inchangée au cours des prochaines décennies.

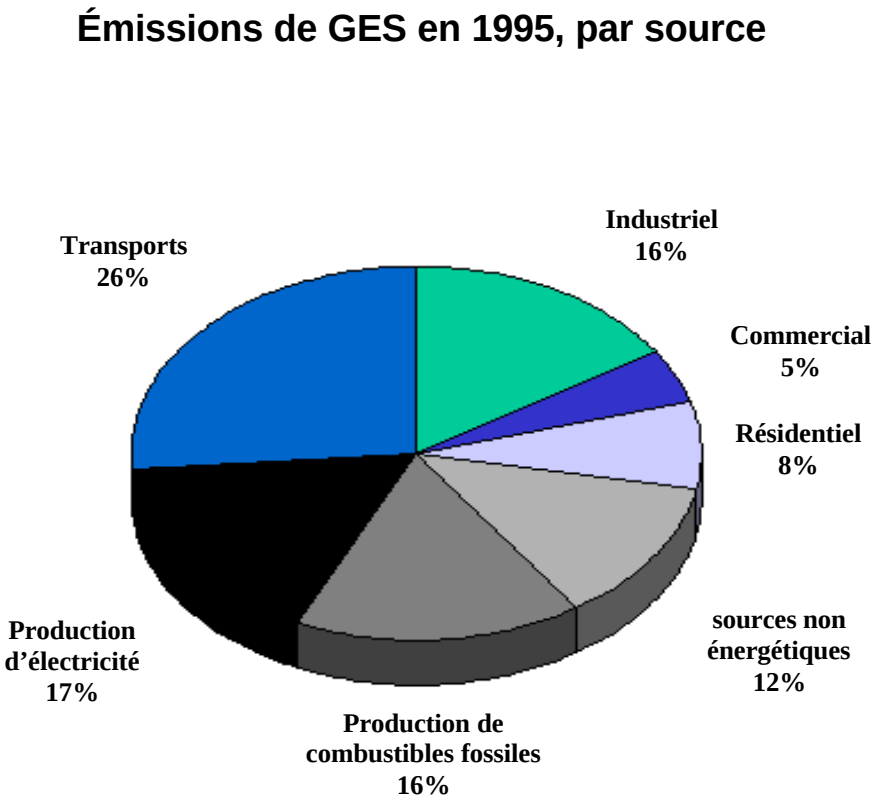
### *Émissions de GES du secteur de l'énergie*

Les émissions canadiennes totales de GES ont atteint 618,5 mégatonnes (MT) d'équivalent $CO_2$ en 1995. Les émissions attribuables au secteur de l'énergie totalisaient 542 MT au cours de cette année, et le $CO_2$ était le principal GES (81 %) (Canada's Energy Outlook, 1996-2010, Ressources naturelles Canada, 1997). Les produits pétroliers raffinés ont été la première source de GES; le gaz naturel et le charbon, respectivement deuxième et troisième. Comme l'illustre la figure 7.1, les transports ont été les principaux émetteurs de GES (en équivalent $CO_2$), suivis de la production d'électricité et de la production de combustibles fossiles.

Les émissions attribuables au secteur d'utilisation finale devraient atteindre 416 mégatonnes en 2020, soit une croissance d'environ 23 %. Le secteur des transports devrait demeurer le principal producteur de GES durant cette période (50 % du total du secteur des utilisations finales).

Environ 80 % de la production d'électricité ne rejette pas de GES au Canada, étant donné qu'elle provient de centrales hydrauliques et nucléaires. Le reste est attribuable au charbon. Comme l'illustre la figure 7.1, la production d'électricité représente 17 % des émissions, dont 14 % est dû au charbon. Les émissions produites par la production d'électricité à partir de combustibles fossiles (charbon, mazout et gaz naturel) devraient passer de 103 MT en 1995 à 147 en 2020 (19 % des émissions totales). Le charbon demeure le principal contributeur de GES du secteur de l'électricité durant la période de prévision.

**Figure 7.1 Émissions de GES en 1995, par source**




Les émissions attribuables à la production de combustibles fossiles comprennent principalement le $CO_2$ et le méthane, et sont dues en majeure partie à l'utilisation de ces combustibles lors de l'exploration, du développement, de la production et du transport du pétrole brut (y compris les sables bitumineux), du gaz naturel et du charbon. Leur contribution pourrait diminuer légèrement, passant de 102 mégatonnes en 1995 à 100 en 2020.

Dans l'ensemble, les émissions de GES attribuables au secteur de l'énergie devraient augmenter de 22 % au Canada d'ici 2020. Les projections ci-desssus comprennent les avantages des initiatives (règlements, R-D, incitatifs financiers et information) qui visent à réduire ces émissions.

## IMPACTS SUR LE SECTEUR DE L'ÉNERGIE ET ADAPTATION DE CE DERNIER

Il n'est pas facile d'évaluer les impacts du changement climatique sur le secteur de l'énergie. Ce dernier est en effet très complexe. La complexité est également une caractéristique de l'analyse du changement climatique. Les principaux facteurs dont il faut tenir compte sont : la nature, l'importance et la distribution régionale des sources d'énergie; la demande prévisible de ces sources d'énergie; la nature et l'intensité des changements climatiques; la sensibilité de l'offre et de la demande d'énergie vis-à-vis du changement climatique. Toutefois, il est rarement possible, à l'heure actuelle, de quantifier ces effets avec certitude.

La présente section du rapport décrira les impacts possibles du changement climatique sur les principales composantes du secteur de l'énergie : la production, la distribution et l'utilisation finale, telles que traitées dans la littérature. La section présente également les mesures d'adaptation qui pourraient être prises afin de maintenir la viabililté du secteur de l'énergie.

### *Production d'énergie*

Combustibles fossiles

Le changement climatique ne devrait pas influer sur la production terrestre de pétrole brut, de gaz naturel et de charbon, à l'exception des précipitations plus abondantes en région montagneuse, qui pourraient donner lieu à une érosion accrue et à des glissements de terrain plus fréquents qui, à leur tour, pourraient endommager les mines de charbon et l'infrastructure de production des hydrocarbures. Des températures plus élevées pourraient causer la fonte partielle du pergélisol discontinu. Les installations de production dans ces régions nécessiteraient alors des techniques de conception spéciales pour prévenir les dommages causés par l'instabilité du sol.

Les activités pétrolières et gazières en mer, qui devraient prendre de l'importance dans les Maritimes, sont sensibles aux icebergs, à la glace de mer et aux tempêtes. Les modèles ont prédit que des températures plus élevées entraîneraient le retrait de la limite sud des glaces et une formation moindre d'icebergs, même s'il peut y avoir de courtes périodes favorables à une présence accrue d'icebergs (Brown, 1993). Les résultats des MCG actuels ne sont pas considérés comme fiables pour juger de la gravité future des conditions d'icebergs.

Dans l'ensemble, il pourrait y avoir diminution des interruptions des activités d'exploration et d'exploitation causées par les icebergs. Les changements dans la fréquence des tempêtes pourraient aussi avoir un impact sur les opérations des plates-formes en mer. On ne sait cependant toujours pas si les épisodes météorologiques extrêmes seront plus fréquents et plus intenses. La hauteur des plates-formes au-dessus du niveau de l'eau pourrait être accrue en réponse à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation de la hauteur des vagues. Du fait de ces changements, il faudra revoir les normes de construction et de sécurité pour les structures en mer et les installations côtières connexes.

Il y a des ressources en hydrocarbures océaniques dans les régions arctiques mais, malgré les projets d'exploration menés par les pétrolières depuis plusieurs années, la production n'a été que marginale en raison du bas prix de l'énergie et des coûts élevés du développement. Les scénarios du climat prévoient des températures plus élevées dans cette région, ce qui entraînerait une réduction de la quantité de glace de mer et l'amincissement du couvert glaciaire donc, un allongement de la saison d'eau libre (de 60 jours actuellement à 150 jours). L'industrie pétrolière considère cela comme un impact positif étant donné que les exigences de conception des structures océaniques seraient réduites (moins de glace) et pourraient se traduire par une diminution des coûts de construction. Selon Croasdale (1993), le coût du forage pourrait diminuer de 30 à 50 % (en supposant l'utilisation de navires de forage). Toutefois, des températures plus élevées auront également des effets négatifs. Une élévation du niveau de la mer et des vagues plus hautes nécessiteront l'établissement de normes plus strictes pour la

conception des installations océaniques et côtières. De plus, l'utilisation de plates-formes de glace pourrait devenir plus difficile en raison de l'élévation des températures et de l'allongement de la saison d'eau libre.

Électricité

Comme nous l'avons déjà expliqué, l'électricité est produite principalement par de grosses centrales hydroélectriques, nucléaires et thermiques au charbon et, à un degré moindre, par des centrales alimentées au gaz naturel. Les petites centrales hydroélectriques, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la biomasse sont de petits producteurs d'électricité au Canada.

*L'hydroélectricité* (petites et grandes installations), source majeure de l'énergie au Québec, en Colombie-Britannique, à Terre-Neuve et au Manitoba, dépend des approvisionnements en eau, qui sont régis par les précipitations et l'évaporation. Les impacts du scénario du doublement du $CO_2$ sur les précipitations (pluie et neige) et les températures au Canada pourraient varier d'une région à l'autre.

Selon les scénarios des MCG, on estime que le ruissellement serait réduit de 20 % dans les Maritimes, tandis qu'il augmenterait de 35 % au Labrador. Les modèles prévoient une augmentation des précipitations (jusqu'à 20 % selon certains modèles) et un ruissellement printanier hâtif dans le Nord québécois, mais les précipitations demeureraient inchangées dans le Sud. Cela entraînerait une augmentation de la production énergétique d'environ 15 % dans la région de la baie James. Le doublement du $CO_2$ aurait pour effet d'abaisser le niveau de l'eau dans les Grands Lacs de 0,5 à 1,0 m, entraînant une perte de 20 % de la capacité hydroélectrique et donc des pertes financières de 111 millions de dollars pour Ontario Hydro. Toutefois, la réduction de la demande d'énergie liée au scénario de doublement du $CO_2$ se traduirait par des économies d'environ 172 à 204 millions (en dollars canadiens de 1984), soit des économies nettes de 61 à 92 millions de dollars par année (Sanderson, 1987). Les glaciers des Rocheuses sont une importante source d'eau pour les rivières des Prairies. Les scénarios prévoient que les glaciers des Rocheuses orientales fondront considérablement à la suite du réchauffement, augmentant le débit des cours d'eau au cours des 20 à 30 prochaines années. Cependant, le volume d'eau diminuerait à plus long terme en raison de la réduction de la masse glaciaire. Ces changements du débit des cours d'eau et la fréquence accrue des sécheresses en été entraîneraient éventuellement une réduction de la production hydroélectrique. Une plus grande demande d'eau pour l'irrigation dans les Prairies aggraverait la situation, mais le Manitoba serait moins touché, ses ressources en eau étant plus abondantes. Selon les modèles climatiques, les températures annuelles monteraient dans toutes les régions de la Colombie-Britannique, alors que les précipitations augmenteraient dans toutes les régions au printemps, mais varieraient d'une région à l'autre durant les autres saisons. Les glaciers du sud de la Colombie-Britannique pourraient donc fondre considérablement. Ces changements signifieraient une baisse de la production hydroélectrique dans le sud-est de la province.

Les impacts subis par les grosses installations hydroélectriques s'appliqueraient également aux petites. Les centrales au fil de l'eau seraient certainement touchées par les variations du niveau et du débit de l'eau. Les gestionnaires en hydroélectricité pourraient réagir au changement climatique en gérant mieux les réservoirs, ce qui empêcherait les inondations dans les régions où on prévoit une augmentation du ruissellement. La gestion efficace du stockage de l'eau dans les

régions où les précipitations auront été réduites pourrait optimiser la production d'électricité tout en permettant de gérer les autres besoins de ressources en eau (p. ex., la navigation, l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable, les procédés industriels). Les modèles utilisés pour prédire les changements hydrologiques et gérer leurs impacts pourraient jouer un plus grand rôle à l'avenir. Raban (1991) propose l'élaboration d'un plan d'urgence afin de gérer les pénuries d'énergie, d'améliorer l'échange d'information sur les questions de changement climatique et d'évaluer les impacts des divers scénarios de changement climatique sur les bassins hydrographiques.

La production d'*énergie solaire (filière photovoltaïque) et éolienne* est très sensible aux changements des conditions météorologiques. Le changement climatique pourrait se traduire par des régimes de vent modifiés, des tempêtes plus fréquentes et des changements dans la couverture nuageuse. On ne connaît cependant pas bien leur importance et leur distribution régionale au Canada. On devra probablement adapter la conception, le choix de l'emplacement et l'installation des équipements solaires et éoliens aux nouvelles conditions climatiques. Par exemple, il faudra peut-être construire les éoliennes selon des normes plus élevées pour qu'elles puissent résister à des tempêtes beaucoup plus fortes.

Des températures plus élevées et des précipitations moindres pourraient réduire la quantité et la qualité de l'eau nécessaire à des fins de refroidissement dans les *centrales thermiques et nucléaires* et, par conséquent, l'efficacité de ces dernières. Les nouvelles technologies de combustion comme les systèmes à cycles combinés nécessitent moins d'eau de refroidissement. L'impact des fluctuations des approvisionnements en eau pourrait être atténué si ces technologies plus récentes pouvaient remplacer les systèmes classiques.

Certaines centrales thermiques de l'Ontario utilisent du charbon importé par bateau des États-Unis. L'abaissement du niveau de l'eau dans les Grands Lacs pourrait avoir un effet négatif sur l'approvisionnement économique de charbon de ces installations, parce que la charge maximale transportée par les navires qui naviguent sur ces lacs devra être réduite en raison de la limitation de la hauteur d'eau dans certains chenaux. De plus, une certaine quantité de charbon devra probablement être acheminée via un mode de transport plus cher, le chemin de fer.

Dans l'ensemble, ces changements pourraient obliger à modifier l'utilisation relative des divers combustibles au Canada, ainsi qu'à augmenter les transferts d'électricité d'une région à l'autre. En supposant que la demande d'électricité reste constante, une baisse de la capacité hydroélectrique attribuable à une diminution des approvisionnements en eau dans les régions du sud du Canada pourrait se traduire par une plus grande dépendance vis-à-vis des centrales thermiques et des réacteurs nucléaires actuels, et des importations additionnelles depuis les autres provinces et, possiblement, les États-Unis. Cependant, il est difficile pour l'instant de quantifier ces importations, spécialement dans un contexte d'interconnexion croissante et de la tendance prévue à déréglementer l'industrie de l'énergie.

Autres formes de sources d'énergie renouvelable

La biomasse et, à un degré moindre, les systèmes solaires actifs produisent de l'énergie pour chauffer les locaux. Les impacts du changement climatique sur le photovoltaïque s'appliquent

également aux technologies solaires actives. L'utilisation de la biomasse pour le chauffage des locaux diminuerait à la suite du réchauffement climatique. Si la forêt boréale canadienne devait se déplacer vers le Nord, la biomasse pourrait être utilisée dans de nouvelles régions du Nord canadien.

La biomasse peut aussi être convertie en biocombustibles comme le méthanol et l'éthanol. Au Canada, la production d'éthanol à partir de cultures (principalement le maïs) augmente. On fait également des recherches sur la production d'éthanol par traitement enzymatique des matières cellulosiques. La compétitivité des biocombustibles dépend beaucoup du prix de la matière première. Or, la disponibilité de la matière première agricole pourrait être modifiée par les températures plus élevées et l'évaporation accrue attribuables au changement climatique, dans le sud du Canada.

### *Transmission et transport de l'énergie*

Il existe deux principaux réseaux de transport de l'énergie au Canada : les lignes de transmission de l'électricité et les pipelines. Le transport ferroviaire est traité dans un autre chapitre de l'ÉPC.

#### Lignes de transport

L'infrastructure de transport de l'électricité pourrait avoir à supporter des conditions météorologiques plus extrêmes dans un contexte de changement climatique. Les lignes de transport, qui pourraient être exposées à des températures plus élevées dans le sud du pays, connaîtraient une augmentation des pertes de transmission, la résistance de la transmission augmentant proportionnellement à la température. Dans des conditions extrêmes, les lignes seraient aussi plus sujettes au fléchissement. Le givrage des lignes de transport serait alors plus fréquent dans les régions septentrionales en raison de l'humidité accrue au cours d'hivers plus chauds et du plus grand nombre de jours au cours desquels la température est propice à la formation de givre (Raban, 1991). Les lignes de transport pourraient également être perturbées dans les régions montagneuses parce que des précipitations plus abondantes pourraient accroître l'érosion et le nombre de glissements de terrain. En outre, les tempêtes plus fréquentes prévues dans un scénario de changement climatique augmenteraient la probabilité d'endommagement des lignes de transport. Dans l'ensemble, ces lignes deviendraient moins fiables, spécialement sur de longues distances, et il faudrait renforcer l'infrastructure.

#### Pipelines

Les dommages causés aux pipelines surviendraient principalement dans les zones de pergélisol discontinu susceptibles de fondre à la suite du réchauffement attribuable au changement climatique. L'oléoduc de Norman Wells, qui longe la vallée du Mackenzie dans les Territoires du Nord-Ouest, est construit dans un tel milieu. La construction de nouveaux pipelines et de nouvelles lignes de transport dans les zones de pergélisol discontinu pourrait devenir plus complexe à l'avenir. À un degré moindre, il pourrait y avoir un plus grand risque de ruptures de pipelines aux traversées de cours d'eau. Des débits plus élevés des rivières pourraient entraîner une érosion accrue de leurs berges et de leurs lits et déterrer certains pipelines qui les traversent. La conception des structures et les méthodes de construction devront donc être mieux adaptées à ces conditions.

Autres considérations

Certaines collectivités éloignées ne sont pas branchées au réseau de distribution et dépendent de génératrices électriques autonomes au diesel. L'approvisionnement en diesel dépend des routes d'hiver et du transport maritime, spécialement dans le Nord canadien. Les températures plus élevées prévues dans un scénario de changement climatique pourraient raccourcir la période d'utilisation des routes d'hiver. Réciproquement, le transport maritime pourrait profiter d'une plus longue saison d'eau libre. Enfin, comme nous l'avons déjà expliqué, l'Est canadien dépend beaucoup du pétrole brut importé de la mer du Nord. Des conditions de glace moins difficiles dans l'Atlantique canadien, découlant du changement climatique, faciliteraient la circulation des pétroliers. Cependant, cet avantage pourrait être annulé en partie par des tempêtes plus fréquentes.

***Demande et utilisation d'énergie***

Ce secteur dépend beaucoup des conditions climatiques, et le changement climatique pourrait probablement y avoir des impacts très prononcés. La consommation régionale d'énergie pourrait être considérablement modifiée, influant par le fait même sur le comportement futur des Canadiens à cet égard.

Secteurs résidentiel et commercial

Le principal impact serait sur la demande en énergie pour le chauffage des locaux et le refroidissement (p. ex., conditionnement de l'air, réfrigération des aliments, etc.). Les modèles prédisent un adoucissement des températures annuelles dans toutes les régions au pays. Cela signifierait une baisse de la demande de chauffage des locaux (environ 30 % dans le sud du Canada et 20 % dans le nord), mais une augmentation des besoins de refroidissement (p.ex., 7 % en Ontario), soit des économies d'énergie nettes. Ces changements de la demande pourraient également entraîner un transfert d'une certaine quantité d'énergie nécessaire pour le chauffage des locaux de l'hiver à l'été et, ainsi, un meilleur équilibre des charges annuelles sur les réseaux d'électricité et d'approvisionnement en gaz.

Les deux principales sources d'énergie utilisées par les deux secteurs sont l'électricité et le gaz naturel. D'après une étude faite par Findlay et Spicer (1988), la consommation résidentielle individuelle de gaz naturel au Canada diminuerait de 10 à 20 % d'ici 2031. Cette baisse serait particulièrement forte en Ontario et au Québec (entre 14 et 25 %).

La conception et les codes de construction pourraient éventuellement être modifiés afin de répondre à la nouvelle demande en matière de chauffage et de refroidissement.

Secteur industriel

Les impacts se feraient particulièrement sentir sur les industries à forte consommation d'électricité (p. ex., production d'aluminium) dans les régions où la capacité électrique est appelée à diminuer dans un scénario de changement climatique (p. ex., sud de l'Ontario). On n'a cependant pas trouvé de données sur des impacts précis dans la littérature.

Secteur des transports

Les études sur le transport indiquent que des températures plus élevées auraient une certaine influence sur l'utilisation de carburant au Canada. Par exemple, le temps de réchauffement des moteurs serait réduit, d'où une plus grande efficacité énergétique. Cependant, des températures plus élevées pourraient entraîner une plus grande utilisation de la climatisation dans les véhicules et une plus grande demande en ce qui a trait à la réfrigération des aliments dans l'industrie du camionnage. Les changements dans les conditions météorologiques dans un scénario de changement climatique toucheraient également les opérations des transports. Par exemple, plus de neige, de smog, de brouillard, de pluie ou de glace pourraient ralentir la circulation. On n'a cependant pas trouvé d'évaluation de ce type d'impact dans la littérature. De plus, des températures plus élevées dans le sud du Canada se traduiraient par une baisse de la consommation de carburant pour l'entretien des routes en hiver et pour les brise-glaces dans les voies maritimes. Le chapitre (8), sur les transports, donne de plus amples détails sur les impacts du changement climatique sur ce secteur .

Dans l'ensemble, la hausse des températures, les changements dans les précipitations et les modifications des conditions météorologiques pourraient avoir des impacts sur la demande d'énergie à divers niveaux partout au pays. L'utilisation actuelle de l'énergie pourrait certainement changer, mais on ne connaît pas très bien l'importance de ce changement. Le tableau 7.3 donne quelques estimations de l'impact du changement climatique sur la demande d'énergie au Canada. Comme on pourra s'en rendre compte, les données sont rares et divergentes.

***Conclusion quant aux impacts sur le secteur de l'énergie et l'adaptation de ce secteur***

Diverses études ont cherché à évaluer les répercussions du changement climatique sur le secteur de l'énergie au Canada. Cependant, la majeure partie de l'information disponible est de nature qualitative. L'annexe A résume l'information disponible et donne la liste des impacts possibles.

**Tableau 7.3 Estimations des impacts du changement climatique sur la demande d'énergie**

| Régions | Impacts sur la demande d'énergie | Références |
|---|---|---|
| Atlantique | N.D. | |
| Québec | -25 % pour le chauffage (Montréal)<br>-35 % pour le chauffage (Québec) | Singh, 1988 |
| Ontario | -2 à -3 % | Sanderson, 1987 |
| Prairies | -0,5 % de la consommation totale d'électricité<br>-20 % de la demande de gaz naturel<br>+20 % des besoins en énergie pour l'irrigation | Goos, 1989 |
| Colombie-Britannique | N.D. | |

Étant donné que les mesures d'atténuation ne seraient probablement pas suffisantes pour limiter les émissions de GES, les pays mettent également au point des mesures d'adaptation afin de réagir aux impacts du changement climatique. On reconnaît qu'une application volontaire de mesures d'adaptation pourrait être de plus en plus importante à l'avenir. Toutefois, l'adaptation ne remplacera pas le besoin d'atténuation. La capacité d'adaptation du secteur canadien de l'énergie est élevée, dans la mesure où le changement climatique se fait graduellement.

## LACUNES NÉCESSITANT PLUS DE RECHERCHES

Comparativement aux écosystèmes et à l'agriculture, il y a peu d'études sur les impacts et sur l'adaptation du secteur de l'énergie au changement climatique (GIEC, 1996), Jusqu'à présent, la plupart des recherches ont porté sur les mesures d'atténuation. Cela peut refléter la perception selon laquelle le secteur de l'énergie est moins vulnérable aux variations du climat, mais plus sensible aux répercussions politiques du changement climatique (p. ex., taxe sur le hydrocarbures) et à ce qui se passe au Moyen-Orient. Cependant, cet examen de la littérature montre que le changement climatique pourrait avoir un impact sur le secteur canadien de l'énergie, spécialement la production d'hydroélectricité et les changements futurs de la demande d'énergie.

Les lacunes suivantes ont été relevées au cours de la présente étude :

a) *L'information sur les impacts possibles* est manquante dans toutes les parties du secteur de l'énergie. Il est important de connaître les impacts possibles avant d'élaborer des mesures d'adaptation et d'atténuation. L'estimation de la distribution et de l'intensité régionales du changement climatique nécessite une recherche plus approfondie. C'est particulièrement le cas pour le Canada en raison de sa diversité climatique et de l'impact direct du climat sur la façon de produire, de transporter et d'utiliser l'énergie.

b) *L'absence de mesures d'adaptation*. Par le passé, l'accent était mis sur les mesures d'atténuation. Les mesures d'adaptation ont été élaborées et mises en oeuvre de façon spontanée et volontaire. Ces mesures pourraient jouer un plus grand rôle à l'avenir, parce que l'atténuation n'est pas la seule solution au changement climatique.

c) *Les estimations des coûts des impacts et des mesures d'adaptation* sont rares. Il faut évaluer les pertes et les gains pour le Canada attribuables au changement climatique afin de mettre l'accent sur les mesures qui auraient les meilleurs avantages pour l'environnement tout en assurant la viabilité du secteur de l'énergie. De plus, ces estimations sont essentielles pour la conception de stratégies d'adaptation efficaces.

d) Il faut s'attaquer à *l'absence d'intégration* entre les secteurs. La plupart des études n'abordent qu'un seul secteur. Néanmoins, il existe une certaine interdépendance entre ceux-ci. Un impact négatif pour le secteur de l'énergie pourrait être positif pour un autre secteur. De plus, une mesure d'adaptation prise pour un élément donné d'un secteur peut avoir des impacts négatifs sur d'autres éléments de ce même secteur. Il faudra adopter une démarche plus intégrée des questions technologiques, sociales et économiques dans les futures études sur le changement climatique.

**REMERCIEMENTS**

L'auteur aimerait remercier les personnes suivantes pour leurs commentaires et leurs suggestions :

Bill Hume
Météorologiste principal
Environnement physique
Office national de l'énergie
311 - 6th Avenue S.W.
Calgary (AB) T2P 3H2
Tél. : (403) 299-3925
Téléc. : (403) 292-4192
Courriel : humebill@neb.gc.ca

Anthony Kingsley[1]
Conseiller principal
Commerce et R-D internationale
Association canadienne de l'électricité
1120-1155, rue Metcalfe
Montréal (QC) H3B 2V6
Tél : (514) 866-6121
Téléc. : (514) 866-1880
Courriel : kingsley@canalect.ca

John Legg
Conseiller scientifique principal
Bureau de la recherche et du développement énergétiques
Ressources naturelles Canada
580, rue Booth
Ottawa (ON) K1A 0E4
Tél. : (613) 995-0968
Téléc. : (613) 995-6146
Courriel : jlegg@nrcan.gc.ca

Jeff Passmore[2]
Passmore Associates International
600-255, rue Albert
Ottawa (ON) K1P 6A9
Tél. : (613) 566-7005
Téléc. : (613) 233-9527

John H. Walsh
Conseiller en énergie
19, av. Lambton
Ottawa (ON) K1M 0Z6
Tél. : (613) 745-6279
Courriel : dwalsh@magi.com

Gary A. Webster
Gestionnaire, environnement et santé
Association canadienne des producteurs pétroliers
2100, 350 - 7th Avenue S.W.
Calgary (AB) T2P 3N9
Tél. : (403) 267-1146
Téléc. : (403) 266-3214
Courriel : webster@capp.geis.com

[1] M. Kingsley ne travaille plus à l'Association canadienne de l'électricité.

[2] M. Passmore est maintenant vice-président exécutif pour IOGEN Corporation, 400 Hunt Club Road, à Ottawa (Ontario). Son numéro de téléphone est le (613) 733-9830.

## RÉFÉRENCES

Brown, R. D. (1993). *Incidence du réchauffement planétaire sur les régimes des glaces de mer et des icebergs de la côte est du Canada pendant les prochaines 50 à 100 années*, résumé préparé par Arctic Sciences Limited, *Sommaire du changement climatique, SCC 93-03*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 15 p.

Conseil du Programme climatologique canadien (1991). *Le changement climatique et ses répercussions sur le Canada : le point de vue scientifique, Sommaire du changement climatique, SCC 91-01*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 30 p.

Conseil du Programme climatologique canadien (1993). *Climate Change and Canadian Impacts: 1993 Update on Scientific Perspectives*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 21 p.

Cohen, S. J. (1997). *Mackenzie Basin Impact Study, Final Report - Summary of Results*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 20 p.

Croasdale, K.R. (1993). « Climate Change Impacts on Northern Offshore Petroleum Operation », dans *Impacts of Climate Change on Resource Management in the North*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper no. 16, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 175-184

Environnement Canada (1994). *Canada's National Report on Climate Change*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 144 p.

Environnement Canada, (1995). *Canada's National Action Program on Climate Change - 1995*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 42 p.

Findlay B.F. et Spicer, L. (1988). Impact of Climatic Warming on Residential Consumption of Natural Gas in Canada, *Climatological Bulletin*, 22(2): 3-13.

Goos, T.O. (1989). *Les effets du climat et du changement climatique sur l'économie de l'Alberta*. Résumé d'un rapport de Acres International Limited : *The Environment/Economy Link in Alberta and the Implications under Climate Change, Sommaire du changement climatique, SCC 89-05*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 9 p.

Hartmann, H. C. (1990). « Climate Change Impacts on Great Lakes Levels and Flows: Energy and Transportation Implications », dans *Proceedings of the International Symposium/Workshop « Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources »*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 239-245.

Hengeveld, H. (1991). « Climate Change and Energy Demand », dans *Proceedings of the Symposium on the Impacts of Climatic Change and Variability on the Great Plains*, G. Wall

(dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 325-328.

Hengeveld, H. (1995). *Understanding Atmospheric Change: A Survey of the Background Science and Implications of Climate Change and Ozone Depletion*, 2e éd., A State of the Environment Report, SOE No. 95-2, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 68 p.

IBI Group (1990). *Les répercussions du changement climatique à long terme sur le transport au Canada, Sommaire du changement climatique, SCC 90-02*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 8 p.

ICF Incorporated (1989). *Potential Impacts of Climate Change on Electric Utilities*, EPRI Report EN-6429, Palo Alto (Ca.), 120 p.

IPCC Working Group II (1996). *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, dans Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H. (dir.), Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (Mass.), 879 p.

Jackson, C. I. (1992). *Répercussions du réchauffement planétaire sur la politique du gouvernement canadien, Sommaire du changement climatique, SCC 92-01*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 17 p.

McGillivray, D.G., Agnew, T.A., McKay, G.A., Pilkington, G.R., Hill, M.C. (1993). *Incidences du changement climatique sur le régime glaciel de la mer de Beaufort : répercussions sur l'industrie pétrolière dans l'Arctique, Sommaire du changement climatique, SCC 93-01*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 17 p.

National Energy Board (1994). *Canadian Energy: Supply and Demand 1993-2010*, National Energy Board, Ottawa (Ont.), 339 p.

Natural Resources Canada (1997). *Canada's Energy Outlook, 1996 – 2020*, Natural Resources Canada, Ottawa (Ont.), 124 p.

Natural Resources Canada (1996). *Electric Power in Canada*, Canadian Electricity Association and Natural Resources Canada, Ottawa (Ont.), 174 p.

Raban, R. R. (1991). « Climatic Change and Hydroelectric Production », dans *Proceedings of the Symposium on the Impacts of Climatic Change and Variability on the Great Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 309-315.

Reinhardt, R. (1991). « Working Group Report on Energy, Transportation and Recreation », dans *Proceedings of the Symposium on the Impacts of Climatic Change and Variability on the Great*

*Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 291-293.

Sanderson, M. (1987). *Répercussions d'un changement de climat sur la navigation et la production d'électricité dans les Grands Lacs, Sommaire du changement climatique, SCC 87-03*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 20 p.

Saulesleja, A. (1989). « Possible Impacts of Climate Change in Eastern Canada », dans *Proceedings of a Workshop of Climate Change and Water Resources*, R. G. Lawford et T. J. Marta (dir.), Technical Workshop Series No. 9, National Hydrology Research Centre, Environnement Canada, Saskatoon (Sask.), p. 21-22.

Singh, B. (1988). *Les répercussions d'un changement climatique sur les ressources naturelles du Québec, Sommaire du changement climatique, SCC 88-08*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 11 p.

Smit, B. (1991). « Potential Future Impacts of Climatic Change in the Great Plains », dans *Proceedings of the Symposium on the Impacts of Climatic Change and Variability on the Great Plains*, G. Wall (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 12, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 81-91.

## ANNEXE 7A Production d'énergie - Impacts et adaptation

| Régions | Combustibles fossiles | Hydroélectricité | Autres énergies renouvelables |
|---|---|---|---|
| Atlantique | - Moins de perturbation des opérations en mer : réduction de la glace de mer et des icebergs.<br>- Perturbations plus fréquentes : tempêtes.<br>- La hauteur des plates-formes doit s'adapter à la hausse du niveau de l'eau et des vagues.<br>- Normes de construction et de sécurité révisées. | - Potentiel hydroélectrique réduit en raison de la diminution du ruissellement, sauf au Labrador où le potentiel devrait augmenter. | - Changements dans le régime des vents, la nébulosité et les tempêtes.<br>- Modification de l'approvisionnement en biomasse due aux changements dans la diversité régionale.<br>- Utilisation réduite de la biomasse pour le chauffage : températures plus élevées. |
| Québec | N.D. | - Potentiel accru dans les régions septentrionales. | - Comme ci-dessus. |
| Ontario | N.D. | - Comme au Québec. | - Comme ci-dessus. |
| Prairies | - Aucun impact majeur. | - Potentiel de production hydroélectrique réduit dans la plupart des régions. Le Manitoba pourrait être la province la moins touchée. | - Comme ci-dessus. |
| Colombie-Britannique | - Augmentation de l'importance de l'érosion et de la fréquence des glissements de terrain pourrait avoir un impact sur l'extraction du charbon et la production d'hydrocarbures. | - Précipitations accrues au printemps. Variations régionales le reste de l'année. | - Comme ci-dessus. |
| Territoires du Nord-Ouest/Arctique | - Comme pour l'Atlantique.<br>- Les plates-formes de glace subiront des impacts négatifs. | - Précipitations accrues. | - Changements dans le régime des vents, la nébulosité et les tempêtes.<br>- Modification de l'approvisionnement en biomasse due aux changements dans la diversité régionale. |

## ANNEXE 7B Transport de l'énergie - Impacts et adaptation

| Régions | Lignes de transport | Pipelines |
|---|---|---|
| Régions septentrionales | - Givrage accru des lignes.<br>- Plus de dommages causés par les tempêtes. | - Plus grandes possibilités de perturbations causées par la fonte du pergélisol.<br>- L'érosion accrue des cours d'eau pourrait causer des dommages aux pipelines aux traversées de rivières. |
| Régions méridionales | - Perte de capacité de transmission.<br>- Affaissement accru des lignes.<br>- Pannes plus fréquentes dues aux tempêtes. | - Aucun impact majeur. |
| Régions montagneuses | - Les précipitations accrues pourraient causer des glissements de terrain plus fréquents. | - Les précipitations accrues pourraient augmenter la fréquence des glissements de terrain et l'importance de l'érosion. |

## ANNEXE 7C Demande et utilisation d'énergie - Impacts et adaptation

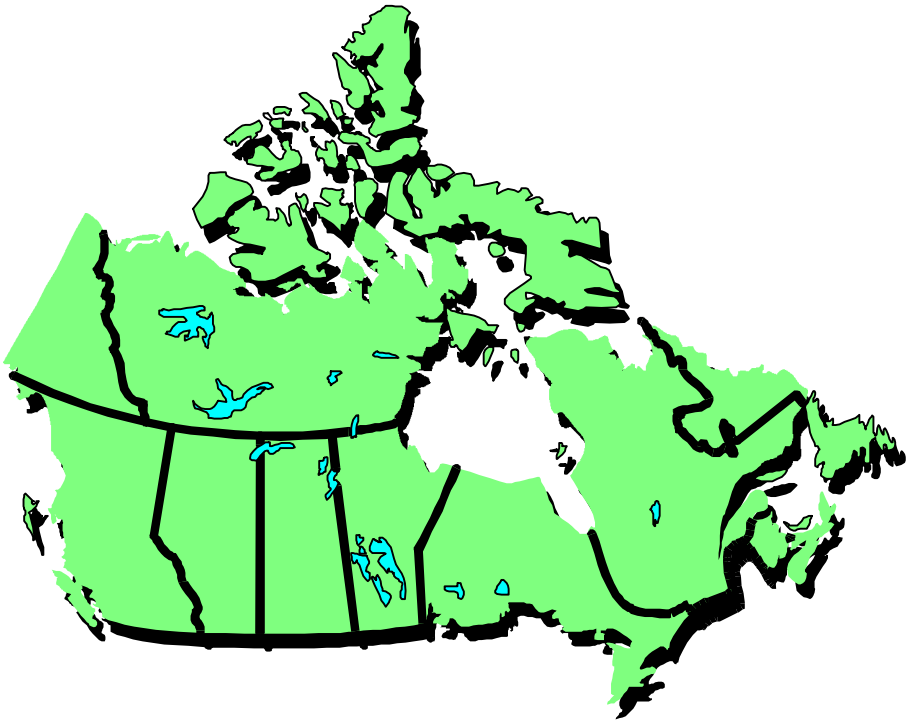
| Régions | Résidentiel et commercial | Industriel | Transports |
|---|---|---|---|
| Atlantique | - Demande réduite pour le chauffage.<br>- Demande accrue pour le refroidissement dans les régions méridionales. | - Aucun impact majeur. | - Réduction du temps de réchauffement du moteur.<br>- Utilisation accrue de la climatisation.<br>- Diminution de la demande d'énergie pour l'enlèvement de la neige.<br>- Utilisation moindre des brise-glaces. |
| Québec | - Comme ci-dessus. | - Impacts possibles sur les industries grandes consommatrices d'électricité. | - Comme ci-dessus. |
| Ontario | - Comme ci-dessus. | - Impacts possibles sur les industries grandes consommatrices d'électricité. | - Comme ci-dessus. |
| Prairies | - Comme ci-dessus. | - Aucun impact majeur. | - Réduction du temps de réchauffement du moteur.<br>- Utilisation accrue de la climatisation.<br>- Diminution de la demande d'énergie pour l'enlèvement de la neige. |
| Colombie - Britannique | - Comme ci-dessus. | - Aucun impact majeur. | - Comme pour la région de l'Atlantique. |
| Territoires du Nord-Ouest/Arctique | - Demande réduite pour le chauffage. | - Aucun impact. | - Besoin réduit de brise-glaces.<br>- Plus courte saison de route d'hiver (suppose l'utilisation de moyens de transport plus coûteux). |

# CHAPITRE HUIT

# ÉTUDE PAN-CANADIENNE SUR LA VARIABILITÉ ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUES -

# SECTEUR DU TRANSPORT

*Jean Andrey*[1] *et Adam Snow*[2]



1. Département de géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.) N2L 3G1, téléphone : (519) 888-4567 poste 3629, télécopieur : (519) 746-0658, courriel : jandrey@fes.uwaterloo.ca
2. Département de géographie, Université de Waterloo (Ont.) N2L 3G1, courriel : ajdsnow@fes.uwaterloo.ca

## RESUME

1. Le transport joue un rôle important pour le bien-être économique et social des Canadiens. Les industries du transport représentent environ 4 % (23 milliards de dollars) du produit intérieur brut (PIB) du Canada et occupent 4 % (440 000) des travailleurs canadiens. Cependant, l'importance des activités de transport dans leur ensemble est encore plus grande à cause du fort volume d'activités de transport privées, surtout avec les voitures et les camions. Dans son rapport de 1992, la Commission royale sur le transport des voyageurs au Canada a estimé que les dépenses de transport atteignaient 103 milliards de dollars en 1989, soit une moyenne *per capita* de 3 800 dollars, dont environ les quatre cinquièmes étaient consacrés au transport routier.

2. Pour l'étude du changement climatique et de ses impacts sur le transport, les chercheurs canadiens se sont concentrés sur les effets directs du changement climatique pour ce qui est : a) du transport maritime dans le réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent, b) de l'infrastructure côtière et c) des routes du nord. Pour chacun de ces secteurs, le changement climatique devrait avoir des impacts négatifs. De plus faibles niveaux d'eau devraient se traduire par d'importantes incidences négatives (des millions de dollars par année) sur la navigation commerciale dans le réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Dans les régions côtières, et spécialement dans le Canada atlantique, une hausse du niveau de la mer devrait entraîner des dommages aux routes, aux voies ferrées et aux infrastructures portuaires évalués à des milliards de dollars. Dans les régions du nord, comme le bassin du Mackenzie, des changements dans les températures et/ou dans les précipitations devraient réduire la période de gel des « routes de glace », ce qui devrait augmenter les coûts du transport en hiver.

3. Très peu d'études ont porté sur les impacts du changement climatique sur les modes de transport dominants du Canada, c.-à-d. les voyages en automobile, le transport routier, ferroviaire et aérien, et la navigation côtière. On note toutefois une très bonne perception des effets sur le transport des régimes climatiques actuels. Les informations pertinentes sont présentées notamment dans les périodiques scientifiques, les comptes rendus des conférences, les rapports techniques, les normes, les manuels d'utilisation, ainsi que dans les transcriptions d'enquêtes et d'autres audiences et dans les rapports de divers médias. Selon les perceptions actuelles, on s'attend à ce que les coûts des transports par voie terrestre soient réduits par le changement climatique à cause d'hivers plus courts ou plus doux. Les opérations côtières pourraient-elles aussi profiter de plus hauts niveaux d'eau et d'une couverture glacielle réduite. Les effets sur le transport aérien n'ont pas été déterminés. On doit obtenir des analyses d'impact plus détaillées pour chacun de ces secteurs. Ces études doivent être faites dans le contexte de l'adaptation humaine et avoir pour objectif ultime l'accroissement de la capacité d'adaptation du secteur du transport du Canada. On doit accorder plus d'attention à la sécurité, une question reliée aussi bien au transport qu'à la santé. Enfin, on doit aussi accorder plus d'attention aux événements climatiques extrêmes et à leur potentiel de perturbation.

4. À l'échelle nationale, l'impact net du changement climatique sur le transport devrait être positif à cause des avantages d'hivers moins rigoureux, sur le plan de l'exploitation, pour les

réseaux de transport terrestres. Toutefois, le degré de vulnérabilité et les impacts possibles varient selon les régions; les plus vulnérables sont notamment la région de la voie maritime des Grands Lacs et du Saint-Laurent, les régions côtières du Canada atlantique et du sud de la Colombie-Britannique, les terres montagneuses de l'ouest du Canada et d'autres régions où peuvent survenir des glissements de terrain, ainsi que les peuplements du nord.

5. Des changements dans les structures régionales des économies et des peuplements dus au climat auraient des répercussions sur les besoins de services de transport. Toutefois, ce que nous savons actuellement ne constitue pas une base suffisante pour évaluer la nature et l'importance de ces répercussions. Des recherches multisectorielles intégrées sont nécessaires pour pallier cette lacune.

6. Le climat est un facteur important pour les activités de transport. Les industries du transport, les organismes du gouvernement et le public canadien investissent des efforts et des sommes d'argent considérables (des centaines de millions de dollars) afin de diminuer les risques de retards ou d'accidents causés par les intempéries. Pourtant, il n'existe pas de bilan d'ensemble pour ces mesures, et l'efficacité de nombre d'entre elles reste en grande partie inconnue. On ressent de façon plus pressante le besoin d'un plus grand nombre d'études sur l'adaptation humaine, mettant l'accent sur les opérations et l'évaluation.

## INTRODUCTION

On sait que les transports motorisés comptent pour une partie significative des émissions de gaz à effet de serre (GES). Au Canada, le transport représente environ 30 % de l'utilisation de l'énergie et une proportion semblable des émissions de dioxyde de carbone ($CO_2$) (Nix, 1995; Liu, 1997). Il n'est donc pas surprenant que ce thème ait dominé les discussions sur les interactions entre le transport et le climat dans les milieux tant scientifiques que politiques. Ce chapitre ne porte toutefois pas sur cette question, mais plutôt sur les impacts du climat, et surtout sur ceux du changement climatique touchant l'infrastructure et les activités de transport au Canada.

Tous les moyens de transport sont sensibles, à divers degrés, aux conditions météorologiques et au climat (Perry et Symons, 1991; Thornes, 1992). En effet, au début du siècle, les services météorologiques canadiens étaient concentrés au ministère fédéral des Transports. Selon Jackson (1990, 95), malgré une collaboration de longue date entre les entreprises de transport et les services météorologiques, on ignore encore le coût du climat actuel sur les opérations de transport. On ne dispose pas non plus d'évaluations quantitatives globales de l'ordre de grandeur des coûts possibles dus au changement climatique dans le secteur du transport au Canada.

On note toutefois plusieurs études qualitatives sommaires décrivant les points vulnérables reliés au changement climatique des activités associées au transport, ainsi que plusieurs analyses quantitatives concernant l'impact du changement climatique sur certaines infrastructures et activités de transport. Notre objectif est de faire une synthèse critique de ces études afin de présenter un résumé de l'état actuel des connaissances. Ce rapport est surtout basé sur des articles et des rapports qui ont été repérés à l'aide de recherches dans les bibliothèques informatisées et sur Internet, ainsi que par des communications téléphoniques ou des contacts avec des personnes

des milieux du gouvernement, de l'industrie et des universités. On y trouve aussi des exemples d'événements ou de programmes qui illustrent les points vulnérables et les possibilités d'adaptation aux conditions atmosphériques des activités de transport au Canada.

Le reste du rapport est divisé en quatre sections. La section 3 présente un aperçu détaillé des caractéristiques des activités de transport au Canada. La section 4 résume l'état actuel des connaissances concernant les points vulnérables et les impacts du transport sur le changement climatique. Dans la section 5, on discute brièvement de l'adaptation; cependant, dans de nombreux cas, la distinction entre les impacts et l'adaptation n'est pas nette, étant donné que les impacts sont dus au moins en partie à des réponses et à des choix humains face à des occasions et à des risques qui se sont présentés; on identifie les lacunes au niveau des connaissances dans tout le document. Enfin, la bibliographie est présentée à la section 6.

On doit aussi noter que le thème des transports est discuté dans les volumes régionaux de l'ÉPC, ainsi que dans certains rapports sectoriels et intersectoriels portant notamment sur l'eau (la navigation), l'énergie (les pipelines), le milieu bâti (les infrastructures) et le commerce.

## SECTEUR DU TRANSPORT CANADIEN

### *Transport et économie canadienne*

Les 30 millions d'habitants du Canada sont dispersés sur une vaste aire géographique de près de 10 millions de $km^2$, s'étendant sur 5 500 km, entre les océans Atlantique et Pacifique. Un réseau de transport efficace est visiblement nécessaire pour relier les centres de peuplement, ainsi que pour stimuler le développement économique et promouvoir le bien-être de la société. L'importance du transport a été reconnue dans un certain nombre de déclarations concernant le développement du pays. Selon Hoyle (1993, 148), le transport a joué un rôle vital dans le développement agricole des provinces des Prairies, dans l'émergence de l'axe du Saint-Laurent comme grande artère de transport reliant le Canada à l'Atlantique Nord, dans l'exploitation des ressources minérales et aquatiques du Bouclier canadien et, enfin, dans l'intégration du cœur industriel du Canada, en Ontario et au Québec. Aujourd'hui, ce réseau de transport continue à jouer le rôle d'infrastructure indispensable au soutien des activités économiques du pays. Il rend possible la libre circulation des personnes et des biens dans tout le pays et facilite le transfert des produits canadiens vers les marchés internationaux.

Si l'on utilise les sources de données habituelles, la nature privée de nombreuses activités de transport et l'inclusion des activités de transport comme sous-éléments d'autres industries rendent difficile une évaluation exacte de l'importance des transports dans l'économie canadienne. En 1992, afin de présenter une vue d'ensemble du secteur, la Commission royale sur le transport des voyageurs au Canada a examiné les ressources consacrées aux diverses activités de transport. Elle a estimé que 103,1 milliards de dollars avaient été consacrés aux transports en 1989, dont plus de la moitié pour les voitures particulières et 12,9 % pour d'autres types de transport privé, surtout le camionnage pour compte propre (tableau 8.1). Le camionnage pour compte d'autrui (de tous types) représentait un tiers du total et les dépenses gouvernementales, le reste. On a utilisé un facteur de correction pour éliminer le double compte des tarifs et des taxes cachés qui

**Tableau 8.1 Ressources consacrées au transport** (milliards de dollars)

| Secteur | Montant |
|---|---|
| **Camionnage pour compte d'autrui** | 34,5 |
| **- route** | 15,3 |
| **-voie ferrée** | 7,4 |
| **-air** | 7,9 |
| **-eau** | 2,0 |
| **-pipeline** | 1,8 |
| **Voitures particulières** | 58,8 |
| **Autres transports privés** | 13,3 |
| **Dépenses gouvernementales** | 12,5 |
| **Facteur de correction** | -15,9 |
| **Total** | 103,1 |

**Source :** Commission royale, 1992, 4-6

sont habituellement consignés sous plus d'une rubrique, notamment les frais des permis des véhicules et les taxes sur les carburants. L'ampleur des dépenses des Canadiens pour les transports indique assez bien l'importance de ce secteur, et les diverses catégories du tableau 8.1 montrent les nombreux intervenants : les millions de conducteurs, les dizaines de milliers d'entreprises et les milliers d'organismes et ministères gouvernementaux.

Pour établir l'importance économique des industries du transport, on utilise habituellement deux paramètres, l'emploi et le PIB. Les industries du transport du Canada employaient près de 439 000 personnes en 1995, ce qui représente 4,1 % de l'effectif total des travailleurs (tableau 8.2). Ce pointage tient compte des principales « industries du transport »selon la définition des documents gouvernementaux, c.-à-d. les compagnies d'autobus, les exploitants de transport public, les compagnies de camionnage, les lignes aériennes, les compagnies ferroviaires et les compagnies maritimes, ainsi que de plusieurs autres activités connexes. Comme le montre le tableau 8.2, les emplois reliés au transport ont accusé une baisse au début des années 90, surtout dans le cas des chemins de fer et des autobus.

**Tableau 8.2 Emplois dans le secteur du transport** (milliers)

| Secteur | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Air**[1] | 52,6 | 55,8 | 56,3 | 53,5 | 52,8 | 50,5 | 52,9 | 53,0 |
| **Autobus**[2] | 32,7 | 30,6 | 31,2 | 32,1 | 35,6 | 34,8 | 21,0 | n. d. |
| **Ferroviaire** [3] | 77,8 | 74,9 | 69,1 | 64,8 | 62,5 | 59,6 | 57,3 | 53,2 |
| **Maritime**[4] | 23,8 | 23,7 | 23,9 | 23,5 | 22,9 | 22,9 | 22,1 | n. d. |
| **Urbain**[5] | 36,8 | 38,8 | 39,1 | 39,5 | 38,3 | 38,1 | 37,8 | 38,9 |
| **Camionnage**[6] | 97,9 | 98,1 | n. d. | 93,0 | 93,3 | 96,5 | 100,6 | n. d. |
| **Total**[7] | 462,5 | 472,1 | 472,7 | 441,6 | 433,4 | 431,1 | 434,6 | 430,8 |
| **Pipelines**[7] | n. d. | n. d. | n. d. | n. d. | 8,9 | 8,3 | 8,1 | 7,9 |

**Sources :** Statistique Canada,[1]catalogue n°51-206, [2]catalogue n°53-215, [3]catalogue n°53-216, [4]catalogue n°54-205, [5]catalogue n°53-215, [6]catalogue n°53-222, [7]catalogue n°72-002

Le PIB décrit la valeur ajoutée par chacune des industries. C'est une mesure de la valeur des ventes moins le coût des biens achetés pour faciliter ces ventes. En 1995, les transports (y compris les pipelines) représentaient 4,3 % du PIB du Canada (tableau 8.3). L'importance des industries du transport dans l'économie du pays est demeurée très stable au cours des dernières décennies, bien que l'importance relative des différents secteurs du transport ait changé avec le temps, principalement à cause de la restructuration économique et de la réforme de la réglementation. Pour le transport des marchandises, les parts du camionnage et du transport ferroviaire se sont accrues, surtout au cours des trois dernières années. Les revenus des pipelines ont également accusé une forte croissance, bien que, si l'on inclut les ventes de combustibles dans les calculs de PIB touchant les pipelines, il soit possible de surestimer l'importance de l'expansion dans ce secteur. Toutefois, aux gains des secteurs du camionnage, du transport ferroviaire et du transport par les pipelines correspondent des diminutions dans ceux du transport aérien, du transport maritime, des autobus interurbains et du transport urbain.

Habituellement, le niveau des activités de transport au Canada est étroitement relié aux tendances de l'ensemble de l'économie. Toutefois, l'industrie est de plus en plus influencée par les exigences spécialisées des entreprises et des personnes pour le transport des marchandises et des voyageurs. Selon Hoyle (1993, 148), l'intensité de la compétition a augmenté et l'efficacité des déplacements s'est accrue. En outre, selon lui, les transporteurs de marchandises doivent fournir des services de transport rentables pour les bonnes combinaisons de charges et de distances (catalogue de Statistique Canada n° 11-509, 1994, 96) et, par conséquent, ces transporteurs ont dû assouplir leurs services afin de mieux répondre aux besoins des expéditeurs (catalogue de Statistique Canada n° 53-222, 1994, 7). Pour ces raisons, le camionnage occupe une place d'importance croissante dans le transport des marchandises. La commodité et le gain de temps sont également des facteurs importants pour le transport des voyageurs, comme le montrent les taux d'utilisation massifs des voitures particulières par les Canadiens pour leurs déplacements personnels.

### *Transport routier*

Le transport routier est le principal mode de transport au Canada, comme en fait foi l'important réseau routier en place. Ce réseau n'a pas connu de croissance significative au cours des 20 dernières années (tableaux 8.4 et 8.5), sauf dans les zones des nouveaux ensembles résidentiels et commerciaux. Cependant, il s'est amélioré et, maintenant, 35 % du réseau est pavé. La plupart des déplacements utilisent de telles routes, comme le montre le tableau 8.6.

**Tableau 8.3 Produit intérieur brut** (milliards de dollars, en dollars constants de 1986)

| Secteur | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Air** | 3,0 | 2,8 | 2,5 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 2,1 |
| **Ferroviaire** | 4,2 | 4,0 | 3,9 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,8 | 4,8 |
| **Maritime** | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,1 |
| **Urbain** | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |
| **Camionnage** | 6,4 | 6,4 | 6,3 | 6,1 | 6,2 | 6,5 | 7,0 | 7,1 |
| **Total** | 19,2 | 18,9 | 18,4 | 17,2 | 17,4 | 17,6 | 18,6 | 19,0 |
| **Pipelines** | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,4 | 3,7 | 3,9 | 4,1 |
| **Tous les secteurs** | 492,5 | 505,0 | 503,6 | 494,5 | 497,6 | 510,6 | 531,5 | 542,0 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 15-001

**Tableau 8.4 Réseau routier, 1975**
(km, en équivalent de route à deux voies)

| Type de routes | Longueur |
|---|---|
| **Routes pavées** | 240 375 |
| **Routes gravelées** | 458 766 |
| **Chemins de terre** | 172 253 |
| **Total** | 872 021 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 53-201

**Tableau 8.5 Réseau routier, 1995**
(km, en équivalent de route à deux voies)

| Type de routes | Longueur |
|---|---|
| **Routes pavées** | 317 919 |
| **Routes à surface traitée** | 69 292 |
| **Routes gravelées** | 442 407 |
| **Chemins de terre** | 66 829 |
| **Routes d'hiver** | 4 134 |
| **Autres types** | 1 321 |
| **Total** | 901 903 |

**Source :** Nix, 1995, 9

**Tableau 8.6 Débit routier, 1990**
(Débit routier quotidien, moyenne annuelle)

| Type de routes | DJMA |
|---|---|
| **Autoroutes** | 12 000 |
| **Routes pavées (urbaines)** | 4 000 |
| **Routes pavées (rurales)** | |
| **- achalandées - 10%** | 6 000 |
| **- à débit moyen - 30%** | 3 000 |
| **- à faible débit - 60%** | 700 |
| **Routes à surface traitée** | 350 |
| **Routes gravelées** | 50 |
| **Chemins de terre** | 10 |

**Source :** Nix *et al.*, 1992, 973

Les Canadiens dépensent plus pour leurs infrastructures routières que pour tout autre mode de transport, soit environ 11 milliards de dollars en 1993. La responsabilité du réseau est partagée entre les trois paliers de gouvernement. En 1995, 2 % du réseau routier relevait du gouvernement fédéral, 25 % des gouvernements provinciaux ou territoriaux et le reste (73 %), des autorités locales, notamment des municipalités (tableau 8.7). En 1993, la moitié des dépenses totales ont été faites par les administrations locales (Nix, 1995).

**Tableau 8.7 Réseau routier, 1995, par province/territoire et par compétence**
(centaines de km)

| | T.-N. | Î-P-É. | N.-É. | N.-B. | Qué. | Ont. | Man. | Sask. | Alb. | C.-B. | T.N.-O. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fédéral** | 2 | <1 | 3 | 2 | 5 | 23 | 17 | 32 | 40 | 21 | 5 |
| **Provincial/ territorial** | 87 | 51 | 234 | 185 | 293 | 285 | 216 | 262 | 183 | 423 | 90 |
| **Local** | 41 | 5 | 23 | 31 | 900 | 1 371 | 645 | 1 725 | 1 592 | 214 | 11 |
| **Total** | 131 | 57 | 260 | 219 | 1 199 | 1 679 | 879 | 2 019 | 1 814 | 657 | 106 |

**Source :** Nix, 1995, 8-9

### *L'automobile*

En 1995, on comptait sur les routes canadiennes 17 millions de véhicules immatriculés (tableau 8.8), dont 77,3 % (13,1 millions) étaient des voitures particulières. Les automobiles sont le principal mode de transport des voyageurs au Canada et elles servent à environ 93 % de tous les déplacements de voyageurs (catalogue de Statistique Canada n° 53-215, 1994). Parce que les automobiles appartiennent à des particuliers, et à cause de la fréquence très élevée et de la courte distance de la plupart de leurs déplacements, on ne dispose pas de statistiques détaillées sur les déplacements des particuliers et on doit utiliser des méthodes d'évaluation. La Commission royale sur le transport des voyageurs au Canada (1992) a utilisé des données historiques sur les ventes d'essence, des estimations de la partie de ces ventes correspondant à la consommation des voitures, ainsi que des estimations de la consommation de carburant en fonction de la distance afin d'obtenir des valeurs annuelles estimées en voyageurs/km (V/km). On a ensuite multiplié ces valeurs par des taux d'occupation estimés afin d'obtenir des valeurs estimées en V/km pour les automobiles. On a ainsi déterminé que l'utilisation des voitures représentait 363,1 milliards de V/km en 1994, soit une augmentation de plus de 12 % depuis 1988 (tableau 8.8). D'autres études ont utilisé les résultats d'enquêtes sur les voyages afin d'évaluer et de caractériser les déplacements en voiture au niveau provincial (Chipman *et al.*, 1991; Brault, 1997) ou municipal (Municipalité régionale de Waterloo, 1996), mais on n'a pas tenté de compiler toutes ces données de façon à obtenir des tendances nationales.

### *Autobus et transports publics*

En 1994, 84 compagnies de transport urbain, 46 compagnies d'autobus interurbains, plus de 600 exploitants d'autobus scolaires et des douzaines d'autres transporteurs de voyageurs ont utilisé le réseau routier pour fournir des services vitaux aux Canadiens (catalogue de Statistique Canada n° 53-215, 1994). Les revenus totaux générés par les autobus, qui atteignent environ 5 milliards de dollars annuellement, n'ont que très peu changé au cours des dernières années (tableau 8.9). L'utilisation des autobus scolaires a augmenté alors que, dans le cas des autobus interurbains et urbains, on a observé une diminution du nombre des voyageurs et des revenus (tableau 8.10). Les autobus sont le principal mode de transport urbain (tableau 8.11), sauf dans certaines régions métropolitaines.

**Tableau 8.8 Données sur les véhicules automobiles**

| | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ventes de carburant**[1]* | 32,0 | 32,0 | 40,5 | 40,5 | 41,2 | 42,4 | 44,0 | 44,9 |
| **Production de véhicules**[2]** | 1,9 | 1,9 | 1,7 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,0 | 2,1 |
| **Véhicules immatriculés**[3]** | 16,3 | 16,7 | 17,0 | 16,4 | 16,5 | 16,7 | 16,9 | 17,0 |
| **Ventes de véhicules**[2]** | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,2 | 1,1 |
| **Déplacements en automobile Voyageurs-kilomètres**[4]*** | 322,9 | n. d. | 334,5 | 329,8 | 343,8 | 356,1 | 363,1 | n. d. |

*milliards de litres; **millions de véhicules; ***milliards de V/km

**Sources :** Statistique Canada, [1]catalogue n° 53-218, [2]catalogue n° 11-010, [3]catalogue n° 53-219, [4]Environnement Canada, 1996

**Tableau 8.9 Revenus de l'exploitation des autobus, y compris les subventions** (milliards de dollars)

| | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Revenus** | 3,6 | 4,1 | 4,3 | 4,7 | 5,1 | 5,1 | 5,1 | n. d. |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 53-215

**Tableau 8.10 Statistiques sur les autobus et le transport des voyageurs**

| Secteur | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Voyageurs*** (millions) | | | | | | | | |
| **Autobus interurbains**[1] | 18,2 | 17,2 | 17,0 | 15,9 | 14,9 | 10,9 | 11,4 | n. d. |
| **Transport urbain**[1] | 1 514,8 | 1 520,4 | 1 528,4 | 1 450,0 | 1 432,1 | 1 396,4 | 1 360,7 | 1 355,4 |
| ***Voyageurs-kilomètres*** (milliards) | | | | | | | | |
| **Autobus interurbains**[2] | 14,3 | n. d. | 14,3 | 14,9 | 14,5 | 14,4 | 14,4 | n. d. |
| **Transport urbain**[2] | 10,8 | n. d. | 10,9 | 10,9 | 10,5 | 10,3 | 10,3 | n. d. |

**Sources :** [1] Catalogue de Statistique Canada n° 53-215, [2]Environnement Canada, 1996

**Tableau 8.11 Parcs de véhicules de transport urbain**

| Type | Nombre |
|---|---|
| **Autobus** | 10 545 |
| **Trolleybus** | 305 |
| **Véhicules légers sur rail** | 548 |
| **Véhicules lourds sur rail** | 1 381 |
| **Trains de banlieue** | 359 |

**Source :** Association canadienne du transport urbain, 1995

### *Camionnage*

Les activités de camionnage, y compris celles des entreprises pour compte d'autrui, exploitées en propre ou privées, représentent le plus important secteur de l'industrie canadienne du transport en ce qui concerne la valeur des biens transportés. Toutefois, on ne dispose que d'une quantité limitée de données sur les entreprises de camionnage exploitées en propre ou privées, et les analyses portent habituellement surtout sur les éléments les plus importants de l'industrie du camionnage, soit les grandes entreprises pour compte d'autrui basées au Canada.

Le tableau 8.12 présente les données sur les revenus de ce groupe d'exploitants. Pour 1988 et 1989, elles s'appliquent à des compagnies à revenus d'au moins 100 000 dollars. À partir de 1990, elles touchent les compagnies à revenus d'au moins un million de dollars. En 1994, ce groupe de transporteurs a produit 85 % des revenus totaux de camionnage pour compte d'autrui et il a exploité 80 % de tout le parc des camions (tableau 8.13). Ce changement au niveau du

mode de déclaration explique la baisse soudaine des revenus de 1989 à 1990. Depuis 1991, la croissance des revenus est forte; cette période coïncide avec une ère de déréglementation des transports et de libéralisation du commerce.

**Tableau 8.12 Revenus d'exploitation des grandes entreprises de camionnage pour compte d'autrui** (milliards de dollars)

| Année | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Revenus** | 9,6 | 10,2 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 9,2 | 10,9 | 12,1 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 53-222

**Tableau 8.13 Parc de camionnage pour compte d'autrui, 1994**

| Type | Nombre |
|---|---|
| ***Toutes les activités de camionnage pour compte d'autrui*** | |
| **Camions porteurs** | 15 897 |
| **Tracteurs routiers** | 42 062 |
| **Semi-remorques** | 126 501 |
| **Autres** | 4 579 |
| ***Entreprises de camionnage pour compte d'autrui (revenus d'un million ou plus)*** | |
| **Camions porteurs** | 7 894 |
| **Tracteurs routiers** | 30 894 |
| **Semi-remorques** | 110 996 |
| **Autres** | 2 237 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n°53-222

Les données régionales pour ce groupe de transporteurs montrent l'importance du camionnage pour l'économie de l'Ontario (tableau 8.14). L'industrie canadienne du camionnage a toujours été dominée par les déplacements intraprovinciaux, malgré une augmentation, au cours des dernières années, des transports à grande distance de marchandises, et surtout des activités transfrontalières (catalogue de Statistique Canada n°53-222, 1994), qui se traduisent par de plus grandes distances moyennes des voyages, comme le montre le tableau 8.15.

**Tableau 8.14 Revenus des entreprises de camionnage pour compte d'autrui (revenus d'un million ou plus), par région, 1995** (milliards de dollars)

| Région | Atlantique | Québec | Ontario | Prairies | C.-B. | T.N.-O | Canada |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Revenus** | 0,88 | 2,1 | 4,5 | 3,2 | 1,2 | 0,05 | 12,1 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n°53-222, 1994

**Tableau 8.15 Statistiques pour les grandes entreprises de camionnage de marchandises, pour compte d'autrui**

| | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Tonnes de marchandises*** (millions) | 177,1 | 162,4 | 174,2 | 150,6 | 149,5 | 173,4 | 195,6 | 210,9 |
| ***Tonnes-Kilomètres*** (milliards) | 57,8 | 54,5 | 77,8 | 70,6 | 72,9 | 84,6 | 101,8 | 110,0 |
| ***Distance moyenne d'un voyage*** (km) | 326 | 335 | 447 | 469 | 488 | 488 | 520 | 522 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n°53-222

### *Transport aérien*

Il y a 726 aéroports homologués au Canada, dont les installations desservent le parc canadien de 17 742 aéronefs civils immatriculés (tableau 8.16). Alors que la plupart des aéroports appartiennent à des particuliers et sont exploités en propre, 149 d'entre eux, dont 26 totalisent 94 % de toutes les activités de transport aérien (voyageurs et cargo), sont gérés par le ministère des Transports du gouvernement fédéral (Nix, 1995). On compte 970 transporteurs aériens au Canada, dont la plupart sont relativement petits. Cette industrie est dominée par deux compagnies aériennes, Air Canada et Lignes aériennes Canadien International; ils partagent environ 79 % des revenus du transport aérien des voyageurs sur les grandes lignes (Nix, 1995) et utilisaient 343 aéronefs en 1993. Au Canada, les lignes aériennes ont continué à bien desservir la population et, même dans les régions éloignées, on n'a pas noté de problèmes d'accessibilité malgré la déréglementation, entrée en vigueur vers la fin des années 80. En effet, une étude (Furtado, 1995) a montré que le réseau des transporteurs aériens s'était étendu dans les régions les plus éloignées du pays; de plus, on a plutôt noté une meilleure accessibilité dans les petites villes en comparaison avec Toronto.

**Tableau 8.16 Aéronefs, 1993**

| Type | Nombre d'appareils |
|---|---|
| **Total des aéronefs civils immatriculés** | 17 742 |
| **- Particuliers** | 12 716 |
| **- Gouvernements** | 267 |
| **- Entreprises** | 4 759 |

**Source :** Nix, 1995, 12

La performance économique de l'industrie des lignes aériennes a connu des hauts et des bas au cours des dernières années (tableau 8.17). La plupart des revenus proviennent des voyageurs. Après une croissance rapide de la circulation aérienne au cours des années 70 et 80, le nombre des voyageurs transportés par les entreprises canadiennes a connu un léger déclin au cours des dernières années. En 1994, 32,7 millions de personnes ont voyagé par air, par rapport à 35,9 millions en 1988. Le nombre de voyageurs des seuls vols intérieurs a diminué fortement depuis la déréglementation, passant de 13,6 millions en 1988 à 10,3 millions en 1994. Actuellement, le transport aérien des voyageurs correspond à environ 3,5 % de tous les voyages effectués par les Canadiens (catalogue de Statistique Canada n° 53-215, 1994). On a noté une petite augmentation du nombre des V/km, de 63,7 milliards en 1988 à 65,6 milliards en 1994 (tableau 8.18), ce qui indique une augmentation de la durée moyenne des voyages.

Le transport des marchandises ne compte que pour un petit pourcentage des revenus générés et, par rapport aux autres modes de transport, les lignes aériennes ne transportent qu'un petit pourcentage des marchandises. En 1994, les transporteurs aériens n'en ont transporté que 0,68 million de tonnes (tableau 8.19), habituellement des produits à grande valeur unitaire ou pour lesquels le facteur temps est important.

**Tableau 8.17 Revenus des sociétés aériennes** (milliards de dollars)

| Année | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Revenus** | 7,1 | 7,8 | 8,2 | 7,6 | 7,5 | 7,5 | 8,4 | 9,3 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 51-206

**Tableau 8.18 Statistiques sur le transport aérien des voyageurs**

| | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Voyageurs embarqués*** (millions) | | | | | | | | |
| **Total des vols** [1] | 35,9 | 37,0 | 36,7 | 32,2 | 32,1 | 31,4 | 32,7 | n. d. |
| **Vols intérieurs**[2] | 13,6 | 13,1 | 13,0 | 11,4 | 11,4 | 10,2 | 10,3 | 11,2 |
| ***Voyageurs-kilomètres*** (milliards) | | | | | | | | |
| **Total des vols**[1] | 63,7 | 67,9 | 69,3 | 57,7 | 62,1 | 61,0 | 65,6 | n. d. |
| **Vols intérieurs**[2] | 24,6 | 24,7 | 24,9 | 21,7 | 22,3 | 21,3 | 22,4 | n. d. |

**Source :** Statistique Canada, [1]catalogue n° 51-206, [2]catalogue n° 51-204

**Tableau 8.19 Statistiques sur le transport aérien des marchandises**

| | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Tonnes de marchandises*** (millions) | 0,63 | 0,65 | 0,63 | 0,63 | 0,61 | 0,65 | 0,68 | n. d. |
| ***Tonnes-kilomètres*** (milliards) | 1,6 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,4 | 2,6 | 1,7 | n. d. |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 51-206

### *Transport ferroviaire*

À la fin de 1995, les compagnies ferroviaires canadiennes exploitaient 84 648 km de voies ferrées, dont environ 45 % étaient des voies principales (tableau 8.20), 25 % des voies secondaires et 30 % des cours de triage, des voies industrielles privées et des voies d'évitement. Ces voies étaient utilisées par 29 compagnies ferroviaires exploitant collectivement 3 300 locomotives tirant 117 533 wagons de marchandises et 570 wagons de voyageurs (tableau 8.21). La plus grande partie de l'infrastructure ferroviaire appartient à Canadien National (CN) ou à CP Rail, qui s'occupent exclusivement du transport des marchandises et qui encaissent 90 % des revenus totaux du secteur ferroviaire canadien (Nix, 1995). Le service de transport ferroviaire de voyageurs est assuré par une société d'État, VIA Rail.

Au cours des dernières années, l'industrie ferroviaire du Canada a connu une restructuration majeure de ses activités, qui coïncidait avec des modifications de la réglementation et des politiques de subvention gouvernementales. Les revenus d'exploitation ont chuté brusquement de 8 milliards de dollars en 1988 à moins de 7 milliards de dollars au début des années 90 (tableau 8.22). Depuis, on note des signes d'amélioration au chapitre des revenus, et le nombre de tonnes des marchandises transportées s'est accru à partir de 1993 (tableau 8.23). La privatisation du CN en 1995, combinée à des programmes d'abandon des trajets non rentables, des nouvelles lignes plus courtes et des liaisons accrues avec les États-Unis, ont créé des conditions améliorées pour l'exploitation des chemins de fers au Canada (Nix, 1995).

Le principal rôle des chemins de fer est le transport sur de grandes distances de matières brutes ou en vrac devant être transformées dans une autre partie du Canada ou exportées. Depuis plusieurs années, le minerai de fer, le charbon et le blé sont les trois principaux produits transportés et, en 1995, ils comptaient pour 36 % du nombre total de tonnes (catalogue de Statistique Canada n° 52-216, 1995). Environ un quart de la quantité totale des marchandises est dirigé vers les États-Unis (Nix, 1995).

**Tableau 8.20 Voies principales** (km)

| Province | Longueur |
|---|---|
| **Terre-Neuve** | 240 |
| **Île-du-Prince-Édouard** | 0 |
| **Nouvelle-Écosse** | 730 |
| **Nouveau-Brunswick** | 949 |
| **Québec** | 4 208 |
| **Ontario** | 13 312 |
| **Manitoba** | 2 874 |
| **Saskatchewan** | 3 717 |
| **Alberta** | 4 445 |
| **Colombie-Britannique** | 7 042 |
| **Territoire du Yukon** | 0 |
| **Territoires du Nord-Ouest** | 0 |
| **Total** | 37 517 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 52-216, 1995

**Tableau 8.21 Matériel ferroviaire**

| Type | Nombre |
|---|---|
| **Locomotives** | 3 300 |
| **Wagons de marchandises** | 117 533 |
| **Wagons couverts** | 29 311 |
| **Wagons-trémies** | 40 227 |
| **Wagons-tombereaux** | 15 946 |
| **Wagons réfrigérés** | 206 |
| **Wagons plats** | 26 520 |
| **Wagons à bestiaux** | 28 |
| **Wagons de queue** | 1 099 |
| **Autres** | 4 196 |
| **Wagons de voyageurs** | 570 |

**Source :** Nix, 1995,11

**Tableau 8.22 Revenus d'exploitation des chemins de fer** (milliards de dollars)

| Année | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Revenus** | 8,0 | 7,4 | 7,0 | 7,1 | 6,9 | 6,9 | 7,5 | 7,2 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 52-216

**Tableau 8.23 Statistiques sur le transport ferroviaire des marchandises**

| | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Tonnes de marchandises*** (millions) | 293,8 | 280,7 | 268,7 | 274,1 | 264,5 | 264,3 | 295,1 | 298,6 |
| ***Tonnes-kilomètres*** (milliards) | 271,0 | 249,0 | 248,3 | 260,5 | 250,6 | 256,3 | 288,4 | 280,4 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 52-216

**Tableau 8.24 Statistiques sur le transport ferroviaire des voyageurs**

| | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Voyageurs*** (millions) | n. d. | n. d. | n. d. | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,1 | 4,0 |
| ***Voyageurs-kilomètres*** (milliards) | n. d. | n. d. | n. d. | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n°52-216

Le transport ferroviaire des voyageurs ne se porte pas aussi bien. En 1995, les services interurbains (à l'exclusion des services régionaux à Montréal, Toronto et Vancouver) n'ont desservi que 4 millions de voyageurs, soit 0,5 % du transport des voyageurs au Canada. Les valeurs en V/km sont demeurées stationnaires et les revenus ont baissé (tableau 8.24), étant donné que les services et les subventions ont été coupés (Catalogue de Statistique Canada n°52-216, 1995).

### *Transport maritime*

Aujourd'hui, le transport maritime, qui était autrefois le principal mode de transport des marchandises au Canada, joue un rôle important surtout pour le commerce international et la distribution régionale de produits en vrac. On compte 2 400 ports au pays, dont 350 sont gérés par le gouvernement fédéral et le reste, surtout par le secteur privé. Les 30 plus grands ports traitent presque 80 % de toutes les marchandises transportées par voie d'eau (Nix, 1995); Vancouver est de loin le port le plus achalandé. La plupart des ports en eau profonde sont situés sur les côtes est et ouest et le long du réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent, qui compte 3 700 km de voies navigables passant par des lacs, des cours d'eau, des canaux et des écluses.

Une bonne partie du trafic des ports côtiers provient de l'étranger. Par contre, l'activité dans le réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent est dominée par les bateaux canadiens. Aujourd'hui, les deux tiers de l'ensemble de la flotte canadienne, y compris les navires océaniques et côtiers, naviguent sur les Grands Lacs (McCalla, 1994, 75). La navigation sur les Grands Lacs sert surtout au transport de produits en vrac, ce qui se reflète dans la composition de la flotte. Plus de 70 % des navires de la flotte canadienne sont des vraquiers, dont un nombre croissant sont à déchargement automatique (McCalla, 1994). Bien que, sur les Grands Lacs, beaucoup de bateaux battant pavillon américain soient de la classe des très gros porteurs ((304,9 x 32,0 m), les dimensions de la plupart des bateaux canadiens sont limitées par celles des écluses du canal Welland (Millerd, 1996), qui relie le lac Érié au lac Ontario. Actuellement, les dimensions maximales sont de 225,5 x 23,8 m, et le tirant d'eau maximal (si le niveau de l'eau le permet) est de 80 dm (Administration de la voie maritime du Saint-Laurent, 1997).

Pour ce qui est de l'exploitation, les revenus et le nombre de tonnes des marchandises ont connu des fluctuations au fil des ans (tableaux 8.25 et 8.26), surtout en fonction de la production des ressources et de leurs marchés. En 1995, 360,4 tonnes de marchandises ont été chargées et déchargées dans les ports canadiens, soit un maximum record pour les marchandises du secteur international (259,6 millions de tonnes) et un minimum record pour les marchandises de l'intérieur (100,6 millions de tonnes).

On résume ci-après les activités canadiennes de transport maritime à l'échelle régionale pour les zones géographiques suivantes : Atlantique, Saint-Laurent, Grands Lacs et Pacifique. La région

**Tableau 8.25 Revenus du transport maritime** (milliards de dollars)

| Année | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Revenus | 2,2 | 2,3 | 2,6 | 2,8 | 2,5 | 2,7 | 2,8 | n. d. |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 54-205

**Tableau 8.26 Nombre de tonnes de marchandises transportées par bateau** (millions de tonnes)

| Année | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de tonnes | 390,0 | 363,0 | 353,1 | 350,8 | 327,7 | 324,0 | 352,0 | 360,4 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n°54-205

de l'Atlantique inclut les ports de l'Atlantique et de l'Arctique, ainsi que du bassin inférieur du golfe Saint-Laurent. La région des Grands Lacs est représentée par les ports des Grands Lacs et par des ports du Saint-Laurent situés à l'ouest de la frontière Ontario-Québec. Sauf dans les Grands Lacs, le commerce international est dominant et en croissance (tableau 8.27). Par contre, dans la région des Grands Lacs, les échanges des marchés intérieur et international sont comparables, et les deux accusent un déclin depuis quelques années. À ce sujet, dans la section de la voie maritime du Saint-Laurent comprise entre Montréal et le lac Ontario, les volumes de marchandises ont atteint, en 1991, un minimum record en 28 ans, bien qu'on ait noté un certain rétablissement depuis. En 1996, l'ensemble de la voie maritime du Saint-Laurent a connu la circulation la plus intense depuis 1988 (Administration de la voie maritime du Saint-Laurent, 1996). Le déclin du transport maritime dans les Grands Lacs est attribué à divers facteurs, notamment à la diminution des expéditions de céréales (une plus grande quantité est maintenant exportée vers les marchés de l'Asie par les ports de la côte ouest), à l'augmentation de l'utilisation des conteneurs (surtout dans des ports autres que ceux de la voie maritime), à l'augmentation du nombre de navires hauturiers trop gros pour passer par les écluses de la voie maritime, aux limites imposées pour la navigation d'hiver, aux péages de la voie maritime et à la compétition des chemins de fer (Millerd, 1996).

Le tableau 8.28 illustre les différences dans le caractère régional des opérations maritimes au Canada. Dans certains cas, les marchandises proviennent du Canada et sont transportées de plus d'une façon pour être traitées ailleurs au pays (p. ex, une partie du minerai de fer extrait au Québec et au Labrador est acheminé par voie ferrée à certains ports du Saint-Laurent où il est chargé à bord de bateaux et distribué ensuite aux aciéries de l'Ontario; il en va de même pour certains produits forestiers, comme les grumes, les billons et le bois à pâte, qui sont transportés entre divers ports du Pacifique). Dans d'autres cas, les produits sont transportés dans le cadre d'opérations de commerce international (p. ex., le Canada atlantique importe du pétrole brut, le raffine et redistribue les produits; le blé des Prairies est transporté par chemin de fer jusqu'à Thunder Bay, où il est chargé à bord de bateaux et expédié à des points de transbordement dans le bassin inférieur du Saint-Laurent, où il est finalement transféré à bord de navires hauturiers pour l'exportation).

**Tableau 8.27 Transport total de marchandises, par région** (millions de tonnes chargées et déchargées)

| | Atlantique | | Saint-Laurent | | Grands Lacs | | Pacifique | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Année** | **Intérieur** | **Inter-national** | **Intérieur** | **Inter-national** | **Intérieur** | **Inter-national** | **Intérieur** | **Inter-national** |
| **1995** | 11,5 | 53,2 | 28,9 | 80,7 | 29,0 | 32,1 | 31,2 | 93,5 |
| **1994** | 12,7 | 47,9 | 28,8 | 73,2 | 31,6 | 34,7 | 31,0 | 91,0 |
| **1993** | 11,3 | 46,5 | 24,4 | 65,4 | 29,6 | 29,9 | 34,5 | 82,1 |
| **1992** | 11,9 | 38,4 | 30,5 | 66,6 | 33,8 | 32,7 | 28,1 | 85,2 |
| **1991** | 11,8 | 42,4 | 33,3 | 70,2 | 38,0 | 29,7 | 33,6 | 91,6 |
| **1990** | 13,3 | 42,5 | 33,7 | 71,6 | 37,0 | 32,6 | 36,5 | 85,5 |
| **1989** | 12,8 | 41,8 | 29,6 | 74,8 | 38,4 | 37,7 | 43,1 | 84,9 |
| **1988** | 13,2 | 42,0 | 33,8 | 76,3 | 40,8 | 39,4 | 52,0 | 92,1 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 54-205

**Tableau 8.28 Transport maritime - Trois principaux produits, par région (1994)** (millions de tonnes)

| | Atlantique | | Saint-Laurent | | Grands Lacs | | Pacifique | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Produit** | **Tonnes** | **Produit** | **Tonnes** | **Produit** | **Tonnes** | **Produit** | **Tonnes** |
| **Marché intérieur, chargement** | Mazout | 1,5 | Minerai de fer | 6,6 | Blé | 5,8 | Bois à pâte | 7,2 |
| | Sel | 1,4 | Métaux communs | 2,3 | Non-métaux | 2,0 | Bois | 4,4 |
| | Gypse | 1,0 | Mazout | 2,1 | Calcaire | 1,7 | Calcaire | 0,8 |
| **Marché intérieur, déchargement** | Mazout | 1,8 | Blé | 4,7 | Minerai de fer | 5,7 | Bois à pâte | 7,2 |
| | Essence | 1,1 | Métaux communs | 2,3 | Calcaire | 1,7 | Bois | 4,4 |
| | Non-métaux | 0,7 | Mazout | 1,9 | Non-métaux | 1,6 | Calcaire | 0,8 |
| **Marché international, chargement** | Gypse | 6,1 | Minerai de fer | 31,4 | Sel | 2,6 | Charbon | 30,1 |
| | Mazout | 4,2 | Blé | 5,2 | Ciment | 2,2 | Blé | 14,0 |
| | Essence | 3,2 | Métaux communs | 1,4 | Non-métaux | 1,4 | Bois à pâte | 5,5 |
| **Marché international, déchargement** | Pétrole | 16,8 | Pétrole | 6,6 | Charbon | 7,9 | Sable et gravier | 1,1 |
| | Mazout | 1,4 | Aluminium | 5,6 | Minerai de fer | 5,6 | Machinerie | 1,0 |
| | Machinerie | 1,0 | Produits chimiques | 1,5 | Calcaire | 2,5 | Phosphate | 0,8 |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 54-205, 1994

**Tableau 8.29 Statistiques sur le transport maritime de voyageurs** (millions de voyageurs)

| **Année** | **1988** | **1989** | **1990** | **1991** | **1992** | **1993** | **1994** | **1995** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Nombre** | 30,8 | 31,7 | 33,7 | 33,2 | 32,1 | 34,0 | 34,9 | n. d. |

**Source :** Catalogue de Statistique Canada n° 54-205, 1994

Au Canada, on ne reconnaît pas toujours le rôle des opérations maritimes dans le transport des voyageurs, mais les traversiers et d'autres types de bateaux ont tout de même transporté 34,9 millions de personnes en 1994, ce qui place le transport maritime au second rang, juste derrière le transport aérien pour ce qui est de l'achalandage (tableau 8.29). La British Columbia Ferry Corporation (BCFC) est la plus importante de ces entreprises. En 1994, la BCFC a transporté 21 millions de voyageurs et 8 millions de véhicules automobiles (Nix, 1995). Ce type de service est essentiel pour de nombreuses communautés côtières et insulaires.

### *Transport par pipeline*

Il existe une vaste infrastructure de pipelines au Canada (tableau 8.30). Les divers réseaux permettent le transport du pétrole brut aux raffineries et la distribution du gaz naturel aux consommateurs du Canada et des États-Unis. Les pratiques de déclaration du secteur des pipelines limitent la quantité d'informations permettant de documenter les activités reliées au transport. En 1993, les opérations de 70 compagnies d'oléoducs ont produit des revenus d'environ un milliard de dollars. Le principal transporteur, Interprovincial Pipe Line (IPL), exploite le plus long oléoduc de pétrole brut et

**Tableau 8.30 Pipelines, 1993** (km)

| **Type** | | **Longueur** |
|---|---|---|
| **Oléoducs** | | |
| | **de collecte** | 11 112 |
| | **principaux, brut** | 19 259 |
| | **de produits** | 5 669 |
| **Total** | | 36 040 |
| **Gazoducs** | | |
| | **de collecte** | 6 924 |
| | **de transport** | 71 621 |
| | **de distribution** | 182 012 |
| **Total** | | 260 557 |

**Source :** Nix, 1995, 13

d'hydrocarbures liquides du monde. En 1994, les volumes livrés par IPL dépassaient 1,5 million de barils par jour (Nix, 1995). La plus importante des 100 compagnies de gazoducs en activité est la TransCanada Pipeline Limited. En 1994, son principal pipeline a transporté 62,9 milliards de $m^2$ de gaz, dont 46 % ont été exportés (Nix, 1995).

### *Opérations multimodales*

Bien que la plupart des informations numériques sur les activités de transport ne concernent qu'un mode de transport, il faut reconnaître l'existence de rapports étroits entre les trois principaux modes de transport des marchandises (c.-à-d. le camionnage et les le transports ferroviaire et maritime) à cause de la conteneurisation. Pour le transport maritime, la proportion des marchandises internationales conteneurisées a augmenté régulièrement au cours des dernières années, atteignant 8,7 % pour les importations et 4,9 % pour les exportations en 1994 (catalogue de Statistique Canada n° 54-205, 1994). La circulation ferroviaire multimodale a également augmenté au Canada, passant à près de 16 millions d'unités chargées en 1995, ce qui représente un accroissement par rapport aux 11,2 millions d'unités en 1992 (Fitzpatrick, 1997).

## VULNERABILITES ET IMPACTS LIES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les transports sont un secteur complexe et dynamique sur lequel s'exercent des forces économiques, politiques, réglementaires, technologiques, démographiques et culturelles. Comme l'a noté Jackson (1990), le changement climatique pourrait ne jouer qu'un rôle mineur par rapport à ces nombreuses forces. Malgré cela, les coûts liés au climat peuvent être importants et toucher une vaste gamme d'entreprises, d'institutions et de populations. Cette section du rapport résume ce que l'on sait des impacts possibles du changement climatique sur le transport au Canada. Il faut toutefois noter que certaines des questions discutées ici auraient pu l'être dans la section sur l'adaptation, parce que la plupart des impacts climatiques sont liés à des décisions concernant la conception et l'exploitation, qui sont prises par les millions de Canadiens participant aux activités de transport. En d'autres termes, les coûts sont d'abord associés à des comportements d'adaptation, comme l'entretien des routes en hiver.

### *Principaux rapports sommaires*

Au cours de la dernière décennie, plusieurs rapports ont souligné les impacts du changement climatique sur le transport. Le rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) (Watson *et al.*, 1996) présente, dans une optique internationale, l'aperçu le plus complet : a) de l'état des connaissances sur les vulnérabilités des activités de transport dues aux conditions météorologiques ou aux fluctuations du niveau de la mer; b) des impacts possibles du changement climatique dans le secteur du transport et c) des répercussions économiques plus générales du changement climatique.

Pour ce qui est des vulnérabilités, le rapport présente un cadre théorique pour l'examen des impacts de différentes variables climatiques sur l'industrie, l'énergie et le transport. Les éléments de ce cadre reliés au transport sont présentés au tableau 8.31.

**Tableau 8.31 Vulnérabilités des activités de transport liées aux conditions météorologiques**

| | Transport de l'énergie | Infrastructures de transport | Opérations de transport |
|---|---|---|---|
| **Température** | Vulnérabilité des pipelines situés au-dessus du pergélisol. | Vulnérabilité en cas de dégel du pergélisol; modification des cycles de gel/dégel sur les routes. | Présence de glaces et transport côtier aux latitudes polaires; coûts d'entretien des routes; climatisation des voitures. |
| **Précipitations** | | Impact de la neige et de la glace sur le transport routier et aérien. | |
| **Conditions de vent** | | | |
| **Événements extrêmes** | | Effets sur les routes, les chemins de fer et les ponts. | Sécurité et fiabilité des opérations (p. ex., dans les aéroports). |
| **Disponibilité** | | | Navigation dans les eaux intérieures. |
| **Hausse du niveau de la mer** | | Effets sur l'infrastructure côtière; migration des activités côtières. | |
| **Autres** | | Changements dans les déplacements des produits agricoles et dans les tendances de peuplement. | Effets du brouillard, de la neige, de la pluie et de la glace sur les opérations et la sécurité. |

**Source :** Moreno *et al*., 1996, 373-374

Pour ce qui est des impacts possibles, le GIEC remarque que les études d'impact récentes portant sur le transport ne font état que de pays développés comme le Canada et, de façon générale, n'analysent que les impacts directs du changement climatique sur l'infrastructure et les opérations (Moreno *et al*., 1996, 374). Leur discussion des impacts sur le Canada est surtout basée sur l'étude du groupe IBI (IBI Group) de Toronto, qui fait l'objet d'une étude plus approfondie ci-dessous. Les principaux impacts signalés sont notamment :

- l'allongement de la saison de navigation dans l'Arctique, à cause du plus grand nombre de jours sans glace;
- l'allongement de la saison de transport maritime, accompagné cependant d'une baisse des niveaux d'eau dans la voie maritime du Saint-Laurent;
- d'autres impacts dus à des changements touchant les précipitations de neige ou la fonte du pergélisol.

Pour ce qui est des impacts économiques plus généraux, le rapport du GIEC (Moreno *et al*., 1996) souligne les fortes interactions entre les tendances des utilisations des terres et les activités de transport, et il soutient que les impacts du transport doivent être examinés dans le cadre plus vaste des tendances de peuplement. Selon les auteurs, même si certains croient que le changement climatique pourrait être à l'origine d'importantes redistributions des populations et

des activités économiques à l'échelle mondiale, on ne dispose que de peu de prévisions géographiques détaillées pour ces phénomènes.

Le rapport IBI mentionné ci-dessus représente le premier aperçu des incidences du changement climatique sur le transport au Canada. Il a été commandé par Transports Canada et achevé en 1988. Le rapport complet est désigné par « Irwin et Johnson (1988) » et le rapport sommaire, par « groupe IBI (1990) ». Le but de l'examen était d'effectuer une étude qualitative des impacts possibles du changement climatique sur le secteur du transport au Canada (groupe IBI, 1990, préface). Ce rapport traite des impacts directs et de certains impacts indirects, résumés au tableau 8.32. Il indique également les coûts et les avantages mais, dans l'ensemble, l'évaluation du groupe IBI des impacts du changement climatique sur le transport est positive, comme on peut le constater en lisant les points saillants de l'étude, où il est dit que, selon des évaluations préliminaires, dans l'ensemble, les effets nets des impacts à long terme du climat sur le transport au Canada pourraient être avantageux (groupe IBI, 1990, 1). Toutefois, la quantité de preuves à l'appui de cette affirmation est souvent faible.

Depuis 1988, plusieurs autres rapports ont présenté un résumé des impacts possibles du changement climatique sur le transport au Canada. Jackson (1990, 1992) a consacré au secteur du transport une partie de son rapport *Répercussions du réchauffement planétaire sur la politique du gouvernement canadien*. Il résume et critique l'étude du groupe IBI. Il mentionne également l'analyse empirique de Stokoe *et al.* (1988) portant sur les opérations maritimes au Canada atlantique et l'étude détaillée de la navigation sur les Grands Lacs du Great Lakes Institute (1986). Ces deux derniers rapports seront examinés ci-dessous. Dans l'ensemble, l'évaluation de Jackson des impacts sur le transport est optimiste elle aussi. Selon Jackson, il fait peu de doutes que le climat canadien actuel se traduit par d'importants coûts pour le secteur du transport (Jackson, 1990, 95) et, toujours selon cet auteur, il semble raisonnable de prévoir que, dans leur ensemble, les effets du réchauffement planétaire profiteront à ce secteur, étant donné le grand nombre des coûts additionnels du secteur qui peuvent être liés directement ou indirectement à la rigueur de l'hiver, par rapport à ceux d'autres pays industrialisés (*idem*, 100).

Malgré le ton généralement positif de ces deux études et d'autres études sommaires (Conseil du Programme climatologique canadien, 1991; CMI, 1993; Environnement Canada, 1994), les observations disponibles permettent de croire que les impacts prévus varieront considérablement selon le mode de transport et la région. Le reste de cette section est consacré à une discussion plus approfondie des vulnérabilités et des impacts liés au changement climatique, par mode de transport. Pour chacun des modes, on signale divers types d'impacts pour l'infrastructure et les opérations de transport, et on indique les vulnérabilités propres à des lieux ou à des régions.

***Routes***

À cause de l'importance des routes pour les voyageurs et pour le transport des marchandises au Canada, les impacts du changement climatique sur l'infrastructure routière et les voyages sont fondamentaux pour l'évaluation des impacts socio-économiques du changement climatique.

## Tableau 8.32 Sommaire du rapport du groupe IBI

| Mode | Impacts sur le transport | Étendue géographique | Coûts d'investissement supplémentaires | | Changement du coût d'exploitation unitaire | Échelle des impacts socio-économiques | Nature de l'impact |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Entretien/ restauration du réseau | Besoins de la superficie et/ ou de la demande prévue | | | |
| **Transport maritime, océanique et arctique** | Augmentation des exportations | importante | s.o. | faibles – significatifs | faible baisse | significative | avantage net |
| | Augmentation du commerce côtier | importante | s.o. | significatifs | baisse modérée | significative | avantage net |
| | Eaux libres de glace – Labrador/baie d'Hudson | importante | s.o. | modérés | baisse significative | modérée | avantage net |
| | (Re)construction de ports et de quais | limitée | modérés | modérés | effet neutre | modeste | désavantage net |
| | Augmentation des coûts de la Garde côtière | importante | s.o. | significatifs | augmentation significative | modérée | désavantage net |
| | Augmentation des activités de la Défense | importante | s.o. | significatifs – importants | hausse significative | modérée | désavantage net |
| **Transport maritime Grands Lacs** | Augmentation des exportations/du commerce côtier | significative | s.o. | modérés | effet neutre | modeste | avantage net |
| | Période d'exploitation de 11 ou 12 mois | significative | s.o. | modestes | faible baisse | modérée | avantage net |
| | Expansion des réseaux d'ouvrages de régulation du niveau des eaux | significative | importants | s.o. | hausse modérée | modérée | désavantage net |
| **Transport routier - Sud** | Diminution des tâches d'entretien d'hiver | importante | s.o. | s.o. | baisse modérée | modeste | avantage net |
| | Réalignement/protection contre les inondations (régions côtières) | modérée | significatifs | s.o. | s.o. | modeste | désavantage net |
| **Transport routier - Nord** | Expansion des réseaux desservant les régions nordiques | importante | s.o. | importants | hausse modeste | importante | avantage net |
| | Réalignement/protection contre les inondations (régions côtières) | modeste | modérés | s.o. | s.o. | faible | désavantage net |
| | Période d'enlèvement de la neige plus courte mais plus intensive | importante | s.o. | s.o. | hausse modeste | modeste | effet neutre |
| | Période d'entretien des routes d'hiver plus courte | significative | modestes | s.o. | s.o. | modeste | désavantage net |
| **Transport ferroviaire** | Expansion des réseaux desservant les régions nordiques | importante | s.o. | importants | hausse modeste | importante | avantage net |
| | Réalignement/protection contre les inondations (régions côtières) | modeste | modérés | s.o. | s.o. | modeste | désavantage net |
| | Réduction de la circulation en hiver à cause des eaux libres de glaces sur les Grands Lacs | significative | s.o. | s.o. | effet neutre | modeste | effet neutre |
| | Amélioration des opérations sur les lignes du Nord | modérée | modérés | s.o. | baisse modérée | modeste | avantage net |
| | Diminution nette des coûts d'entretien d'hiver | importante | s.o. | s.o. | baisse modeste | modeste | avantage net |
| **Transport aérien** | Expansion des réseaux desservant le Nord | importante | s.o. | significatifs | hausse modeste | importante | avantage net |
| | Systèmes d'aide à la navigation ou temps d'immobilisation accrus | importante | modérés | modérés | hausse modeste | modeste | désavantage net |
| | Diminution de la portance et de l'efficacité des moteurs | importante | s.o. | s.o. | hausse modeste | faible | désavantage net |
| | Raccourcissement de la saison pour les pistes d'atterrissage d'hiver | significative | modestes | s.o. | hausse modérée | modeste | désavantage net |
| | Augmentation des activités de la Garde côtière, recherche et sauvetage | importante | s.o. | significatifs | hausse significative | modérée | désavantage net |
| | Augmentation des activités de la Défense | importante | s.o. | significatifs – importants | hausse significative | modérée | désavantage net |

**Légende** Échelle des impacts à cinq niveaux; par ordre décroissant : importante, significative, modérée, modeste, faible.
Avantage net : les revenus des transports peuvent augmenter par rapport aux coûts, peut-être dans le contexte d'un accroissement de l'importance d'ensemble des transports.
Effet neutre : les coûts et les avantages s'annulent.
Désavantage net : les coûts de transport peuvent augmenter par rapport aux revenus.
s.o. : sans objet.

**Source :** Irwin et Johnson, 1988, pièce n° 3-3, reproduite dans Jackson, 1990

### *Infrastructures - Routes pavées*

Les routes *pavées* sont les artères économiques du pays. Le principal type de revêtement utilisé au Canada est souple et constitué d'une base d'agrégats, de couches sous-jacentes et d'une couche de béton asphaltique en surface (Nix *et al.*, 1992). On sait que le climat, et surtout le climat hivernal rigoureux, influe sur le type initial de construction, ainsi que sur les coûts d'entretien de ces routes. On se préoccupe surtout de la fissuration aux basses températures liée au cycle

gel/dégel et à l'action du gel. Dans le rapport de 1992 de la Commission royale sur le transport des voyageurs, Nix *et al*. (1992) ont étudié divers modèles de détérioration des routes afin de déterminer les contributions relatives de la densité de la circulation et de l'environnement à la détérioration du revêtement. Ils ont conclu que, selon les meilleures données disponibles au Canada, dans le cas des revêtements souples, et particulièrement pour les routes dont les charges annuelles totales par essieu sont relativement peu importantes, les facteurs environnementaux sont responsables, et de loin, de la plus grande partie de la détérioration du revêtement. Selon eux, sur les routes à très grande circulation, les facteurs environnementaux peuvent causer jusqu'à 50 % de la détérioration, contre 80 % ou plus pour les routes à faible circulation. (*idem*, 1992, 1014). Les auteurs ne considèrent pas les impacts possibles du changement climatique sur l'infrastructure des routes du Canada, mais, d'après leur analyse, des conditions climatiques plus chaudes pourraient avoir des effets avantageux sur la durée des revêtements.

D'après certaines études, une partie des avantages d'hivers plus doux pourraient être annulés par des contraintes thermiques endommageant le revêtement ou causant son soulèvement dans le sud du Canada, comme on l'a observé lors de certains événements aux États-Unis (Miller, 1988). Selon l'un des experts canadiens en revêtements (Haas, 1997), cette possibilité est faible parce qu'au Canada, peu de routes ont des revêtements de béton articulés, et parce qu'on a refait les joints de celles qui en ont. Il se peut que la combinaison de longues périodes de forte chaleur et de forte circulation provoque la formation d'ornières dans le revêtement, mais même ce problème pourrait être pallié à l'étape de la conception.

***Infrastructures - Régions côtières***

Selon un vaste consensus, le réchauffement planétaire influerait sur le niveau des mers à cause de la combinaison de l'expansion thermique et de l'accélération de la fonte des glaciers, ce qui aurait des impacts sur les infrastructures et les opérations côtières de tous types, y compris sur le transport.

Des études effectuées par Martec Ltd. (1987), par Lane and Associates (1988) et par Stokoe *et al*. (1988, également résumées dans l'étude de Stokoe de 1988) permettent de mieux comprendre les impacts du changement climatique sur les infrastructures côtières, notamment pour les routes, les ponts et les ponts-jetées dans les provinces atlantiques. Pour leurs analyses, ces trois études ont utilisé, comme hypothèse de départ, une hausse du niveau de la mer d'un mètre.

Les études de Martec Ltd. (1987) et de Lane and Associates (1988) étaient basées sur la modélisation statistique pour la prévision de la hauteur et de l'étendue géographique des tempêtes à période de récurrence de 20 et de 100 ans, en supposant une hausse du niveau de la mer d'un mètre. L'étude de Martec Ltd. (1987) était concentrée sur Saint John (N.-B.), et elle concluait que l'infrastructure routière serait fortement touchée. Les auteurs ont prédit que le pont-jetée de la baie Courtenay devrait être reconstruit, que le tronçon Jemseg-Maugerville de la transcanadienne connaîtrait des inondations qui perturberaient fortement le transport routier entre la région de l'Atlantique et le Centre, et que les routes et d'autres infrastructures subiraient des dommages le long des rives de la baie de Fundy, et particulièrement dans la ville de Saint John. Lane and Associates (1988) ont concentré leurs études sur Charlottetown (Î.-P.-É.) et ils ont

conclu que des parties de plusieurs rues de Charlottetown seraient sous la limite de la marée haute ou pourraient être inondées lors de tempêtes. D'après eux, trois petits ponts-jetées sur les routes North River Road et Beach Grove Road ainsi que sur Riverside Drive, devraient être reconstruits plus haut, et le pont-jetée de la North River Road devrait être rehaussé.

Selon l'étude de Stokoe *et al*. (1988), de portée plus étendue, une hausse d'un mètre du niveau de la mer pourrait avoir de graves conséquences : 14 ponts-jetées des Maritimes et 17 autres à Terre-Neuve devraient être refaits, à un coût de l'ordre de 100 millions de dollars; de plus, 200 ponts de la Nouvelle-Écosse, du Nouveau-Brunswick et de Terre-Neuve, ainsi que 33 autres de l'Île-du-Prince-Édouard, devraient être reconstruits à un coût de près d'un milliard de dollars; enfin, il faudrait prévoir des coûts de reconstruction des routes de plusieurs centaines de millions de dollars.

Ces inventaires des sites et des ouvrages vulnérables constituent un point de départ utile pour la planification, mais on ne doit pas les utiliser pour les prévisions concernant le prochain siècle, étant donné que les routes et les ponts ont une durée de vie type de 20 à 50 ans. Comme l'a noté Jackson (1990, 98), la hausse prévue du niveau de la mer due au réchauffement planétaire est très inférieure à un mètre, même à l'horizon 2070. Avec le temps, tous ces ouvrages ou la plupart d'entre eux devront probablement être remplacés ou faire l'objet d'importants travaux d'entretien pour d'autres raisons, et il est possible d'intégrer à ces travaux des mesures tenant compte de la hausse du niveau de la mer. Cependant, il est important que la conception des infrastructures prenne en compte le changement climatique, ce qui ne semble pas être le cas actuellement.

On s'est moins intéressé aux impacts possibles de la hausse du niveau de la mer sur d'autres régions côtières du Canada. Clague (1989, 32) a étudié la côte du Pacifique et il a noté que les rivages formés sur des sédiments du Pléistocène pourraient connaître une forte érosion à mesure que le niveau de la mer monte. De plus, les plaines deltaïques basses, ainsi que certaines routes et certains bâtiments, pourraient être inondés par les ondes de tempête. Richmond, située dans la delta du Fraser juste au sud de Vancouver, est l'une de ces zones vulnérables (Beckmann *et al*., 1997).

***Infrastructures - Routes du nord et routes forestières***

Plusieurs questions sont associées à l'infrastructure routière et à l'accès aux régions nordiques et à d'autres régions éloignées. On se préoccupe de la viabilité de certaines routes non permanentes comme les routes d'hiver et les routes forestières, ainsi que de la possibilité de l'utilisation et de l'entretien des routes utilisables en toutes saisons, et surtout de celles qui ont été construites au-dessus de zones de pergélisol.

L'un des types de route étudié en détail est la route d'hiver sur glace. Les routes d'hiver constituent une part importante du réseau de transport dans certaines parties des régions nordiques. Par exemple, dans la vallée du Mackenzie, environ 10 à 15 % du volume annuel total des marchandises passe par les routes d'hiver, dont certaines traversent de grands cours d'eau comme le Mackenzie et les rivières Liard et Great Bear (Woo et Lonergan, 1990). Comme leur nom l'indique, les routes d'hiver ne sont utilisables qu'en hiver, étant donné qu'elles sont faites de

neige, de glace ou d'un mélange de terre minérale, de neige et de glace. Les routes d'hiver sur glace, ou « routes de glace », comme on les appelle communément, comprennent les routes d'hiver qui sont construites sur les surfaces gelées de lacs et de cours d'eau.

Pour ce qui est des routes de glace du Canada, l'étude la plus complète sur les impacts du changement climatique a été faite dans le cadre de l'Étude d'impact sur le bassin du Mackenzie (Cohen, 1997), effectuée par une équipe de chercheurs des universités de Victoria et de Toronto (Woo et Lonergan, 1990; 1992; Woo, 1992; Lonergan *et al.*, 1993). Selon les auteurs, on a utilisé une approche à scénarios basée sur trois MCG en mettant l'accent sur la modélisation climatique de la variabilité, des conditions des glaces des cours d'eau et des impacts économiques (Lonergan *et al.*, 1993, 331). On a mis au point des modèles de simulation stochastiques de la température de l'air et des précipitations afin de produire des séries chronologiques de données synthétiques reflétant les impacts du changement climatique. On a ensuite utilisé ces données pour simuler la croissance et la fonte des glaces des cours d'eau et ces simulations, combinées à des formules empiriques, ont servi à déterminer la durée d'utilisation sans danger pour des véhicules de poids supérieur à certaines limites traversant le Mackenzie à Norman Wells.

On a étudié trois scénarios de MCG et tous étaient associés à une réduction notable de la durée de la saison des routes de glace, comme le montre le tableau 8.33. Les auteurs ont cependant noté que la diminution des occasions de circulation sur la glace serait compensée par un allongement de quelque 6 à 9 semaines de la saison d'eau libre pour le transport par barge. Étant donné que le coût du transport par barge est généralement plus faible que celui du transport routier, surtout sur les routes d'hiver, on a estimé que l'effet net sur l'économie pourrait être positif si ces économies au niveau des coûts se reflétaient sur les prix des biens de consommation. Toutefois, à cause des cas de monopole nuisant à la compétition dans l'industrie du transport de cette région, les auteurs croient que les consommateurs ne bénéficieraient pas des économies réalisées grâce à l'allongement de la saison d'eau libre (Woo et Lonergan, 1992). En fait, il est possible que l'effet net soit négatif si les compagnies décident de faire des mises à pied (Woo et Lonergan, 1992) ou si une partie du transport routier sur les routes de glace est remplacé par un mode de transport plus coûteux comme le transport aérien (Bone *et al.*, 1994).

**Tableau 8.33 Saison des routes de glace pour la traversée du Mackenzie à Norman Wells**

| Scénario | Durée moyenne | Écart-type |
|---|---|---|
| **Conditions actuelles** | 178 jours | 15,1 jours |
| **MCG OSU, 2x$CO_2$** | 148 jours | 14,7 jours |
| **MCG GISS, 2x$CO_2$** | 138 jours | 20,6 jours |
| **MCG GFDL, 2x$CO_2$** | 132 jours | 20,8 jours |

**Source :** Lonergan *et al.*, 1993, 341

Dans le Nord, bon nombre des routes « toutes saisons » sont aussi vulnérables au changement climatique parce qu'elle ont été construites au-dessus de zones de pergélisol. Le rapport sur les régions arctiques de l'ÉPC présente un sommaire concis des caractéristiques et de l'étendue spatiale du pergélisol au Canada, ainsi que de sa réaction probable au réchauffement climatique. D'après ces informations, il semble qu'une plus grande instabilité du pergélisol augmenterait les coûts de la construction et de l'entretien des routes carrossables en tout temps au Yukon et dans les Territoires du Nord-Ouest. Il serait possible d'évaluer l'étendue géographique et les impacts économiques de la fonte du pergélisol en combinant les scénarios de changement climatique avec

les modèles actuels de transfert thermique, mais on n'a trouvé aucun exemple de ce type d'analyse.
D'autres routes, notamment les milliers de kilomètres de routes forestières, dont beaucoup sont privées, pourraient être touchées par le changement climatique, principalement par les précipitations. Ces routes sont essentielles pour l'exploitation des ressources forestières du Canada, ainsi que pour leur gestion ultérieure.

***Infrastructures - Événements géophysiques extrêmes***

On s'attend à ce que des changements dans les régimes des précipitations influent sur la fréquence et l'importance de processus naturels comme les coulées de débris, les avalanches et les éboulements. On note déjà de nombreux exemples d'endommagement d'infrastructures de transport et de perturbation des services dans les régions montagneuses de l'ouest du Canada, dus à des glissements de terrain provoqués par les pluies; en outre, il est évident que l'intégrité de certains corridors de transport dans ces régions subira des effets négatifs dus à des événements de ce type provoqués par les pluies (Evans et Clague, 1997). De plus, il existe un risque d'instabilité des pentes dans certaines parties de l'est de l'Ontario et du Québec.

***Opérations - Entretien d'hiver***

L'hiver canadien a un impact significatif sur les coûts d'entretien des routes. Les programmes d'entretien d'hiver ont pour but de réduire au minimum les pertes économiques, de prévenir les accidents et de faciliter les interventions d'urgence. Ces programmes portent sur l'utilisation de chasse-neige, l'enlèvement et l'élimination de la neige, l'application de produits de déglaçage et/ou d'abrasifs, ainsi que sur d'autres activités comme la pose de paraneiges (Perchanok *et al*., 1991). Bien que ces programmes diffèrent selon les lieux (voir par exemple les divers numéros de *Civic Public Works*), principalement en fonction de la température et de la neige, ils représentent un facteur de dépenses important pour toutes les administrations provinciales et locales du pays. On peut se faire une idée de l'ordre de grandeur des dépenses encourues en considérant par exemple le coût des produits de déglaçage. Chaque année, les équipes de voirie provinciales et municipales épandent 4 millions de tonnes de sels déglaçants dans tout le Canada (Samuels, 1989), à un coût type de 35-40 dollars la tonne.

Les dépenses annuelles varient selon les conditions météorologiques. Par exemple, les coûts d'entretien des routes d'hiver du ministère des Transports de l'Ontario ont chuté de 14 millions de dollars (8 %) de 1993-1994 à 1994-1995. Cette baisse a été attribuée à des températures plus douces que les moyennes saisonnières en décembre et en janvier, à des précipitations de pluie supérieures à la moyenne et à de faibles chutes de neige en 1994-1995 (Mortsch, 1995). Diverses études ont servi à élaborer des équations de régression permettant de résumer les rapports empiriques entre les activités et les coûts d'entretien des routes d'hiver, d'une part, et des variables météorologiques clés, d'autre part (Cohen, 1981; McCoy 1993; McCabe, 1995; Cornford et Thornes, 1996). Les résultats varient en partie à cause de différences dans les variables de température et des précipitations utilisées et aussi à cause de l'échelle temporelle et spatiale des analyses, mais il est clair que des hivers plus doux signifient une diminution des coûts.

Il n'est donc pas surprenant que le groupe IBI (1990) ait suggéré que l'un des principaux impacts du réchauffement planétaire serait une réduction notable des activités et des dépenses d'entretien d'hiver dans le sud du Canada, où un hiver plus court devrait correspondre à de plus faibles précipitations de neige. Le groupe a également noté que, dans le centre du pays, les avantages d'un hiver plus court pourraient être annulés par de plus fortes chutes de neige. Le rapport ne fournit pas d'évaluations quantitatives, mais deux mémoires de maîtrise présentent certaines indications concernant l'importance des économies possibles à deux endroits en Ontario. McCabe (1995) a étudié l'utilisation du sel sur les routes relevant de la communauté urbaine de Toronto. À l'aide d'une analyse de sensibilité fondée sur les résultats de deux MCG, l'auteur estime que le changement climatique réduirait de 17 à 71 % l'utilisation de sel (en nombre de tonnes). McCoy (1993) a étudié certaines routes provinciales de l'Ontario dans les comtés de Bruce et de Grey, et il a estimé qu'un réchauffement de 3,5 °C rendrait possible une réduction du sel d'environ 35 % et une réduction du sable de 55 %. Ces études ne sont pas définitives, mais il s'agit des premières tentatives de quantification des économies possibles dues au changement climatique pour les activités d'entretien des routes d'hiver.

### *Mobilité et autres effets opérationnels*

Les réseaux de transport existent pour faciliter la mobilité; il est donc normal qu'on s'intéresse depuis longtemps aux perturbations des activités de transport liées aux conditions météorologiques. Or, les études scientifiques et les médias tendent à mettre l'accent sur les événements extrêmes. On pense, par exemple, aux tempêtes d'hiver qui ont paralysé la côte sud de la Colombie-Britannique du 22 décembre 1996 au 3 janvier 1997, entraînant des pertes économiques de près de 200 millions de dollars (Pan Pacific Communications, 1997), et au blizzard d'avril 1997 qui a coûté des millions de dollars aux entreprises de camionnage du sud du Manitoba. Il est certain que la mobilité des Canadiens est entravée par de nombreux événements météorologiques qui occasionnent, en fait, toute une cascade de perturbations (de Freitas, 1975). Malheureusement, la plupart du temps, on ne dispose d'évaluations quantitatives des coûts connexes que pour les plus graves d'entre eux.

La consommation de carburant varie aussi selon les conditions météorologiques. La température influe sur le temps nécessaire au réchauffement des véhicules et sur le rendement énergétique général du carburant, bien qu'une différence de quelques degrés n'ait probablement pas d'effets importants (Moreno *et al.,* 1996). Par ailleurs, des températures plus chaudes pourraient accroître l'utilisation des systèmes de climatisation des véhicules, ce qui aurait pour effet d'augmenter de façon notable la consommation de carburant, comme le montre une étude américaine réalisée par Titus (1992).

### *Sécurité*

Les accidents de transport constituent un grave problème au Canada et dans la plupart des autres pays. Les accidents routiers sont la principale cause de la diminution de l'espérance de vie en Amérique du Nord (Evans, 1991); au Canada, les coûts connexes totaux s'élèvent à des milliards de dollars (MTO, 1994). Bien qu'il soit difficile de comparer les taux d'accidents des différents

**Tableau 8.34 Accidents de transport, moyennes de 10 ans**

| Mode (dernière année) | Accidents | Mortalités |
|---|---|---|
| **Transport routier (1993)[a]** | 183 667 | 3 986 |
| **Transport ferroviaire (1994)[b]** | 1 028 | 120 |
| **Transport aérien (1994)[c]** | 522 | 167 |
| **Transport maritime (1994p)[d]** | 958 | 51 |
| **Transport par pipeline (1994p)[e]** | 10 | inf. à 0,5 |

p Valeurs préliminaires.
a Collisions signalées ayant causé des mortalités ou des blessures.
b Transporteurs ferroviaires sous réglementation du gouvernement fédéral seulement.
c Tous les aéronefs civils immatriculés au Canada (non militaires) volant partout dans le monde et aéronefs d'autres pays volant au Canada.
d Tous les bateaux naviguant dans les eaux canadiennes et tous les bateaux immatriculés au Canada ou titulaires d'une licence canadienne partout dans le monde (sauf les embarcations de plaisance).
e Oléoducs et gazoducs régis par les lois du gouvernement fédéral seulement.
Source : Nix, 1995, 20. D'après des données du Bureau de la sécurité des transports du Canada et de Transports Canada.

modes de transport des voyageurs, la route est celui qui cause le plus de préoccupations à cause de l'ampleur absolue du problème (tableau 8.34).

Pour une collision routière donnée, il est difficile de faire la part des conditions météorologiques (p. ex., pluie ou neige, vent, brouillard, éblouissement, stress thermique) par rapport aux autres facteurs qui ont joué un rôle. Néanmoins, l'ensemble des statistiques montrent clairement que les conditions météorologiques constituent un facteur de risque important. En 1995, environ 20 % de toutes les collisions ayant entraîné des blessures au Canada sont survenues lors de précipitations (tableau 8.35), bien que, dans de nombreuses régions du Canada, il n'y ait des précipitations que 10 à 15 % du temps. Ces chiffres semblent indiquer que les taux d'accident sont plus élevés pendant les précipitations de pluie et de neige, ce qui a d'ailleurs été confirmé par des études approfondies effectuées par Mende (1982) pour la communauté urbaine de Toronto, ainsi que par Andrey (1989; Andrey et Olley, 1990; Andrey et Yagar, 1993) pour plusieurs villes de l'Alberta. Les résultats de ces études révèlent que les taux d'accidents augmentent de 40 à plus de 300 % au cours des précipitations, les plus fortes augmentations étant notées pour les collisions responsables de dommages aux biens, avec des valeurs moindres pour celles qui causent des mortalités. Toutefois, les résultats de ces études ne permettent pas de faire des projections concernant les impacts probables sur la sécurité des tendances modifiées des précipitations. La raison en est que, dans certains cas, les risques sont plus élevés sous la neige que sous la pluie et, en d'autres occasions, on observe la tendance inverse. Andrey (1989) a tenté de construire un modèle logique pour expliquer le risque relatif de collision d'après les différentes caractéristiques des orages, mais les résultats n'étaient pas concluants. Il semble que de nombreuses variables, en plus des conditions météorologiques, influent sur les tendances des accidents, notamment le temps du jour, le lieu, le conducteur, le véhicule et la route. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les risques associés aux conditions météorologiques, ainsi que les comportements d'adaptation des conducteurs face à ces dangers.

Dans la documentation sur le changement climatique, il ne semble pas y avoir d'études approfondies portant sur la question de la sécurité des transports. Il s'agit d'une grave lacune (Andrey, 1990), étant donné que le changement climatique peut modifier de bien des façons les conditions de la route.

**Tableau 8.35 Nombre de collisions routières, 1995, par condition météorologique**

| Condition météorologique | Collisions mortelles | Collisions avec blessures |
|---|---|---|
| **Temps clair (ensoleillé ou nuageux)** | 2 302 | 127 306 |
| **Brouillard, bruine, smog, poussière ou fumée** | 48 | 1 582 |
| **Pluie** | 232 | 19 433 |
| **Neige, verglas, grêle ou grésil** | 221 | 13 396 |
| **Autre/non indiquée** | 48 | 2 382 |
| **Total** | 2 851 | 164 099 |

Source : Transports Canada, TP3322, Statistiques des accidents de la route au Canada, 1995

### *Transport ferroviaire*

Les chemins de fer, dont la part annuelle du transport des marchandises est comprise entre 250 et 300 milliards de tonnes/km, sont le principal mode de transport terrestre au Canada. Le changement climatique expose l'infrastructure ferroviaire à certains des risques notés pour le transport routier. Par exemple, Ross et Wellisch (1997) ont fait remarquer que des précipitations accrues pourraient augmenter les épisodes d'inondations et d'affouillement dans l'ouest du Canada, perturbant ainsi le transport du charbon par voie ferrée. En effet, il y a déjà eu plusieurs glissements de terrain causés par les pluies, notamment un cas de glissement boueux en 1997 dans le canyon Fraser, qui a emporté un tronçon de la voie ferrée du CN près de Lytton, et causé le déraillement d'un train de marchandises et la mort de deux cheminots (*Vancouver Sun*, 21 et 26 mars 1997). De plus, dans certaines zones côtières du Canada atlantique, on a d'assez bonnes raisons de croire qu'une hausse du niveau de la mer pourrait causer de fortes perturbations dans les réseaux ferroviaires (Martec Ltd., 1987). Cependant, sauf dans le cas des rapports soulignant les effets directs possibles sur l'infrastructure ferroviaire d'événements géophysiques extrêmes reliés aux conditions climatiques, on note l'absence quasi complète d'études sérieuses pour ce qui est des impacts du changement climatique sur les opérations ferroviaires au Canada. Il s'agit là d'une grave lacune dans la littérature sur le changement climatique, étant donné que ces activités sont fortement influencées par le climat, et surtout par les conditions rigoureuses de l'hiver canadien. Entre autres choses, les basses températures augmentent l'incidence des défectuosités et des bris de matériel, ainsi que le gel d'aiguillages; par ailleurs, les fortes chutes de neige augmentent les coûts de l'entretien des voies ferrées et le gel peut entraîner des pannes de signalisation. De plus, les conditions hivernales augmentent l'usure des roues et imposent une diminution du nombre des wagons, ainsi que des ralentissements temporaires. En somme, l'hiver augmente les coûts d'exploitation et la probabilité de retard et/ou de déraillement.

Il n'est donc pas surprenant que les compagnies ferroviaires aient élaboré des plans et des procédures pour faire face aux conditions météorologiques hivernales. Les informations ci-dessous fournies par le CN (Darby, 1997) donnent un aperçu de leur plan d'exploitation d'hiver, ainsi que de certains coûts connexes :

- On effectue une inspection des voies ferrées, notamment par des techniques ultrasoniques, afin de repérer et de réparer les défectuosités des voies ferrées.

- On tente d'améliorer la conception du matériel (p. ex., en utilisant des socs frontaux à balais afin de mieux dégager les ornières) et d'optimiser son utilisation (p. ex., utilisation de jets d'air chaud plutôt que des jets d'air froid pour le déneigement).

- On met en oeuvre des programmes d'enlèvement de la neige (environ 5,5 millions de dollars pour l'hiver 1996-1997) et on effectue des épandages de sable et de sel.

- On surveille l'usure des roues et on remplace les roues usées; p. ex., 9 000 paires de roues ont été changées en février 1997.

- On donne des consignes de ralentissement temporaire (réduction des vitesses de croisière pouvant atteindre jusqu'à un tiers) lorsque la température tombe à des valeurs inférieures à – 20 °C.

- On a prévu des procédures pour réduire au minimum les perturbations au cours des tempêtes de neige, avec différents niveaux d'intervention selon la force des tempêtes.

- Le plan d'exploitation d'hiver est constamment amélioré; p. ex., on tient des ateliers pratiques, on forme le personnel, on examine la pertinence de l'emplacement et de l'état de préparation du matériel d'enlèvement de la neige, et on effectue des contre-vérifications des procédures prévues pour l'hiver et les tempêtes.

Étant donné l'impact négatif du climat actuel sur les opérations ferroviaires au Canada, il n'est pas surprenant que le groupe IBI (1990) ait suggéré que l'un des grands avantages du changement climatique serait une diminution des coûts d'entretien d'hiver pour les entreprises ferroviaires. Même si l'on ne dispose pas des informations nécessaires pour évaluer quantitativement ces économies potentielles, on s'entend assez bien sur l'orientation de ces impacts.

Le rapport du groupe IBI (1990) a aussi signalé plusieurs autres impacts possibles du changement climatique dans le secteur ferroviaire, mais un examen plus attentif permet de croire que ces problèmes ne sont pas sérieux. D'abord, le groupe note que des températures plus douces diminueraient l'efficacité énergétique des moteurs. Toutefois, après des consultations avec l'industrie, nous croyons que cet effet serait peu important et qu'une amélioration technologique des moteurs aura un impact plus important sur le rendement énergétique que le changement climatique (Darby, 1997). Un deuxième impact possible signalé par le groupe IBI concerne le retrait vers le nord du pergélisol; il croit que cela pourrait changer les conditions des talus, ce qui aurait pour effet soit d'augmenter, soit de diminuer les coûts des infrastructures. Actuellement, les tronçons de voies ferrées au-dessus du pergélisol sont courts; la seule ligne du CN de ce type est celle de Churchill, qui va jusqu'à la baie d'Hudson. En outre, l'avenir à long terme de ces lignes éloignées dépendra beaucoup plus de la demande de services de transport et des occasions de transport multimodal que du climat ou du terrain. Ainsi, il est peu probable que des changements touchant le pergélisol auront des effets significatifs sur l'exploitation des chemins de fer au Canada. Enfin, le groupe IBI a indiqué que les changements, produits par le climat, touchant la production de céréales, les tendances des peuplements et les autres opérations de transport

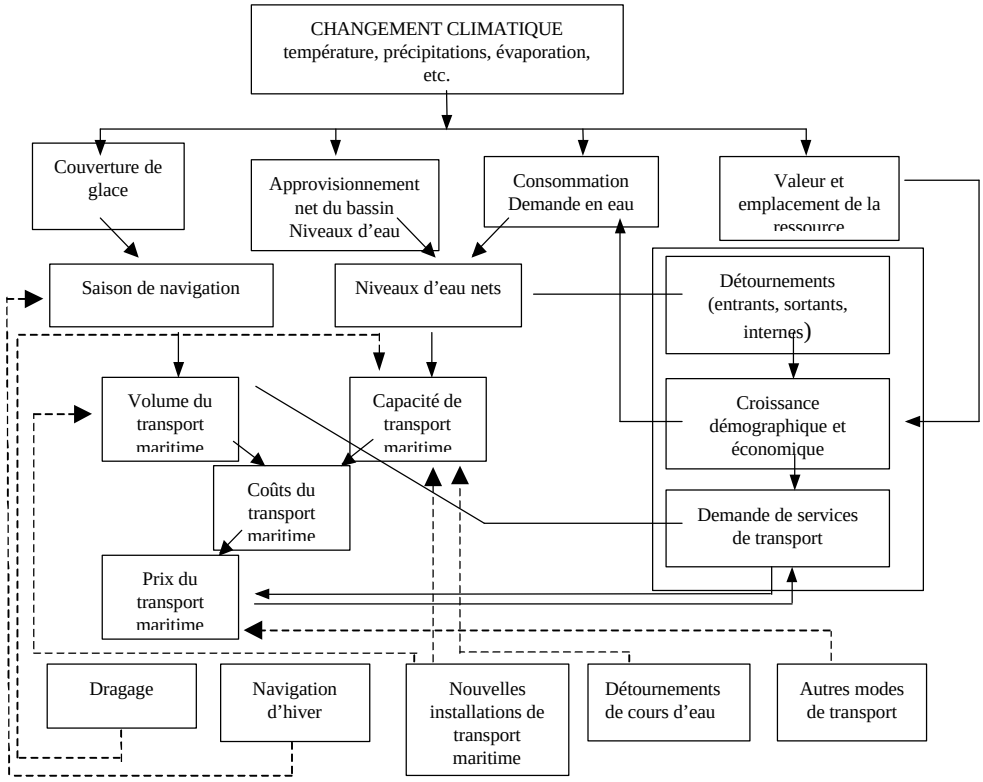
auraient des impacts sur l'exploitation des chemins de fer. On examine plus loin dans cette section ces impacts indirects, encore très hypothétiques.

### *Transport maritime*

### *Grands Lacs et Saint-Laurent*

Comme on l'a mentionné dans la section sur le secteur du transport canadien, dans le réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent, le transport maritime compte pour une part significative des activités maritimes au Canada et, comme il s'agit d'une voie navigable intérieure, ce réseau est très sensible aux niveaux d'eau. Le chapitre sur les ressources en eau de l'ÉPC résume les impacts possibles du changement climatique sur l'hydrologie du réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Bien que les estimations varient d'une étude à l'autre, on s'entend pour dire que le changement climatique prévu par les MCG diminuerait significativement l'approvisionnement net du bassin, ce qui entraînerait un réduction des niveaux et des écoulements d'eau. On a consacré moins d'attention aux impacts du réchauffement futur sur la couverture glacielle, mais selon certaines constatations empiriques, le changement climatique réduirait également l'étendue spatiale et temporelle de la glace des lacs (Assel, 1991; Marchand *et al*., 1988). Ces changements physiques ont des répercussions sur la navigation, comme le montre le modèle théorique de la figure 8.1.

**Figure 8.1 Cadre théorique des impacts du changement climatique sur la navigation commerciale dans les Grands Lacs**




**Source :** Marchand *et al*., 1988, 114

Pour ce qui est des impacts du changement climatique, la première étude sérieuse mettant l'accent sur la navigation dans les Grands Lacs a été effectuée par le Great Lakes Institute de l'Université de Windsor (1986). Les résumés de ces travaux sont publiés dans les études de Marchand *et al*. (1988) et de Sanderson (1987), et on les mentionne dans presque tous les sommaires des impacts du changement climatique touchant les ressources en eau et la navigation au Canada.

Cette étude combinait les résultats de plusieurs modèles climatiques, hydrologiques et socio-économiques, afin d'estimer les impacts possibles d'un scénario de changement climatique sur le transport maritime dans les Grands Lacs. On a utilisé un modèle économique complexe de transport maritime (type modifié du modèle ILER, 1981) afin de déterminer pour chaque mois le niveau d'eau disponible pour le transport maritime par chacune des routes commerciales du réseau, d'après les profondeurs d'eau disponibles pour un régime donné de niveau d'eau des lacs. Ces niveaux d'eau sont convertis en capacités de chargement des bateaux à partir desquelles on calcule le nombre de voyages requis pour transporter diverses cargaisons. Ces calculs tiennent compte de la composition de la flotte, des caractéristiques des bateaux, des vitesses de croisière, du temps de déchargement, des limites de franc-bord et d'autres caractéristiques d'exploitation du réseau (Marchand *et al*., 1988, 123).

On a examiné cinq scénarios de coûts de transport maritime : un pour le milieu des années 70 (année de base pour les comparaisons), un pour des conditions sans changement climatique, mais avec des prévisions économiques jusqu'à l'an 2035, et trois qui utilisent le scénario climatique GISS $2xCO_2$ (un scénario à conditions économiques statiques, un autre à prévisions économiques et un troisième à prévisions économiques avec une consommation d'eau accrue et une saison de transport maritime prolongée grâce à la réduction de la couverture glacielle). Les résultats des simulations, résumés au tableau 8.36, semblent indiquer que les coûts annuels moyens de transport maritime des compagnies maritimes canadiennes des Grands Lacs, pour les quatre principaux produits (minerai de fer, céréales, charbon et calcaire), augmenteraient de 5 à 30 % (selon le scénario), et les coûts de transport maritime types seraient égaux ou supérieurs à ceux de la période des valeurs basses records des niveaux d'eau de 1963-1965.

**Tableau 8.36 Coûts annuels moyens de navigation - Flotte canadienne** (millions de dollars US de 1979)

| Scénario | Minerai de fer | Céréales | Charbon | Calcaire | Total | % des années dépassant les niveaux de 1963-1965 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Base de comparaison** | 78,75 | 77,25 | 31,38 | 9,60 | 196,97 | 10 |
| **Prévisions économiques** | 76,29 | 68,03 | 50,34 à 82,44 | 7,58 | 202,25 à 234,34 | 10 |
| **Changement climatique, conditions économiques statiques** | 83,98 | 80,08 | 33,15 | 9,67 | 206,88 | 69 |
| **Changement climatique, prévisions économiques** | 82,84 | 72,83 | 53,61 à 87,78 | 8,04 | 217,32 à 251,49 | 66 |
| **Changement climatique, prévisions économiques** + + + | 86,55 | 75,56 à 75,68 | 55,93 à 91,58 | 8,34 | 226,38 à 262,16 | 97 |

**Source :** Marchand *et al*., 1988, 126-127

Une étude plus récente de Millerd (1996) présente une autre évaluation des impacts du réchauffement planétaire sur la navigation dans le réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent. On a simulé les impacts hydrologiques d'un doublement du $CO_2$ en combinant les résultats des MCG canadiens avec ceux d'un modèle de ruissellement et d'autres techniques mises au point au Great Lakes Environmental Research Laboratory. Cette analyse était basée sur les activités de transport des marchandises de la flotte canadienne des Grands Lacs, notamment sur les envois entre des ports canadiens, et entre des ports canadiens et américains. On s'est concentré sur les produits en vrac importants comme les céréales, le minerai de fer, le charbon, le calcaire et d'autres. On a relevé les conditions de certains envois afin de vérifier si des niveaux d'eau simulés pouvaient restreindre quantitativement la cargaison qui peut être chargée et expédiée. Les résultats ont indiqué que le scénario de changement climatique avait un impact négatif significatif sur la navigation commerciale et que l'impact annuel moyen atteignait plus de 2 millions de dollars, dont 90 % étaient reliés à des envois de céréales et de charbon.

Diverses autres études ont produit des simulations des niveaux et des débits d'eau selon divers scénarios de changement climatique (Hartmann, 1990a), mais ces modèles de processus physiques n'ont pas été intégrés aux modèles socio-économiques des activités et des coûts de transport. De plus, on n'a pas tenté de comprendre les impacts des faibles niveaux d'eau antérieurs sur la navigation dans les régions des Grands Lacs et du Saint-Laurent (p. ex., Bergeron (1995) s'est intéressé au port de Montréal, un important port à conteneurs; Koshida et Brotton (1997) ont examiné les causes et les impacts des faibles niveaux d'eau des années 60 dans les Grands Lacs), mais il est difficile d'extrapoler ces études de façon à obtenir une estimation des impacts du changement climatique à l'échelle de tout le système. Néanmoins, ces études et d'autres (p. ex., Slivitzky, 1993) mettent en évidence certains impacts possibles du changement climatique sur la navigation, ainsi que certains points vulnérables connexes. Les discussions mettaient l'accent sur les conséquences économiques de l'obligation de faire plusieurs voyages pour expédier la même cargaison à cause de tirants d'eau réduits, sur la possibilité de reflux du trafic aux goulots d'étranglement du réseau, (p. ex. le canal Welland), sur la non-viabilité de certains ports et sur la probabilité d'une augmentation des activités de dragage, qui ont des conséquences économiques et écologiques. On estime que l'allongement de la saison de navigation (peut-être jusqu'à 11 mois, contre 8,5 mois actuellement) (Marchand *et al*., 1988) contribuerait à l'amélioration des conditions d'utilisation des bateaux et à un empilement moindre des stocks (Hartmann, 1990b), mais, à ce jour, il semble peu probable que cela puisse compenser les effets négatifs des faibles niveaux d'eau.

### *Régions côtières et du nord*

Très peu de recherches ont porté sur les impacts du changement climatique sur la navigation côtière, ce qui peut être dû au fait qu'on ne s'attend pas à des effets négatifs sérieux. Comme on l'a noté dans le rapport sur le Canada atlantique de Stokoe (1988, 4), comparés aux autres facteurs influant sur le volume des expéditions et sur les activités portuaires, les impacts directs du changement climatique devraient être mineurs. En effet, comme Stokoe (1988) l'a suggéré, une hausse du niveau de la mer pourrait favoriser la tendance à l'utilisation de gros bateaux à plus forts tirants d'eau, et des eaux exemptes de glaces dans le golfe du Saint-Laurent et sur la côte de l'Atlantique rendraient possibles des diminutions des coûts d'endommagement des bateaux par les

glaces, ainsi que des coûts d'utilisation des brise-glaces de la Garde côtière canadienne, deux secteurs qui atteignent des dizaines de millions de dollars chaque année.

Dans le nord, le changement climatique améliorerait presque certainement les possibilités de navigation côtière, comme le montrent des études effectuées dans la région de la mer de Beaufort. McGillivray *et al*. (1993) ont utilisé des MCG et une méthode d'analogies historiques pour examiner les impacts du changement climatique sur le régime des glaces de la mer de Beaufort et ses incidences sur l'industrie pétrolière de l'Arctique. Leurs résultats indiquent qu'une plus grande étendue d'eau libre en été, combinée à une saison d'eau libre plus longue et à de la glace de mer de première année plus mince, rendrait possible l'allongement de la saison de navigation dans l'Arctique, ce qui pourrait augmenter la rentabilité des pétroliers pour l'industrie pétrolière (Goos et Wall, 1994). De même, Anderson *et al*. (1994) croient qu'un été plus long se traduirait par un plus grand nombre de jours sans glace, non seulement dans la mer de Beaufort, mais aussi dans le Mackenzie, qui joue un rôle vital comme voie de transport entre la région de Great Slave et le delta du Mackenzie.

Cependant, en plus de ces avantages possibles, une hausse du niveau de la mer pourrait causer des dommages à l'infrastructure utilisée pour le transport maritime, comme l'indiquent des études de la région de l'Atlantique, par exemple, aux chantiers navals de Saint John et aux cales sèches de la baie Courtenay (N.-B.) (Martec Ltd., 1987), ainsi qu'au terminal maritime principal et aux quais de la Garde côtière de Charlottetown (Î.-P.-É) (Lane and Associates Ltd., 1988). Il existe aussi de nombreuses incertitudes concernant les impacts du changement climatique sur les icebergs (p. ex., Brown, 1993) et sur les tempêtes, qui pourraient bien toucher les opérations maritimes et la sécurité.

***Transport aérien***

De tous les modes de transport, le transport aérien est celui qui requiert les applications climatologiques les plus complexes et à long terme. En effet, au cours de la première moitié du vingtième siècle, la vulnérabilité des voyages aériens face aux conditions météorologiques a été l'un des principaux facteurs qui ont contribué au développement de la météorologie, en particulier des prévisions (Critchfield, 1983). Malgré des capacités de prévision améliorée et d'importantes améliorations technologiques en aviation, il est clair que les conditions météorologiques continuent à jouer un rôle important pour ce qui est des opérations et des coûts du transport aérien, ainsi que des accidents. (Thornes, 1992). Il n'est donc pas surprenant que Perry (1993) soit d'avis que l'aviation est le mode de transport le plus sensible au changement climatique.

Malgré cela, on ne trouve que très peu de littérature sur les impacts, généraux ou propres au Canada, du changement climatique sur l'aviation. Deux des questions abordées dans la littérature sur le changement climatique (p. ex., groupe IBI, 1990; Perry, 1993) concernent la possibilité que les charges utiles doivent être réduites les journées chaudes à cause de la plus faible densité de l'air et des possibilités d'endommagement de certaines pistes d'atterrissage des régions nordiques à cause de changements au niveau du pergélisol (voir le volume régional sur l'Arctique).

On peut obtenir d'autres informations quant aux impacts du changement climatique sur le transport aérien en examinant les vulnérabilités actuelles. Pour ce qui est de l'exploitation, il est clair que les intempéries peuvent occasionner des retards, ce qui est souvent vérifié. En se basant sur les données de Statistique Canada, Barron (1983, 2) a conclu que les lignes aériennes canadiennes ont perdu plus de 8 millions de dollars en 1981 à cause de vols perturbés, surtout du fait des conditions météorologiques. Récemment, en 1996, une tempête d'hiver a paralysé les transports maritimes, aériens et terrestres dans toute la région de Vancouver-Victoria pendant la fin de semaine de Noël (*Vancouver Sun*, 30 décembre 1996).

La sécurité est aussi une importante préoccupation. Les facteurs de risque liés aux conditions météorologiques qui touchent la sécurité aérienne sont notamment la friction superficielle des pistes (p. ex., Biggs *et al.*, 1991), les problèmes de givrage de la voilure des avions, la visibilité atmosphérique et la turbulence de l'air. En effet, on connaît beaucoup d'exemples d'écrasements d'avions attribuables au moins en partie à des facteurs météorologiques (p. ex., l'écrasement mortel d'un Cessna près de Flin Flon, en janvier 1996; Owen, 1996).

### *Pipelines*

Comme on l'a noté pour le volume régional de l'Arctique et dans le chapitre sur le secteur de l'énergie, les pipelines du Canada sont vulnérables aux changements de température et des précipitations, car ceux-ci ont une influence sur le pergélisol, les débits des cours d'eau et les glissements de terrain. Cependant, on n'a trouvé aucun inventaire détaillé des lignes qui pourraient être touchées.

### *Impacts indirects*

À cause des nombreux facteurs qui touchent l'offre et la demande de services de transport, il est impossible de prévoir avec un quelconque degré de confiance l'état de ce secteur dans 50 ans, ou même dans 20 ans. Pour ce qui est du changement climatique, on convient généralement que les mesures d'atténuation devraient entraîner des changements encore plus grands dans les transports, spécialement en ce qui a trait à la répartition multimodale et à la conception des véhicules, que les impacts combinés directs et indirects d'un climat altéré.

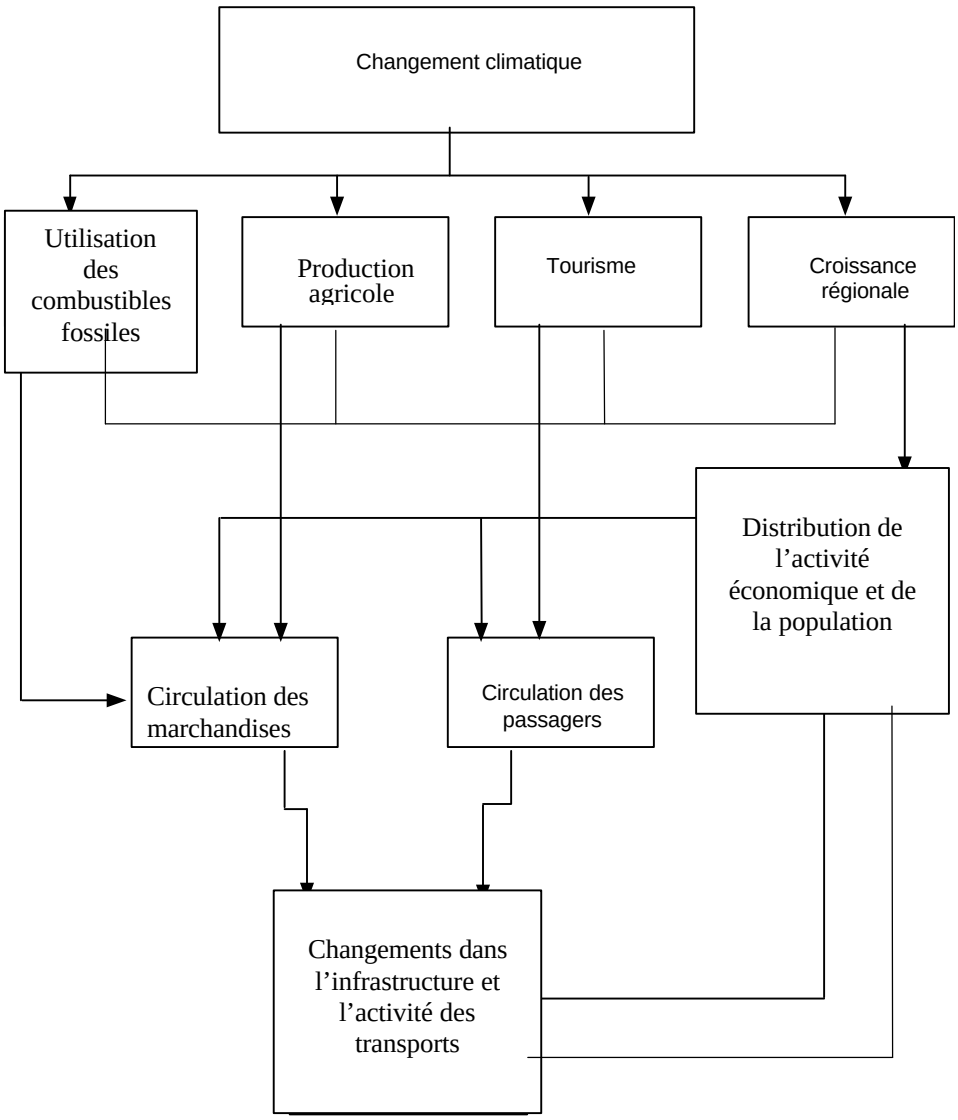
Ceci dit, il est intéressant d'examiner les types d'impacts indirects que pourrait avoir un climat altéré sur les activités de transport. Le rapport du GIEC (Moreno *et al.*, 1996) présente un cadre de travail pour l'examen des impacts indirects du changement climatique sur le transport (figure 8.2). L'un des impacts du changement climatique sur le transport pourrait prendre la forme de changements dans les tendances de la production, surtout dans le cas des produits provenant de ressources sensibles au climat comme les produits agricoles et forestiers. Alors que beaucoup de recherches ont examiné les impacts biophysiques du climat sur les rendements des cultures et sur la productivité forestière, on peut difficilement extrapoler ces impacts de premier ordre à l'offre et à la demande de services de transport au Canada.

Malgré le manque de travaux de recherche sur ce problème, beaucoup sont d'avis que le changement climatique pourrait avoir des impacts importants sur les activités de transport au

Canada (p. ex., Black, 1990; Moreno *et al.*, 1996). Ces opinions semblent fondées, du moins en partie, sur les commentaires du groupe d'étude IBI (1990, 5) :

Le changement les plus significatif sur la demande de services de transport pourrait être dû à une expansion vers le nord des activités agricoles, forestières et minières, ce qui entraînerait une augmentation de la population et des tendances accrues de peuplement dans le centre du pays et même dans l'Arctique. Les modes de transport maritime, routier, ferroviaire et aérien devraient accroître leurs infrastructures et leurs services en conséquence; alors que ces opérations entraîneraient d'importants frais d'investissement et d'exploitation, elles représenteraient, par contre, une occasion profitable sur le plan économique, étant donné qu'on peut s'attendre à ce que les revenus d'une augmentation du trafic nordique dépassent de beaucoup les coûts accrus.

**Figure 8.2 Impacts indirects du changement climatique sur le transport**




**Source :** Moreno *et al.*, 1996, 380

Alors qu'il est raisonnable de prévoir, à l'échelle mondiale, certaines redistributions de la population dues au climat à cause des inondations côtières, des disettes et d'autres stress, il semble simpliste de croire que des migrations des écotones du Canada entraîneraient des modifications importantes des tendances de peuplement. Ce type de déterminisme environnemental ne correspond pas aux antécédents historiques du peuplement et du transport au Canada. En effet, au cours des trois dernières décennies, on a observé des concentrations accrues de populations et d'infrastructures dans les régions urbaines du sud. Comme l'a noté Jackson (1990, 99-100), il semble difficile de ne pas considérer comme illusoire un tel changement dans les tendances de peuplement. Par contre, il semble plus probable que les principaux impacts du réchauffement planétaire sur les réseaux de transport et les déplacements des personnes seront observés là où la population est déjà concentrée, surtout dans les grandes villes qui sont présentement accoutumées à de fortes précipitations de neige pendant une longue saison d'hiver. En d'autres termes, les effets d'un territoire physiquement modifié sur les tendances futures du peuplement au Canada dépendront de bien des facteurs (Bone *et al*., 1994b), et nous ne sommes pas en mesure de faire des projections fiables. Nos connaissances des impacts du changement climatique sur les tendances des activités humaines, même celles des touristes et d'autres résidents temporaires, sont très limitées (Moreno *et al*., 1996). Nous avons vraiment besoin d'autres études portant sur les impacts indirects du changement climatique et sur les mesures d'atténuation de ces impacts touchant la demande de services de transport, par exemple les mesures de contrôle du transport (MCT); il s'agit d'un domaine d'étude prioritaire pour les années à venir.

## ADAPTATION AUX CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET CLIMATIQUES

Les industries du transport, les organismes gouvernementaux et le public canadien consacrent des efforts considérables et des sommes substantielles à la réduction des risques de retard ou d'accident dus aux intempéries (Herbert et Burton, 1995). On peut trouver des informations détaillées sur ces nombreuses mesures d'adaptation dans les journaux scientifiques, les comptes rendus des conférences, les rapports techniques, les manuels, les directives d'exploitation, les procès-verbaux d'enquêtes et d'autres audiences, ainsi que dans les reportages des médias. Il y a déjà eu certaines tentatives visant à résumer les influences des conditions météorologiques sur les infrastructures et les activités de transport (p. ex., Perry et Symons, 1991; Thornes, 1992), mais il n'existe pas d'inventaire complet des mesures d'adaptation et de leurs coûts et avantages pour les Canadiens.

La sensibilité aux conditions météorologiques se reflète dans la conception, la construction et l'entretien des routes, des lignes de chemin de fer, des pistes d'atterrissage, des ports et des pipelines. Par exemple, les précipitations ont un impact sur les décisions concernant le drainage, la texture et la rugosité de la surface des routes; de plus, les conditions de vent et de brouillard influent directement sur la sélection des sites d'aéroport et l'orientation des pistes. La prise en compte des conditions météorologiques est également évidente dans la conception des véhicules et dans les normes qui les régissent. Par exemple, la *Loi sur la sécurité des véhicules automobiles* prescrit diverses normes visant la conception et le rendement de tous les véhicules automobiles vendus au Canada (Myers, 1997); le meilleur exemple d'une norme reliée aux conditions météorologiques est peut-être la norme NSVAC n° 103, Pare-brise, dégivrage et désembuage.

Les conditions temporelles et spatiales des activités de transport, ainsi que diverses autres de leurs modalités, sont également sensibles aux conditions météorologiques. Les directives d'exploitation ferroviaire sous forme de « tables de température » et les programmes éducatifs de formation à l'intention des conducteurs de véhicules automobiles sont deux exemples de mesures d'adaptation aux climats actuels. Il y a d'autres exemples comme les prévisions météorologiques et les recommandations concernant l'état des routes qui permettent aux responsables de l'entretien ou de l'exploitation des réseaux de transport de prendre des décisions éclairées. Il y a, bien entendu, de nombreuses autres mesures d'adaptation qui sont utilisées ou qui pourraient l'être.

Cependant, on sait peu de choses sur l'efficacité de bon nombre de ces mesures d'adaptation, surtout pour ce qui est de leur réponse particulière aux conditions ou aux prévisions météorologiques. Il n'y a que peu d'études canadiennes qui illustrent la gamme des ajustements chez les propriétaires et les conducteurs de véhicules automobiles. Par exemple, Guerriero (1995) a noté que le choix du mode de transport peut être influencé par les conditions météorologiques hivernales, car, pour se protéger des éléments, les gens ont tendance à conduire plutôt qu'à marcher lors des tempêtes de neige. Les résultats de cette étude concordent avec ceux de Changnon concernant les conditions de pluie à Chicago (1996). De plus, Andrey et Knapper (1993), ainsi que Doherty *et al*. (1993), ont constaté que les conducteurs annulent parfois des voyages et ajustent souvent leur vitesse de croisière lors d'intempéries, mais l'importance de ces corrections est difficile à mesurer et leur rôle dans la réduction des risques d'accident est mal compris. Il faut donc des recherches supplémentaires sur la réaction des humains face aux dangers reliés aux conditions météorologiques et sur l'utilisation qu'ils font des informations météorologiques.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Brenda Bradley et Craig Shillabeer du Département de géographie de l'Université de Waterloo pour leur aide lors des recherches menant à ce rapport. Nous désirons aussi remercier Bob Ballantine, Association des chemins de fer du Canada; Mike Darby, CN Rail; Sean Doherty, Département de génie civil, Université de Toronto; Brian Mills, Groupe de recherche sur l'adaptation climatique d'Environnement Canada; Marie Sanderson, The Water Network, Université de Waterloo; et Tony Shaw, Département de géographie, Université Brock, qui ont fait la relecture d'une partie ou de l'ensemble de ce document et fourni leurs conseils.

## REFERENCES

Administration de la voie maritime du Saint-Laurent (1996). *Rapport annuel 1995-1996*, Administration de la voie maritime du Saint-Laurent, Cornwall (Ont.).

Administration de la voie maritime du Saint-Laurent (1997). http://www.seaway.ca/

Anderson, W.P., DiFrancesco, R. et Kliman, M. (1994). « Potential impacts of climate change on petroleum production in the Northwest Territories », dans *Mackenzie Basin Impact Study - Interim Report #2*, S.J. Cohen (dir.), *Proceedings of the Sixth Bienniel AES/DIAND Meeting on Northern Climate & Mid Study Workshop of the Mackenzie Basin Impact Study held April 10-14, 1994, Yellowknife, NWT*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 433-441.

Andrey, J. (1989*) Relationships Between Weather and Road Safety*, thèse inédite de doctorat, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 285 p.

Andrey, J. (1990). « Working Group Report on Energy and Transportation », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources. Proceedings of an International Symposium/Workshop. Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 237-238.

Andrey, J. et Knapper, C. (1993). *Weather Hazards: Driver Attitudes and Driver Education*, Final Report to the Ministry of Transportation of Ontario, Downsview (Ont.), 50 p.

Andrey, J. et Olley, R. (1990). Relationships between weather and road safety: past and future research directions, *Climatological Bulletin*, 24:124-137.

Andrey, J. et Yagar, S. (1993). A temporal analysis of rain-related crash risk, *Accident Analysis and Prevention*, 25:465-472.

Assel, R. A. (1991). Implications of $CO_2$ global warming on Great Lakes ice cover, *Climatic Change*, 18:377-395.

Barron, D. (1983). We never close ... well, hardly ever, *Transpol*, 6(4):2-3.

Beckmann, L., Dunn, M. et Moore, K. (1997). « Effects of Climatic Change on Coastal Systems in British Columbia and Yukon », dans *Responding to global climate change in British Columbia and Yukon, Vol. I, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, E. Taylor et B. Taylor (dir.), British Colombia Ministry of Environment, Lands and Parks et Environnement Canada, Vancouver (C.-B.), p. 8-1 à 8-26.

Bergeron, L. (1995). *Les niveaux extrêmes d'eau dans le Saint-Laurent: ses conséquences économiques et l'influence des facteurs climatiques*, rapport présenté à Environnement Canada, Services scientifiques, Service de l'environnement atmosphérique, région du Québec, 70 p.

Biggs, D.C., Hamilton, G.B., Owen, K.D.J., McLeish, W. et Reid, L.D. (1991). *Aircraft Take-off Performance and Risks for Wet and Contaminated Runways In Canada*, Mueller International Inc., Ottawa (Ont.).

Black, W.R. (1990). Global Warming Impacts on the Transportation Infrastructure, *Transportation Research News* 150, p. 2-8.

Bone, R.M., McPherson, P.D. et Saku, J.C. (1994). « Settlement Study », dans *Mackenzie Basin Impact Study - Interim Report #2*, S.J. Cohen (dir.), *Proceedings of the Sixth Bienniel AES/DIAND Meeting on Northern Climate & Mid-Study Workshop of the Mackenzie Basin Impact Study held April 10-14, 1994, Yellowknife, NWT*, Environnement Canada, Downsview, p. 399-409.

Brault, M. (1997). « Kilométrage des conducteurs et conductrices du Québec », dans *Proceedings of the Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference*, Toronto (Ont.), p. 139-148.

Brown, R.D. (1993). *Incidences du réchauffement climatique sur les régimes des glaces de mer et des icebergs de la côte est du Canada pendant les 50 à 100 prochaines années, Sommaire du changement climatique SCC 93-03*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 15 p.

Canadian Climate Program Board (1991). *Climate Change and Canadian Projects*, Canadian Climate Centre, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Canadian Urban Transit Association (1995). *Quick Facts On The Canadian Urban Transit Industry* - http://www.cutaactu.on.ca

Changnon, S. (1996). Effects of summer precipitation on urban transportation, *Climatic Change*, 32:481-494.

Chipman, M.L, MacGregor, C., Smiley, A.M. et Lee-Gosselin, M. (1991). « The Role of Exposure in Comparisons of Crash Risk Among Different Drivers and Driving Environments », dans *35th Annual Proceedings of the Association for the Advancement of Automotive Medicine*, Toronto (Ont.), p. 439-450.

Clague, J.J. (1989). Sea Levels on Canada's Pacific Coast: Past and Future Trends, *Episodes*, 12(1):29-33.

Cohen, S.J. (1981). User Oriented Information for Planning a Snow Removal Budget, *Journal of Applied Meteorology*, 20(12):1420-1427.

Cornford, D. et Thornes, J.E. (1996). A Comparison Between Spatial Winter Indices and Expenditures on Winter Road Maintenance in Scotland, *International Journal of Climatology*, 16:339-357.

Critchfield, H.J. (1983). Climate, energy and transportation, *International Journal of Environmental Studies*, 20:149-157.

Darby, M. (1997). Communication personnelle, CN Rail, Winnipeg (Man.).

de Freitas, C. (1975). Estimation of the Disruptive Impact of Snowfall in Urban Areas, *Journal of Applied Meteorology*, 14:1166-1173.

Doherty, S.T., Andrey, J. et Marquis, J. (1993). Driver adjustments to wet weather hazards, *Climatological Bulletin*, 27:154-164.

Environnement Canada (1994). *Canada's National Report on Climate Change*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 144 p.

Environnement Canada (1996). *National Environmental Indicator Series: Canadian Passenger Transportation* - http://www1.ec.gc.ca/~ind/

Evans, L. (1991). *Traffic Safety and the Driver*, Van Nostrand Reinhold, New York (N.Y.), 405 p.

Evans, S.G. et Clague, J.J. (1997). « The Impact of Climate Change on Catastrophic Geomorphic Processes in the Mountains of British Columbia, Yukon and Alberta », dans *Responding to global climate change in British Columbia and Yukon, Vol. I, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, E. Taylor et B. Taylor (dir.), British Colombia Ministry of Environment, Lands and Parks et Environnement Canada, Vancouver (C.-B.), p. 7-1 à 7-16.

Fitzpatrick, P. (1997). Railways are banking on intermodal transport to bring more goods to market, *The Financial Post*, 1er février, p. 12.

Furtado, R.J.C. (1995). « The Evolution of the Canadian Air Carrier Network and Spatial Patterns of Accessibility, 1970-1990 », dans *Transport Planning and Policy Issues: Geographical Perspectives*, J. Andrey (dir.), Waterloo (Ont.), p. 59-88.

Goos, T. et Wall, G. (1994). *Résumé du colloque relatif aux effets du changement climatique planétaire sur la gestion des ressources du Nord. Sommaire du changement climatique SCC 94-02*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 7 p.

Great Lakes Institute (1986). *Socio-economic Assessment of Climatic Change for Navigation and Hydro-electric Power Generation in the Great Lakes-St. Lawrence River System*, rapport final au Service de l'environnement atmosphérique, Université de Windsor, Windsor (Ont.), pages div.

Guerriero, C. (1995). *Abandoning the Car: Driver Adjustments to Hazardous Winter Weather*, thèse inédite de baccalauréat ès sciences, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 77 p.

Haas, R. (1997). Communication personnelle d'un professeur du Département de génie civil, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.).

Hartmann, H.C. (1990a). Climate change impacts on Laurentian Great Lakes levels, *Climatic Change*, 17:49-67.

Hartmann, H.C. (1990b). « Climate Change Impacts on Great Lakes Levels and Flows: Energy and Transportation Implications », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources. Proceedings of an International Symposium/Workshop. Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources*, G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 239-245.

Herbert, D. et Burton, I. (1995). *Estimated Costs of Adaptation to Canada's Current Climate and Trends Under Climate* Change, manuscrit inédit, Environmental Adaptation Research Group, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.).

Hoyle, B.S. (1993). Transport in Canada: Patterns, Issues and Trends, *Journal of Transport Geography*, 1(3):147-149.

IBI Group (1990). *The Implications of Long-term Climatic Changes on Transportation in Canada*, Climate Change Digest Series CCD 90-02, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 8 p.

IJC (International Joint Commission) (1993). *Levels Reference Study Great Lakes - St. Lawrence River Basin*, Ottawa/Washington: International Joint Commission.

ILER (International Lake Erie Regulation Study Board) (1981). *Lake Erie Water Level Study*, Ottawa/Washington: International Joint Commission, 10 volumes.

Irwin, N. et Johnson, W.F. (1988). *The Implications of Long-term Climatic Changes on Transportation in Canada*, rapport préparé pour Transports Canada par IBI Group, Toronto (Ont.).

Jackson, C.I. (1990). « Chap. 9, Transportation », dans *Global Warming: Implications for Canadian Policy*, rapport au Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 94-103.

Jackson, C.I. (1992). *Répercussions du réchauffement planétaire sur la politique du gouvernement canadien, Sommaire du changement climatique SCC 92-01*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 17 p.
Koshida, G. et Brotton, J.M.K. (1997). « Causes and impacts of 1960s low water levels on Canadian Great Lakes interests », Poster summary, *Great Lakes - St. Lawrence Basin Symposium*, 13-15 mai, Toronto (Ont.).

Lane, P. et Associates Ltd. (1988). *Étude préliminaire des effets éventuels d'une hausse d'un mètre du niveau de la mer à Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard, Sommaire du changement climatique SCC-02*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 8 p.

Liu, S. (1997). « Greenhouse Gas Emission Reductions: The Framework Convention on Climate Change and the Canadian Federal Response », dans *Responding to global climate change in British Columbia and Yukon, Vol. I, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, E. Taylor et B. Taylor (dir.), British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks et Environnement Canada, Vancouver (C.-B.), p. 21-1 à 21-9.

Lonergan, S., DiFrancesco, R. et Woo, M. (1993). Climate Change and Transportation in Northern Canada: An Integrated Impact Assessment, *Climatic Change*, 24:331-351.

Marchand, D., Sanderson, M., Howe, D. et Alpaugh, C. (1988). Climatic Change and Great Lakes Levels: The Impact on Shipping, *Climatic Change*, 12:107-133.

Martec Ltd. (1987). *Effets d'une hausse d'un mètre du niveau moyen de la mer à Saint John, Nouveau-Brunswick, et au passage inférieur du Saint-Jean, Sommaire du changement climatique SCC 87-04*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 8 p.

McCabe, C. (1995). *Winter Disruption in Metropolitan Toronto: Climate Change and the Effects on Snow Maintenance Programs*, thèse de bacc. ès sciences inédite, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 60 p.

McCalla, R.J. (1994). *Water Transportation in Canada*, Formac Publishing Co. Ltd., Halifax (N.-É.), 259 p.

McCoy, C. (1993). *A Study on How Sensitive Sand and Salt Use Is to the Weather on the Highways Situated Around the Towns of Wiarton and Owen Sound*, thèse inédite de bacc. ès sciences, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 38 p.

McGillivray, D.G., Agnew, T.A., McKay, G.A., Pilkington, G.R. et Hill, M.C. (1993). *Incidences du changement climatique sur le régime glaciel de la mer de Beaufort : Répercussions sur l'industrie pétrolière dans l'Arctique, Sommaire du changement climatique SCC 93-01*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 19 p.

Mende, J.I. (1982). *An analysis of snowstorm related accidents in Metropolitan Toronto*, thèse de maîtrise inédite, Civil Engineering Department, Université de Toronto, Toronto (Ont.), 104 p.

Miller, T.R. (1988). « Impacts of Global Climate Change on Metropolitan Infrastructure », dans *Coping with Climate Change, Proceedings - Second North American Conference on Preparing for Climate Change*, J. Topping Jr. (dir.), Climate Institute, Washington (D.C.), p. 366-388.

Millerd, F. (1996). The Impact of Water Level Changes on Commercial Navigation in the Great Lakes and St. Lawrence River, *Canadian Journal of Regional Science*, 19(1): 119-130.

Ministry of Transportation of Ontario (1994). *The Social Cost of Motor Vehicle Crashes in Ontario*, Ministry of Transportation, Downsview (Ont.).

Moreno, R.A., Skea, J., Gacuhi, A., Greene, D.L., Moomaw, W., Okita, T. Riedacker, A., Lien, T.V., Ball, R., Breed, W.S. et Hillsman, E. (1996). « Industry, Energy and Transportation: Impacts and Adaptation », dans *Climate Change 1995 Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, R.T. Watson, M.C. Zinyowera et R.H. Moss (dir.), Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), p. 364-398.

Mortsch, L. (dir.) (1995). *Climate Change Impacts: An Ontario Perspective*, préparé pour Ontario Round Table on Environment and Economy: Transportation and Climate Change Collaborative, Environnement Canada, Burlington (Ont.), 76 p.

Myers, R.V. (1997). « Canada Motor Vehicle Safety Standards - A Description », dans *Proceedings of the Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference X*, 9-11 juin, Toronto (Ont.), p. 323-351.

Nix, F.P. (1995). *Transportation In Canada: A Statistical Overview*, Transportation Association of Canada, Ottawa (Ont.), 30 p.

Nix, F.P., Boucher, M. et Hutchinson, B. (1992). « Road Costs », dans *Directions: The Final Report of the Royal Commission on National Passenger Transportation – Vol. 4*, Ottawa (Ont.), p. 937-1058.

Owen, B. (1996). Fog suspected in fatal Flin Flon crash, *Winnipeg Free Press*, 12 janvier, p. B3.

Pan Pacific Communications Inc. (1997). *A Little Wake Up Call: The Impact of Storm 96 on Environmental, Social and Economic Conditions*, Environnement Canada, Vancouver (C.-B.), 24 p.

Perchanok, M.D., Manning, J. et Armstrong, J. (1991). *Highway Deicers: Standards, Practice, and Research in the Province of Ontario*, Ontario Ministry of Transportation, Research and Development Branch, Downsview (Ont.).

Perry, A.H. (1993). « Global warming, natural hazards, and transportation in Europe », dans R. Bras (dir.), *The World at Risk: Natural Hazards and Climate Change, American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings 277*, AIP, New York (N.Y.), p. 275-279.

Perry, A.H. et Symons, L.J. (1991). *Highway Meteorology*, E & F N SPON, London (G.-B.), 208 p.

Regional Municipality of Waterloo, Department of Planning and Culture (1996). *Transportation Tomorrow Survey: Region of Waterloo*, Regional Municipality of Waterloo, Waterloo (Ont.).

Ross, L. et Wellisch, M. (1997). « Implications of Future Climate Change on Energy Production in British Columbia and Yukon », dans *Responding to global climate change in British Columbia and Yukon, Vol. I, Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, E. Taylor et B. Taylor (dir.), British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks et Environnement Canada, Vancouver (C.-B.), p. 17-1 à 17-15.

Royal Commission On National Passenger Transportation (1992). *Directions: The Final Report of the Royal Commission on National Passenger Transportation - Volume 2*, Royal Commission on National Passenger Transportation, Ottawa (Ont.).

Samuels, J. (1989). To salt or not to salt: what are the alternatives?, *Civic Public Works*, 41(9), p. 12-20.

Sanderson, M. (1987). *Répercussions d'un changement climatique sur la navigation et la production d'électricité dans les Grands Lacs, Sommaire du changement climatique SCC 87-03*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 20 p.

Slivitzky, M. (1993). « Water Management: Water Supply and Demand - The St. Lawrence River », dans *Proc. of the Great Lakes - St. Lawrence Basin Project Workshop on Adapting to the impacts of climate change and variability*, Mortsch, L., G. Koshida et D. Tavares (dir.), Québec (Qué.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 32-34.

Statistics Canada (1988-1994). *Air Passenger Origin and Destination, Domestic Report (Catalogue 51-204)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1994). *Canadian Civil Aviation (Catalogue 51-206)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1996). *Canadian Economic Observer (Catalogue 11-010)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1996). *Employment, Earnings and Hours (Catalogue 72-002)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1996). *Gross Domestic Product by Industry (Catalogue 15-001)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1994). *Human Activity and the Environment (Catalogue 11-509)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1994). *Passenger Bus and Urban Transit Statistics (Catalogue 53-215)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1995). *Rail in Canada (Catalogue 52-216)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1975). *Road and Street Length and Financing (Catalogue 53-201)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1995). *Road Motor Vehicles - Fuel Sales (Catalogue 53-218)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1995). *Road Motor Vehicles - Registrations (Catalogue 53-219)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1995). *Shipping in Canada (Catalogue 54-205)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Statistics Canada (1988-1995). *Trucking in Canada (Catalogue 53-222)*, Statistique Canada, Ottawa (Ont.).

Stokoe, P. (1988). *L'évaluation socio-économique des conséquences physiques et écologiques du changement climatique sur le milieu marin de la région de l'Atlantique : Phase I, Sommaire du changement climatique SCC 88-07*, Environnement Canada, Downsview (Ont.), 8 p.

Stokoe, P., Leblanc, M., Lane, P., Belford, S., Carey, D., Manzer, M. et DeWolfe, D. (1988). *Socio-Economic Assessment of the Physical and Ecological Impacts of Climate Change on the Marine Environment of the Atlantic Region of Canada - Phase 1*, Dalhousie University, Halifax (N.-É.), 141 p.

Thornes, J.E. (1992). The impact of weather and climate on transport in the UK, *Progress in Physical Geography*, 16:187-208.

Titus, J.G. (1992). « The Costs of Climate Change to the United States », dans Majumdar, S. K., Kalkstein, L. S., Yarnal, B., Miller, E. W. et Rosenfeld, L.M. (dir.), *Global Climate Change: Implications, Challenges and Mitigation Measures*, Philadelphia (Penn.), p. 385-409.

Transport Canada (1997). *Canadian Motor Vehicle Traffic Collision Statistics*, TP 3322. Transports Canada, Ottawa (Ont.), 9 p.

Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H. (dir.) (1996). *Climate Change 1995 Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, Contributions of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (Mass.), 879 p.

Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (Mass.), 89 p.

Woo, M. (1992). Applications of Stochastic Simulation to Climatic-Change Studies, *Climatic Change*, 20:313-330.

Woo, M. et Lonergan, S. (1990). « Stochastic Simulation of Climate Change Impacts on Ice Road Operations, Mackenzie River, Northwest Territories », dans *Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources. Proceedings of an International Symposium/Workshop. Climate Change: Implications for Water and Ecological Resources,* G. Wall et M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 259-264.

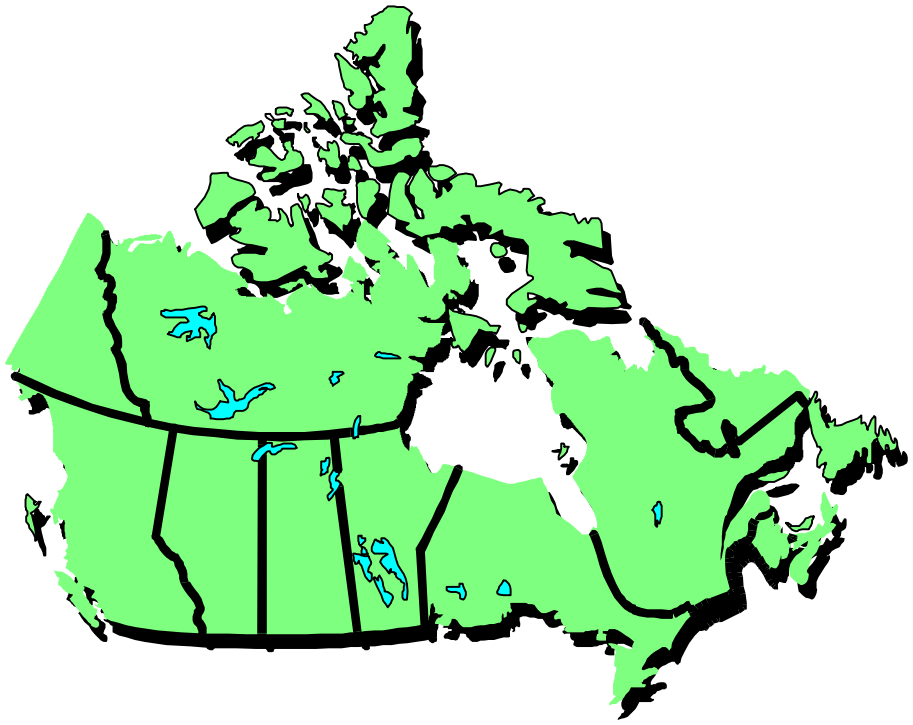
Woo, M. et Lonergan, S. (1992). Impacts of Climate Warming on Transportation and the Regional Economy of Canada's North, *The Canadian Geographer*, 36:73-75.

# CHAPITRE NEUF

# ÉTUDE PAN-CANADIENNE SUR LA VARIABILITÉ ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUES -

# SECTEUR DU MILIEU BÂTI

*W. Alan Dalgliesh*[1]



1. 237 Valley Ridge Green N.W., Calgary (Alberta) T3B 5L6, téléphone : (403) 286-2177, télécopieur : (403) 286-9156, courriel : dalgliesh@freenet.calgary.ab.ca

## RÉSUMÉ

Le milieu bâti reflète les impacts de la variabilité et du changement climatiques et de l'adaptation à ceux-ci dans tous les secteurs, sauf les milieux humides et les écosystèmes non aménagés. Au Canada, l'industrie de la construction a contribué pour 15 % des 618 milliards de dollars du PIB de 1993 et a employé près de 900 000 personnes, ce qui en fait le plus important des 12 secteurs. Statistique Canada signale des dépenses d'investissement en construction et en rénovation par type d'actifs, qui sont ventilés en groupes et dont certains indiquent un niveau d'activité dans les autres secteurs : techniques non industrielles (agriculture, foresterie); mines, gaz et pétrole, énergie électrique (énergie); secteur marin (pêches); secteur institutionnel (santé); secteur commercial (tourisme et loisirs); communications, transports; eaux usées, aqueducs (ressources en eau). Dans les six régions, la ventilation des dépenses (en milliards de dollars) liées à la construction (excluant machinerie et réparations) était la suivante : l'Arctique 0,3 (0,4 %), l'Atlantique 5,8 (7,7 %), le Québec 15,9 (21,1 %), l'Ontario 23,6 (31,3 %), les Prairies 16,9 (22,4 %), et la C.-B. et le Yukon 13,1 (17,4 %), l'ensemble totalisant 75,5 milliards. Bien que les dépenses de construction soient loin d'être toutes liées directement à l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques, il est utile de connaître les investissements respectifs dans les différents secteurs et régions.

En ce qui concerne le secteur de l'assurance, les versements d'indemnités les plus élevés couvrent divers éléments du milieu bâti, habituellement à la suite de phénomènes météorologiques extrêmes. Une portion considérable de ces indemnités finit par être consacrée à des dépenses de construction. Le secteur de l'assurance réagit à la hausse des réclamations occasionnée par des tempêtes plus fréquentes et plus violentes et par le nombre plus important d'immeubles assurés situés sur la trajectoire de ces tempêtes en demandant qu'on évite les endroits à haut risque, qu'on améliore la résistance des bâtiments et qu'on s'attende à des niveaux de protection moins élevés. Certains travaux de construction sont effectués expressément pour prévenir les effets des catastrophes naturelles, comme la construction d'ouvrages de protection des côtes, la modification de la topographie là où peuvent se produire des glissements de boue et de débris et la construction de digues et de barrages contre les inondations.

Les décisions prises par les constructeurs sont liées surtout à la nécessité de construire de façon à la fois sécuritaire et économique et non aux impacts potentiels du changement climatique. Les données sur le climat, particulièrement celles qui définissent des phénomènes météorologiques extrêmes, régissent néanmoins de nombreux coûts et aspects de la construction, notamment par les règlements et ordonnances à respecter, fondés habituellement sur des codes et des normes modèles nationaux. Un équilibre convenable entre, d'une part, la résistance (sécurité) et la fonctionnalité pendant la durée de vie utile d'une construction et, d'autre part, l'économie globale (coût initial plus entretien), dépend de prévisions réalistes des charges dues à la neige et au vent, des températures, des précipitations, des conditions de fondations (p. ex., le pergélisol, la stabilité de la pente) ainsi que des risques d'inondations et de tremblements de terre. La durée de vie utile varie entre moins de 10 ans et plus d'un siècle; les prévisions des extrêmes climatiques peuvent donc nécessiter des ajustements spécifiques en fonction des tendances, dont certaines peuvent être attribuables au réchauffement climatique.

### *Adaptation au réchauffement planétaire*

La façon la plus évidente de s'adapter à la variabilité du climat consiste pour les humains à se séparer, eux-mêmes et leurs activités socio-économiques, de leur milieu, c.-à-d. à s'entourer d'enveloppes de bâtiment. D'autres parties du milieu bâti constituent les infrastructures de soutien des bâtiments et des activités. On adapte des procédés de construction à la menace du réchauffement planétaire dans les trois domaines suivants : sécurité structurale durant les phénomènes météorologiques extrêmes, conservation de l'énergie et minimisation du coût global du cycle de vie des bâtiments et des structures.

La première préoccupation des concepteurs et des constructeurs est de faire en sorte que les structures soient assez solides pour résister à des forces prévisibles pendant toute leur durée de vie. Même si certains phénomènes météorologiques extrêmes comme les tornades peuvent exercer des forces excédant les charges admises, le respect des exigences du code du bâtiment devrait empêcher de sérieux dommages à la plupart des structures, sauf celles qui se trouvent sur la trajectoire directe d'une tornade. De la même façon, une architecture parasismique ne peut prévenir des dommages aux immeubles situés près de l'épicentre, mais elle est nécessaire et habituellement efficace à les limiter dans les alentours. Le programme de la Décennie internationale de la prévention des catastrophes naturelles (DIPCN) de l'ONU, auquel participe le Canada, a comme mission d'atténuer les dommages provoqués par les catastrophes naturelles.

La conservation de l'énergie peut être considérée comme une parade importante au changement climatique parce que le niveau optimal d'isolation des immeubles varie en fonction des moyennes climatiques de chaque endroit. En 1973-1974, la conservation de l'énergie est devenue un dossier important à cause de la crise du prix du pétrole. Pendant une décennie, on a assisté à un essor de la recherche et de la technologie liées aux sources d'énergie de substitution et aux bâtiments éconergétiques. Puis les prix du pétrole ont chuté, faisant ainsi disparaître la plus grande partie de la recherche et de l'intérêt pour la conservation de l'énergie. Nous pouvons encore miser sur ce fonds de préparation et de recherche, maintenant que le public s'intéresse à nouveau aux initiatives liées à la stratégie du « sans-regrets », c.-à-d. celles qui étendent les bonnes pratiques de développement (BPD), que le réchauffement planétaire anthropique soit décelable ou non. Deux nouveaux codes modèles concernant la construction éconergétique doivent être publiés en 1997; il faut maintenant trouver le moyen d'amener les constructeurs et les propriétaires à les utiliser.

Il faut prendre garde aux mesures visant à réduire la perte (ou le gain) de chaleur dans les immeubles, si l'on veut éviter deux effets secondaires désagréables, soit les effets d'immeubles plus hermétiques sur la qualité de l'air et la santé de leurs occupants, et ensuite les effets sur le gros-oeuvre des immeubles eux-mêmes si l'on ne réussit pas à éviter l'accumulation d'humidité dans l'enveloppe. On doit analyser le coût du cycle de vie et notamment des procédures d'entretien pour préserver les gains obtenus par des coûts d'énergie moins élevés.

Des recherches effectuées au Canada, aux États-Unis et ailleurs ont préparé le terrain pour obtenir un rendement énergétique en ayant des immeubles plus étanches mais durables. Il importe plus que jamais de mettre des données climatologiques à la disposition de l'industrie de la construction, mais les compressions gouvernementales laissent à Environnement Canada peu de

marge de manœuvre pour améliorer ce service. Si nous prévoyons que les extrêmes se manifesteront avec une variabilité et une gravité accrues, des données conceptuelles climatiques et des méthodes poussées de traitement de celles-ci seront indispensables afin d'améliorer et de justifier les prévisions imposant des dépenses additionnelles pour que les structures demeurent sécuritaires et économiques.

### *Lacunes et faiblesses*

Les Canadiens ne sont pas suffisamment préparés à faire face aux phénomènes météorologiques extrêmes qui provoquent des désastres majeurs, comme les inondations au Québec en 1996 ou la possibilité d'une forte secousse sismique sur la côte ouest. La participation du Canada au programme de la DIPCN a été limitée jusqu'à présent en raison du manque de fonds; il faut des systèmes d'avertissement et des équipes d'enquête qui peuvent réagir rapidement. Il serait encore plus souhaitable de prendre des mesures visant à diminuer les dommages, grâce à une conception plus résistante et en évitant les régions à risque élevé.

Le secteur de la construction serait mieux desservi par une collecte des données plus complète, tant dans les éléments enregistrés que dans la superficie géographique couverte. La modification récente des charges dues au vent et à la neige dans de nombreux endroits du Canada a considérablement modifié la sécurité et la durée de vie utile prévues de nombreuses structures qui avaient été conçues conformément aux données antérieures. Ces nouvelles données modifieront le coût et la résistance à des phénomènes météorologiques extrêmes de structures conçues en fonction des nouvelles données. Le rendement des structures en pareil cas doit être surveillé afin de confirmer et d'affiner davantage les données de modélisation climatique.

## CARACTÉRISTIQUES DU SECTEUR

### *Introduction*

Le milieu bâti englobe les habitations et les abris destinés aux humains et à leurs possessions; les immeubles de bureaux, les usines et installations des entreprises industrielles et commerciales; les structures d'approvisionnement, de production et de distribution de l'eau, de l'électricité et d'autres sources d'énergie (p. ex., gazoducs et oléoducs, installations de manutention du charbon); les installations de collecte et de traitement des déchets; les réseaux routiers et les voies navigables, avec leurs ponts, canaux, docks, quais, pistes d'atterrissage, hangars, tours de contrôle du trafic aérien et maritime; les tours de communication et diverses autres installations nécessaires à la société humaine (p. ex., hôpitaux, parcs d'attractions, pénitenciers).

Les réseaux de transport ne sont viables que dans la mesure où ils relient les centres d'habitation, les commerces, les industries et les marchés. Le secteur de l'assurance (traité dans le présent volume) est même plus étroitement lié au milieu bâti que le secteur des transports (aussi dans le présent volume). La réaction du milieu bâti à la variabilité et au changement climatiques, et en particulier aux phénomènes météorologiques extrêmes, suscite une demande de protection sous forme d'assurance. L'expérience acquise au cours des années par l'industrie de l'assurance permet de surveiller l'adaptation du milieu bâti au changement et à la variabilité climatiques. La hausse

préoccupante de l'ampleur et de la fréquence des réclamations au cours des dernières années peut refléter non seulement la conjonction de l'augmentation de la population et du parc des bâtiments assurés avec des phénomènes météorologiques extrêmes, mais aussi la gravité et l'ampleur accrues de ces phénomènes.

Il est essentiel de posséder de l'information exacte sur le changement et la variabilité climatiques pour concevoir, construire, exploiter et entretenir des structures dans le milieu bâti et veiller à ce qu'elles durent le temps nécessaire. Les besoins en énergie sont étroitement liés au fonctionnement des immeubles et aux variations du climat où ils sont situés. Le choix d'un site pour des immeubles, que ce soit dans des villes ou ailleurs pour les industries primaires et l'agriculture, est influencé dans une mesure considérable par les conditions climatiques. Les phénomènes météorologiques extrêmes et les conditions climatiques moyennes jouent aussi un rôle direct dans le processus de construction. La construction hivernale peut nécessiter du chauffage et des abris temporaires, la décongélation des matériaux des fondations et le recours à des ponts de glace ou à des voies d'accès sur des sols gelés. La construction de printemps est souvent retardée ou compromise par de fortes pluies et des inondations. De grands vents peuvent arrêter la construction et même détruire les travaux en cours si les contreventements provisoires sont inadéquats. Même si les dispositions prises pour remédier à ces situations demeurent les mêmes, la variabilité et le changement climatiques détermineront dans quelle mesure on doit les utiliser et les endroits où elles sont requises.

La plupart des structures qui ferment l'espace ont comme principale fonction de créer et de conserver un milieu intérieur convenant à l'utilisation de cet espace, souvent dans des conditions presque constantes de température et d'humidité. Toutes les constructions qui font partie du milieu bâti, qu'elles définissent un espace ou non, doivent être durables. Tout comme les structures créées par la nature, les structures artificielles sont soumises à l'érosion du vent et de l'eau, à la fissuration et l'effritement causés par des cycles de gel et de dégel, à la décomposition chimique occasionnée par la présence d'eau, d'oxygène et de divers polluants, aux ravages de la foudre, de la grêle, des tempêtes de vent, des glissements de terrain ou des avalanches, des inondations et des tremblements de terre ou éruptions volcaniques. Dans les plans visant la durabilité, il faut tenir compte de tout processus qui raccourcit la durée de vie utile d'une structure, mais il est aussi salutaire de parer aux phénomènes climatiques extrêmes en érigeant des structures sécuritaires et de tenir compte des moyennes climatiques pour faire face à la détérioration graduelle des éléments et de l'assemblage.

### *Nature et importance de l'industrie de la construction*

L'industrie de la construction a atteint un point culminant en 1990, totalisant 102,4 milliards de dollars en réparations et en nouvelles constructions (15 % du PNB canadien) et employant 985 000 travailleurs (Statistique Canada, 1993b). L'industrie était répartie entre environ 380 000 employeurs, dont 32 % étaient de très petits entrepreneurs avec un chiffre d'affaires inférieur à 250 000 $; seulement 10 000 (3 %) de ces entreprises avaient un revenu brut de plus de un million de dollars par an. Avec une main-d'œuvre très fluide et en partie saisonnière et des marges de profit étroites, il n'est pas étonnant que le secteur privé investisse très peu en vue d'améliorer les techniques de construction par la recherche et le développement (moins de 0,1 %

du volume de la construction qui s'ajoute à un autre 0,1 % de source gouvernementale). Malgré ces handicaps, l'industrie canadienne de la construction est reconnue pour ses forces dans plusieurs domaines et, en 1990, elle s'est taillé une part de 1 % du marché mondial qui représente 120 milliards de dollars américains en contrats de construction; elle se situait derrière le Japon (14 %), les É.-U. (36 %), l'Europe (43 %) et tous les autres pays confondus (6 %). Les exportations de matériaux de construction ont représenté 9 milliards de dollars et les importations 13 milliards (Daniel, 1992). Les chiffres de 1993 étaient un peu moins élevés, avec 861 000 employés, mais les revenus totaux de la construction (75,5 milliards de dollars pour des travaux de construction et de rénovation plus 15,6 milliards pour des réparations) représentaient encore près de 15 % du PIB (Statistique Canada, 1993b).

Le milieu bâti est l'extrant intérieur de l'industrie de la construction. Les biens immobiliers totalisent maintenant 1,5 à 2 billions de dollars, ou environ 15 fois la somme dépensée annuellement pour la construction. Bien que le Canada soit un pays relativement jeune, la plupart de ses biens immobiliers accusent leur âge (avec une durée de vie utile moyenne étonnamment basse de 15 ou 16 ans!) (Statistique Canada, 1990a;b) et exigent une part croissante des fonds consacrés à la construction en travaux d'entretien, de réparation et de rénovation. À titre de principal fournisseur d'infrastructures pour la plus grande partie de l'activité socio-économique, l'industrie de la construction est effectivement la plus importante du Canada, même si les exportations de services et de matériaux de construction ne représentent que la moitié du solde excédentaire de son compétiteur le plus rapproché, la foresterie.

### *Le milieu bâti - au service des autres secteurs et de toutes les régions*

Le milieu bâti sous-tend à peu près toutes les activités socio-économiques du Canada, fournissant l'infrastructure et les milieux modifiés nécessaires à notre climat tempéré nordique. Statistique Canada fournit une ventilation des dépenses consacrées à la construction, ainsi qu'à la machinerie et à l'équipement (Statistique Canada, 1993a) pour chacune des six régions, mais la répartition des dépenses par secteur s'est révélée plutôt insatisfaisante. On n'a pas été en mesure de séparer l'assurance, les écosystèmes et les milieux humides, et des éléments qui ne font manifestement pas partie d'un autre secteur sont comptabilisés sous la rubrique « Autres éléments du milieu bâti ». Les forêts et les ressources en eau en particulier semblent mal représentées. Malgré ces lacunes, les tableaux 9.1 et 9.2 aident à décrire la proportion de l'infrastructure qui appartient à chaque région et à chaque secteur.

**Tableau 9.1 Répartition régionale des dépenses d'investissement au Canada, 1993**

| | **Dépenses liées à la construction** (millions $/%) | | **Machinerie et équipement** (millions $/%) | | **Construction + équipement** (millions $/%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| C.-B. et Yukon | 13 068,3 | 17,3 | 5 127,9 | 11,2 | 18 196,2 | 15,0 |
| Prairies | 16 900,9 | 22,4 | 8 591,7 | 18,8 | 25 492.6 | 21,0 |
| Ontario | 23 587,1 | 31,2 | 19 740,0 | 43,2 | 43 327,1 | 35,7 |
| Québec | 15 912,5 | 21,1 | 9 779,2 | 21,4 | 25 691,7 | 21,2 |
| Atlantique | 5 784,8 | 7,7 | 2 365,2 | 5,2 | 8 150,0 | 6,8 |
| Arctique | 287,6 | 0,4 | 108,7 | 0,2 | 369,3 | 0,3 |
| **TOTAUX** | **75 541,2** | **100,0** | **45 712,7** | **100,0** | **121 253,9** | **100,0** |

Source : Statistique Canada, 1993b - Tableaux 2 et 3

**Tableau 9.2 Répartition par secteur des dépenses d'investissement au Canada, 1993**

| **SECTEUR** | **Dépenses liées à la construction** (millions $/%) | | **Machinerie et équipement** (millions $/%) | | **Construction et équipement** (millions $/%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Agriculture | 1 440,7 | 1,9 | 2 374,9 | 5,2 | 3 815,6 | 3,2 |
| Énergie | 15 862,4 | 21,0 | 918,0 | 2,0 | 16 781,0 | 13,8 |
| Forêts | | | 64,4 | 0,2 | 66,4 | 0,1 |
| Pêches | 242,8 | 0,3 | 77,5 | 0,2 | 320,3 | 0,3 |
| Santé | 1 166,4 | 1,5 | 778,0 | 1,7 | 1 944,4 | 1,6 |
| Tourisme et loisirs | 3 885,2 | 5,1 | 596,8 | 1,3 | 4 481,9 | 3,7 |
| Transports | 5 765,6 | 7.6 | 2 249,5 | 4,9 | 8 015,1 | 6,6 |
| Ressources en eau | 2 095,6 | 2,8 | | | 2 095,6 | 1,7 |
| Autres éléments | 45 082,5 | 59,7 | 38 651,1 | 84,5 | 83 733,6 | 69,1 |
| **TOTAUX** | **75 541,2** | **100,0** | **45 712,7** | **100,0** | **121 253,9** | **100,0** |

Source : Statistique Canada, 1993b - Tableaux 5 et 6

***Assurance et phénomènes météorologiques extrêmes***

Dans un pays nordique comme le Canada, le chauffage est un besoin primordial durant de nombreux mois de l'année, ce qui expose les immeubles aux risques d'incendie. Bien que l'assurance contre les pertes imputables aux incendies soit la principale préoccupation des propriétaires d'immeubles et des compagnies d'assurance, ces risques importants sont néanmoins relativement prévisibles. La situation n'est peut-être pas la même dans le cas des avenants des polices qui couvrent les dommages causés par le vent, la neige, la grêle et la pluie. Souvent la couverture n'a aucune relation avec le degré de risque ou les précautions prises pour faire face à des phénomènes météorologiques extrêmes. Les primes peuvent être moins élevées si les occupants s'abstiennent de fumer, mais, advenant une tempête de vent, il est plus pertinent de savoir si le toit a été ancré solidement sur les murs, et ces derniers sur les fondations.

Quand des tornades touchent des régions bâties, les versements des assurances représentent habituellement des millions de dollars. Le risque n'est pas limité aux arbres et aux bâtiments; les services d'électricité subissent souvent de grandes pertes quand les lignes de distribution et les tours de transmission sont jetées à terre. Le milieu bâti est aussi très menacé par les inondations qui occasionnent de grandes pertes tous les ans. Ceux qui s'obstinent à reconstruire dans les plaines inondables ne peuvent plus trouver d'assurance qui les couvre, mais, si la situation est suffisamment inhabituelle, les gouvernements d'un palier quelconque fourniront les fonds pour faire face au désastre. Sur un plan plus personnel, les architectes, les ingénieurs et les constructeurs prennent une assurance au cas où les structures ne pourraient pas résister, en raison d'un manque de « diligence raisonnable », aux phénomènes météorologiques extrêmes (Pym, 1989).

Les compagnies d'assurance contre les désastres naturels se déchargent d'une partie de leur responsabilité en s'adressant à des compagnies internationales de réassurance, et celles qui sont situées au Canada doivent se préoccuper de la solidité des réassureurs quand ils sont submergés de réclamations, que ce soit au Canada ou ailleurs dans le monde. Il y a eu une escalade troublante dans le nombre et l'importance des réclamations au cours des dernières années, et plusieurs sociétés ont été conduites à la faillite malgré la réassurance. Certaines d'entre elles ont déclaré

croire que le réchauffement climatique mondial joue probablement un rôle par le truchement de la fréquence et de la gravité croissante de phénomènes météorologiques extrêmes comme les cyclones tropicaux, les tempêtes de grêle et les inondations causées par des ondes de tempête et des raz de marée. La population humaine est en danger, de même que le milieu bâti. Avec la croissance des populations et la production des richesses, les gens et le milieu bâti sont de plus en plus situés sur la trajectoire des grands désastres écologiques, ce qui constitue un problème même si la fréquence et l'ampleur de ces derniers devraient demeurer constantes (Berz, 1990).

L'intérêt pour le réchauffement planétaire attire l'attention sur la variabilité et les extrêmes du climat, et les expériences de l'industrie de l'assurance dans le monde entier illustrent d'une façon spectaculaire l'impact des phénomènes météorologiques extrêmes sur le milieu bâti. Ces expériences donnent lieu à des recommandations de modifier en profondeur notre façon de traiter les risques posés par les phénomènes météorologiques extrêmes. Des faits concrets qui se situent dans le contexte canadien montrent pourquoi nous ne pouvons nous désintéresser de la question malgré notre éloignement des tempêtes tropicales, des volcans et des violents tremblements de terre. Dans un discours récent, M. Jim Harries déclarait qu'au Canada, les pertes occasionnées par des désastres entre 1992 et 1996 ont augmenté de 65 % par rapport aux cinq années précédentes, en raison surtout de temps violent. Les deux désastres canadiens les plus coûteux se sont produits dans la présente décennie : la tempête de grêle qui a eu lieu à Calgary en septembre 1991 (343 millions de dollars) et l'inondation dans la région du Saguenay en juillet 1996 (plus de 350 millions de dollars) (Harries, 1997). M. Harries poursuit en citant le second rapport d'évaluation du GIEC : « *Dans le secteur de la construction, il est essentiel de définir quelles normes sont indispensables et de les respecter. Souvent on doit blâmer un processus de construction déficient en cas de dommage, et l'un des grands défis de l'avenir consistera effectivement à moderniser les immeubles qui sont en deçà des normes*. » Une autre observation importante concerne la surcharge des installations municipales, en particulier des réseaux d'égouts. À Ottawa et à Winnipeg, des périodes de fortes pluies ont causé des pertes d'environ 200 millions de dollars dues à des reflux d'égouts et aux inondations associées.

### *Énergie*

Le Canada contribue pour environ 2 % aux émissions totales de $CO_2$ provenant de sources humaines (Comité permanent de l'environnement de la Chambre des communes, 1989-1993). Les immeubles comptent pour le tiers de l'énergie consommée pour le chauffage des locaux et de l'eau, l'éclairage, la climatisation, la ventilation et l'équipement (Barakat, 1995). Mais le milieu bâti représente encore bien plus si l'on tient compte de l'énergie dépensée pour la fabrication des matériaux de construction. L'enjeu est de contribuer à réduire les GES en rendant les immeubles plus éconergétiques. Cette mesure fait partie des politiques « sans regrets » que le gouvernement fédéral continue d'appliquer et qui datent de 1973, au moment où la hausse du prix du pétrole avait suscité une vague d'inquiétudes partout dans le monde.

Crise du prix du pétrole - 1973

Les dépenses de recherche que le gouvernement canadien consacre aux sources d'énergie de substitution et aux méthodes de conservation de l'énergie ont augmenté régulièrement, passant de 300 millions de dollars US (en dollars de 1988) en 1977 à un sommet de 550 millions de dollars US en 1984 (en dollars de 1988) (Organisation de coopération et de développement économiques, 1989). La crise du prix du pétrole de 1973 a suscité une plus grande volonté d'autosuffisance dans l'approvisionnement énergétique; la poursuite de l'efficacité en matière de chauffage et de climatisation a entraîné des recherches approfondies en vue d'améliorer la régulation de la circulation de la chaleur à travers l'enveloppe des bâtiments. Pendant la décennie qui a suivi, on a exploré des sources d'énergie de substitution et d'autres moyens de chauffer les maisons et de remplacer une partie de la demande de combustibles fossiles. Lorsque les prix ont baissé, les dépenses gouvernementales consacrées à la recherche ont diminué rapidement, revenant au niveau de 300 millions de dollars US en 1988. Mais l'appui du public peut susciter un nouvel élan pour faire cesser le gaspillage d'énergie si l'on s'entend sur le fait que la contribution des activités humaines aux GES pose une menace importante.

***Milieu intérieur et enveloppe des bâtiments***

Par rapport à tout le milieu bâti situé en surface, les structures qui ferment des espaces sont très étroitement dépendantes du climat et de sa variabilité. La coque du bâtiment, ou enveloppe, sépare le milieu intérieur des changements constants du milieu naturel qui se produisent à l'extérieur. Ce faisant, l'enveloppe reçoit l'impact de toutes les forces de la nature, notamment de la pluie battante, de la neige, de la grêle, de la poussière, du gravier des toits, des matériaux de construction détachés et des débris d'autres enveloppes démolies apportés par le vent. Et on ne parle ici que de phénomènes météorologiques extrêmes. Au jour le jour, durant toute la durée de vie utile du bâtiment, l'enveloppe subit des variations constantes au niveau du gradient de rayonnement solaire, de la température, de l'humidité ainsi que des pressions au niveau du recouvrement mural extérieur, de l'isolation, des pare-vapeur et des pare-vent. À moins qu'on ne réussisse à contrôler correctement le rayonnement, l'humidité et les polluants, les murs ou les toits peuvent subir une défaillance prématurée.

Le Canada possède une réputation enviable en Amérique du Nord en matière de recherche et d'expertise en technologie des enveloppes de bâtiment. Bien que les principaux fournisseurs mondiaux de murs rideaux pour immeubles de grande hauteur soient situés aux États-Unis, un sondage international a révélé que ces fournisseurs considèrent le Canada comme leur principale source de technologie de pointe (Ledbetter, 1990). L'enveloppe de bâtiment inclut en réalité les murs et les fondations de caves, mais dans le cas qui nous occupe, on ne tient compte que des murs et des toits; ensemble, ils représentent 20 à 25 % du coût total de l'immeuble, moins pour les immeubles commerciaux, gouvernementaux et institutionnels et plus pour les immeubles industriels et résidentiels (Hanscomb Consultants Inc., 1993).

### *Durabilité*

Au fur et à mesure que le milieu bâti prend de l'âge et que le changement s'accélère dans le milieu du travail, la durabilité et la prolongation de la durée de vie utile prennent plus d'importance. On a alors davantage besoin de disposer d'une information exacte et détaillée sur le climat. Alors qu'il faut pouvoir prévoir les phénomènes météorologiques extrêmes pour être en mesure de concevoir la résistance des structures au vent, à la grêle et aux charges de neige et de glace, on réalise de plus en plus que des circonstances plus ordinaires, comme le vent et la pluie battante, contribuent de façon importante à créer un milieu local difficile pour les éléments d'une enveloppe de bâtiment. Les besoins en chauffage et en climatisation dépendent des prévisions des degrés-jours et des heures d'ensoleillement.

La gestion des déchets de construction est un autre domaine qui illustre le vieillissement du milieu bâti canadien. Selon une source, l'industrie de la construction représente 30 à 40 % des matériaux qui aboutissent dans des sites d'enfouissement (Science Council of British Columbia, 1991), mais une autre estimation (14 %) est beaucoup moins élevée, même si elle est encore considérable (SCHL, 1991). On a entrepris quelque peu de « réduire, réutiliser et recycler » les matériaux de construction provenant de nouvelles constructions et de rénovations. Cette initiative découle de l'imposition de frais accrus pour la mise en décharge et des interdictions imposées à certains matériaux de construction, au fur et à mesure que les sites d'enfouissement se faisaient plus rares. Les immeubles qui ont une plus longue durée de vie utile font un meilleur usage des matériaux et permettent d'économiser indirectement sur l'énergie nécessaire pour fabriquer des produits comme les cloisons sèches, l'acier et le béton.

## IMPACTS DU CHANGEMENT ET DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUES

### *Introduction*

Les constructions qui composent le milieu bâti doivent passer leur durée de vie utile dans le milieu naturel, et toutes les étapes de leur existence (conception, construction, exploitation, entretien, démolition ou rénovation) nécessitent de connaître la variabilité du climat. S'il est de plus en plus difficile d'établir des prévisions exactes des phénomènes météorologiques extrêmes, et si celles-ci changent de façon marquée, alors certaines structures qui ont été construites en fonction de prévisions récemment dépassées seront en danger. Si les phénomènes météorologiques extrêmes devenaient plus fréquents et aussi plus graves, un nombre croissant de structures seront exposées à subir des dommages; seules celles construites plus récemment correspondront à des normes plus réalistes. Au fur et à mesure que les structures prennent de l'âge, elles deviennent moins fonctionnelles à cause de la détérioration de leurs éléments et, à moins de le prévoir et de le déjouer par un entretien convenable, les immeubles plus anciens sont encore une fois plus en danger. L'impact de la variabilité du climat sur le milieu bâti augmente avec la hausse du parc des biens immobiliers, la croissance de la population et l'activité économique. Le changement climatique, conjugué aux autres facteurs socio-économiques, pourrait entraîner la relocalisation d'installations.

### *Pergélisol*

Avec des températures à la hausse, les conditions influant sur les fondations changeront graduellement dans le grand Nord. Le pergélisol dégèlera malgré les précautions actuellement prises pour qu'il reste gelé sous les structures, les assiettes des routes et autour des pipelines souterrains. Pendant le dégel du pergélisol, il y aura une période de transition qui nécessitera d'autres mesures, ce qui touchera les nouvelles constructions comme les actuelles. Les structures les plus anciennes devront être surveillées, souvent à grands frais comme c'est le cas pour un immeuble des Territoires du Nord-Ouest qui est construit sur pilotis (120 000 $ en deux ans). Il y aura une augmentation du suintement sous les digues construites sur le pergélisol. Le tassement non uniforme, qui entraîne le coincement des portes et fenêtres ou même l'écroulement des immeubles, pose un problème important. Les lignes de transmission des services publics et les pipelines pourraient se rompre. Les opérations minières pourraient être facilitées, mais les haldes, les digues à stériles et les canaux de dérivation de l'eau pourraient nécessiter un entretien accru et coûteux au fur et à mesure que le pergélisol reculera. Il existe 2 000 km de routes toutes saisons et 2 000 km de routes d'hiver; il est prévu de construire 2 000 autres km de routes toutes saisons dans les Territoires du Nord-Ouest, à un coût totalisant entre 200 000 et 600 000 $/km. Ces coûts doubleront si le réchauffement climatique prévu se produit (McG. Tegart *et al.*, 1990).

### *Données climatiques utilisées pour la conception des immeubles et des structures*

Au Canada, les données climatiques ont habituellement été définies davantage en fonction des besoins opérationnels des transports et de l'agriculture que de la construction. Elles sont toutefois indispensables pour la conception, la construction et l'entretien de toutes nos constructions, qu'il s'agisse de barrages, de tours de transmission, de routes ou de réseaux d'égouts et d'aqueduc, d'usines, d'immeubles de bureaux ou de résidences. La variabilité du climat est, en un sens, la raison même de l'existence de la plus grande partie du milieu bâti. Cette relation étroite tend à cacher le fait que le changement climatique aura un impact direct sur les activités de construction parce que nous nous attendons déjà à ce que les données conceptuelles prévoient la variabilité des paramètres climatiques.

### *Phénomènes météorologiques extrêmes*

Les prévisions des phénomènes météorologiques extrêmes sont régies par la variabilité plutôt que par des changements dans la moyenne. Malgré qu'il soit difficile de distinguer entre les changements de la variabilité induits par le réchauffement planétaire et ceux qui sont provoqués par d'autres agents de changement, on constate en pratique qu'il y a eu des changements dans les nouvelles estimations pour le calcul de charges dues au vent et à la neige qui accompagnent l'édition de 1995 du Code national du bâtiment (CNB) qui sert de modèle au Canada (CNRC, 1995a). Les données climatiques sont fournies pour plus de 600 municipalités dans l'annexe C du CNB, et il semble que, pour plus de la moitié d'entre elles, les charges dues au vent ou à la neige ou les deux sont différentes de celles fournies dans les éditions précédentes. Il s'agit du premier réajustement des valeurs apporté depuis 1965, et effectivement l'analyse des données remonte encore plus loin, soit jusqu'aux environs de 1958.

Une partie des changements est due à l'utilisation de techniques d'analyse nouvelles et améliorées, mais l'apport de plus de 40 ans de nouvelles observations, les changements de l'instrumentation, l'ajout et le retrait de sites d'observation ont tous contribué à l'altération des prévisions. Pour les concepteurs qui se fient seulement aux données de l'annexe C du CNB ou à son équivalent dans les précédents codes, la conversion aux nouvelles données a un impact immédiat. Certaines structures qui viennent juste d'être conçues deviendront considérablement plus résistantes aux phénomènes météorologiques extrêmes, d'autres à un moindre degré, que si l'on avait utilisé des données plus anciennes. Dans la mesure où les nouvelles données présentent une évaluation plus exacte de la variabilité actuelle du climat, le risque de perte au cours d'un phénomène météorologique extrême est mieux géré et les fonds réservés pour les coûts du cycle de vie sont mieux répartis.

On ne s'attardera pas ici à des questions comme se demander à quoi ressembleront la nouvelle variabilité climatique et les nouvelles prévisions de phénomènes extrêmes et si le réchauffement climatique jouera un rôle évident. Mais il faut souligner que c'est le milieu bâti qui accusera l'impact de ce changement, avec ou sans l'adaptation éclairée des concepteurs et des constructeurs utilisant les données climatiques recueillies au cours des années et analysées par leurs conseillers d'Environnement Canada. De toute évidence, une collaboration étroite des divers intervenants est dans l'intérêt de tous.

***Impacts des phénomènes météorologiques extrêmes***

Les catastrophes naturelles deviennent des désastres nationaux quand des phénomènes météorologiques extrêmes frappent des parties importantes du milieu bâti, que les vies et les modes de subsistance sont soudainement menacés, qu'il faut déployer rapidement des mesures d'urgence et des fonds de secours. Comme dans l'industrie de l'assurance, les catastrophes naturelles sont maintenant une préoccupation mondiale qui nécessite une collaboration internationale. Des technologies et des ressources, notamment des réseaux de surveillance et d'alerte, sont en train d'être mises sur pied par des pays avec la coordination du programme de la DIPCN (1990-2000) parrainé par l'ONU (Comité national canadien de la DIPCN, 1994).

À Yokohama, le rapport national canadien pour l'examen de mi-mandat de la DIPCN exprimait une grande inquiétude quant à la vulnérabilité croissante de l'humanité face à des catastrophes naturelles qui a été observée au cours des 20 dernières années. Telles qu'elles sont définies par l'industrie de la réassurance, les catastrophes ont presque quadruplé et les pertes subies par les petits pays dépassent souvent leur PNB. Les désastres qui frappent les pays en développement ont des répercussions sur tous les autres pays et, au cours des cinq dernières années, on a constaté que la proportion de fonds qu'il a fallu dépenser à titre d'assistance à la reprise après un désastre est passée de 2 % à près de 7 %.

Le Canada possède des lignes de transmission de l'électricité qui sont exceptionnellement longues et, au stade de la conception, il faut faire un compromis entre l'économie et la fiabilité. Ces lignes sont vulnérables aux charges dues au vent conjuguées à l'accumulation de glace. Les tabliers des ponts et les digues font face à des niveaux d'inondation extrêmes et à des embâcles, et les plates-formes de forage au large des côtes de l'Atlantique sont menacées par des icebergs. Le pergélisol

est un matériau de fondation qu'on retrouve partout dans le Nord, et on a recours à des méthodes de construction spéciales pour empêcher le dégel sous les immeubles et autour des pipelines. Quelquefois, les services et les immeubles sont surélevés bien au-dessus du sol au moyen de pilotis. Les systèmes de chauffage et de climatisation doivent supporter des écarts extrêmes de chaleur, de froid et de vent. Ce sont là quelques-unes des conditions spéciales qu'on trouve dans un pays nordique comme le Canada, comme le décrit un rapport présenté par un groupe de travail aux responsables du Programme climatologique canadien (Smit, 1993).

Howe Sound, en Colombie-Britannique, possède des pentes abruptes (jusqu'à 17 degrés) qui sont menacées de glissements de terrain importants lorsqu'il y a de fortes tempêtes de pluie. Des eaux de crue contenant des débris de glace et des rochers dont le diamètre atteignait plusieurs mètres ont dévalé du haut de la pente jusqu'au rivage et dans le fjord, détruisant les ponts routiers et ferroviaires, endommageant les immeubles, les balayant même dans le bras de mer, avec de nombreuses pertes de vie. Les pluies annuelles totalisent de 1 900 à 2 100 mm, avec parfois des épisodes de 100 à 140 mm en 24 heures. En octobre 1982, une tempête de pluie a causé des dommages directs de plus de un million de dollars. Jusqu'à présent, le ministère de la Voirie de la Colombie-Britannique a dépensé plus de 20 millions de dollars pour construire des ouvrages de défense (Smit, 1993).

### *Coûts des défaillances prématurées des murs et des toits*

Contrairement aux phénomènes météorologiques extrêmes, qui causent des dommages en quelques secondes (tornades), quelques heures (tempêtes de neige) ou quelques jours (inondations), la défaillance prématurée causée par la détérioration prend habituellement des mois ou des années pour devenir apparente. Le facteur le plus courant dans la plupart des cas de détérioration prématurée est l'humidité qui est transportée dans l'assemblage des murs et des toits. La pénétration de l'humidité provenant d'un intérieur chaud et relativement humide peut être poussée par la tension de vapeur dans les matériaux de construction ou par des fuites d'air causées par une différence de pression. La pluie ou la neige peuvent être entraînées dans les fissures des murs et des plafonds par le vent. Les rayonnements ultraviolets sont une autre cause de défaillance, car ils s'attaquent aux produits de scellement et aux peintures. Si les plans sont adéquats, que l'on choisit les matériaux appropriés et que l'on procède à l'entretien périodique requis, on peut obtenir une durée de vie théorique raisonnable, mais ce n'est pas toujours le cas (Travaux publics Canada, 1990).

L'Institut de recherche en construction (IRC) du Conseil national de recherches du Canada, la Société canadienne d'hypothèque et de logement (SCHL) et Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) ont tous pris au sérieux la détérioration prématurée, et de diverses façons ont offert de l'information afin d'aider à réduire ce problème attribuable au climat. Pour tenter de mesurer l'ampleur du problème au Canada, l'IRC a commandé une étude afin de déterminer quelles économies d'argent pourraient être réalisées si on avait utilisé de meilleures méthodes dans la conception et la construction de murs et de toits (Hanscomb Consultants Inc., 1993). Comme on l'a fait remarquer auparavant, les murs et les toits représentent en gros 25 % du coût d'un bâtiment. De plus, l'étude a montré qu'en moyenne, 28 milliards de dollars canadiens (en dollars de 1993) par année ont été dépensés pour la rénovation des immeubles et

que, de cette somme, 7 milliards de dollars ont été consacrés aux murs et aux toits. Si l'on prend l'hypothèse que des rénovations effectuées avant la fin de la durée de vie utile prouvent l'existence d'une détérioration prématurée, les consultants ont avancé que ces rénovations indiquaient un taux de défaillance prématurée de 3 à 5 %. Ces défaillances prématurées pourraient nous coûter de 200 à 350 millions de dollars par année.

Pour les immeubles, la détérioration liée au climat est probablement limitée à l'enveloppe, mais les routes, les tours de transmission, les ponts et les barrages deviennent tous graduellement moins fonctionnels à cause de leur interaction avec le vent et la pluie battante, les polluants, les matières abrasives et aussi l'action des rayons solaires. En certains cas, la durée de vie de ces autres structures pourrait utilement être prolongée par une meilleure estimation des impacts des agents environnementaux. La variabilité et le changement climatiques (p. ex., heures d'ensoleillement, valeurs extrêmes de température, fréquence d'un mélange de vent et de pluie). influent sur la gravité de ces effets.

***Augmentation de la densité et des possessions de la population***

L'impact du changement climatique est progressivement renforcé par le plus grand nombre d'endroits qui sont la cible de phénomènes météorologiques extrêmes. D'ailleurs, l'impact augmente même en l'absence de changement climatique. La croissance de la population jointe à celle des biens immobiliers menace à la fois les gens et les biens, faisant hausser ainsi la facture lorsqu'un phénomène donné frappe une région populeuse. On est bien plus certain de cet impact que des répercussions du changement climatique. On a fait une observation semblable lorsqu'on a évalué les répercussions du changement climatique sur le bassin de la rivière Grand en Ontario (Sanderson, 1993).

***Désuétude fonctionnelle et emplacement des installations***

Un autre sujet de préoccupation concerne l'emplacement des immeubles et des installations d'infrastructures. Les entreprises sociales et économiques auront tendance à migrer vers les endroits les plus favorables au point de vue du climat, de l'approvisionnement en eau, de l'énergie, de la main-d'œuvre (qualifiée) et de l'accès aux marchés. Même s'il est difficile de recycler des biens immobiliers, il faudra néanmoins le faire. En plus de la détérioration physique, la désuétude fonctionnelle menace aussi la viabilité des immeubles et d'autres structures. Si l'on cherche à prolonger la durée de vie utile comme moyen de réduire le coût du cycle de vie, il faudra prévoir les changements climatiques qui incitent les personnes et les emplois à migrer, peut-être vers des régions nordiques de plus en plus clémentes et loin des centres établis qui pourraient connaître des pénuries d'eau, la désertification ou une plus grande exposition aux ravageurs et aux infections.

De tels bouleversements se produisent régulièrement et non seulement à cause du changement climatique. Des voies de chemin de fer perdent leur rentabilité et sont quelquefois abandonnées à moins qu'on ne puisse leur trouver une nouvelle utilité. Il y a des désavantages à faire durer plus longtemps des biens immobiliers, à moins de penser à leur donner une certaine polyvalence au cas où ces constructions dureraient plus longtemps que l'usage prévu à l'origine.

## STRATÉGIES ET OPTIONS D'ADAPTATION

### *Introduction*

La plupart des exemples ci-dessous concernent l'un de deux problèmes : l'utilisation rationnelle de l'énergie qui aurait comme effet de modifier le cours des événements, et la conception de structures capables de résister à des phénomènes météorologiques extrêmes ou d'en prévenir les impacts. Ces mesures d'adaptation sont ou ont été surtout amenées par des préoccupations autres que la perception du réchauffement planétaire comme menace. Comme dans les autres pays industrialisés, c'est la hausse du prix du pétrole en 1973 qui a entraîné au Canada la création des programmes visant à promouvoir l'efficience énergétique et à découvrir des sources d'énergie de substitution; ces efforts ont cessé dès que les prix ont chuté dans les années 80. Le gouvernement fédéral a subventionné la recherche sur les mesures de conservation de l'énergie et les techniques de construction capables de maintenir des limites acceptables dans le milieu intérieur sans augmenter le taux de détérioration de l'enveloppe du bâtiment. Certaines de ces recherches ont cessé quand les prix du pétrole sont revenus à leur niveau d'avant la crise, mais il demeure une base sur laquelle on peut construire.

L'industrie de la construction a toujours dû se préoccuper du climat et elle a mis au point des mécanismes pour équilibrer économie et risque. Dans la mesure où elles servent aussi de stratégies d'adaptation en cas de changement climatique, qu'il soit suscité par le réchauffement planétaire ou non, ces méthodes et politiques correspondent certainement à la catégorie « sans regrets ».

Comme dans de nombreux domaines d'activité économique, la population aspire de plus en plus à une plus grande qualité et à une assurance de la qualité pour les produits qu'elle achète et utilise. C'est une décision sensée que de dépenser plus au début, la différence étant comblée en fin de compte par un fonctionnement prolongé et sans problèmes. La recherche de la qualité est un trait de comportement important qui favorise les techniques et les attitudes de conservation nécessaires pour réagir au réchauffement planétaire.

### *Codes et normes concernant la conception et la durabilité des immeubles*

Le Canada possède des normes et des codes modèles nationaux s'appliquant à la conception et à la réglementation de la plupart des structures du milieu bâti. Ceux-ci sont révisés régulièrement pour refléter l'information récente sur les conditions climatiques extrêmes et y adapter les plans. En ce qui concerne le modèle de l'adaptation, les codes et les normes sont des applications actives en vue de prévenir les effets indésirables de la variabilité du climat. Un ajout récent est le nouveau code modèle de l'énergie destiné à l'habitation, qui a le potentiel de modifier le cours des événements (c.-à-d. réduire les émissions de $CO_2$).

Code national du bâtiment (CNB)

Les ouvrages de génie civil sont assujettis à des exigences de conception définies dans la Partie 4 du CNB, lorsque ce code modèle est adopté par une municipalité. Celui-ci s'applique à plus de 80 % de la population canadienne, dans tous les territoires et provinces. L'annexe C donne des

valeurs climatiques spécifiques pour plus de 600 municipalités (CNRC, 1995). La Partie 9 du CNB concerne l'habitation et les autres immeubles de superficie inférieure à 600 $m^2$ et hauts de moins de trois étages. L'information climatique est fournie surtout par Environnement Canada et repose sur l'analyse des enregistrements des stations météorologiques effectués à plus de 800 endroits, durant des périodes s'étendant de 10 à 80 ans.

La Partie 5 du CNB traite de la protection du milieu intérieur contre le vent et l'humidité sous ses diverses formes. Cette partie a été beaucoup étoffée dans l'édition de 1995 et fait allusion à la nécessité de la durabilité.

CSA S478 - Guideline for Durability in Buildings (Ligne directrice sur la durabilité des immeubles)

Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) gère peut-être le plus grand portefeuille de biens immobiliers de tout le pays. Comme bien d'autres propriétaires et exploitants, ce ministère fait face aux coûts croissants d'entretien de ses immeubles. L'expérience acquise avec ses garages de stationnement, dont un grand nombre ont fait défaut prématurément durant les années 80, a donné lieu à la première norme canadienne qui exige spécifiquement d'assurer la durabilité dans la conception (Association canadienne de normalisation, 1994). TPSGC a surveillé ses immeubles et conçu une gamme de manuels internes sur la durabilité, qui concernaient surtout l'enveloppe de bâtiment. TPSGC éprouve encore de la difficulté à y sensibiliser les consultants et les entrepreneurs, ce qui a amené les responsables du Ministère à commander et à fournir le financement pour la norme S478, Guideline on Durability of Buildings (CSA, 1995).

La norme CSA S478, qui constitue une innovation en Amérique du Nord, met l'accent sur l'assurance de la qualité, sur le travail d'équipe en vue d'obtenir et de maintenir des structures durables, sur une déclaration claire de la durée de vie projetée et sur le programme d'entretien requis. Elle suggère aussi trois façons de prévoir la durée de vie utile des structures et de leurs éléments : l'utilisation de dossiers documentés sur les succès obtenus en matière de rendement, la modélisation du processus de détérioration et l'essai de l'assemblage dans des situations de simulation. Les annexes fournissent de l'information générale sur les mécanismes de détérioration.

Entretien, surveillance et évaluation du cycle de vie

La norme CSA S478 met l'accent sur la tenue de dossiers et de calendriers d'entretien ainsi que sur l'évaluation du cycle de vie comme un grand incitatif à envisager des compromis entre un coût initial plus élevé entraînant moins d'entretien et un coût initial inférieur nécessitant un entretien plus grand ou plus fréquent. Si elle est respectée, cette norme peut éventuellement aider à réduire le coût du cycle de vie et à prolonger la durée de vie utile des immeubles. L'une des questions qui ont été à peine effleurées est celle de la désuétude fonctionnelle.

À titre d'option en vue de s'adapter au changement d'utilisation ou de catégorie d'emplacement, on pourrait s'orienter vers des constructions mobiles (c.-à-d. d'une nature plus nomade). La désuétude fonctionnelle se présente sous divers aspects, soit qu'un immeuble est situé au mauvais

endroit ou que les goûts architecturaux ou le type d'emplois disponibles changent. On passe d'emplois dans le secteur de la fabrication à d'autres dans les services et à d'autres, qui exigent beaucoup de connaissances, dont la production peut être envoyée électroniquement de façon presque instantanée autour du monde. Plutôt que de construire des structures plus solides et plus permanentes, il vaudrait mieux dans certains cas les faire plus légères et plus polyvalentes. L'adaptation vise ici à ménager une transition plus rapide dans la fonction, mais la même démarche pourrait aider à faire face au changement climatique qui oblige à se déplacer vers un autre lieu.

L'évaluation du cycle de vie conçue spécialement pour les biens immobiliers est en train d'être mise au point par TPSGC et l'IRC (Vanier, 1996a;b; Brown, 1996), et ces méthodes devraient s'avérer utiles pour évaluer les coûts occasionnés par l'adaptation au changement climatique.

Comment échapper au « syndrome des bâtiments malsains » - Qualité de l'air intérieur

Les mesures prises pour réduire la consommation énergétique en rendant les enveloppes des immeubles plus hermétiques peuvent entraîner une dégradation inacceptable de la qualité de l'air si la ventilation est insuffisante. Des recherches approfondies sont en cours sur les méthodes de surveillance (Reardon, 1993; Strauss, 1995; Swinton, 1993a; Veitch, 1993, 1994; Shaw, 1997), parallèlement à des enquêtes sur les mesures de conservation de l'énergie (Swinton, 1993b; Shaw, 1993).

***Faire face aux risques de catastrophes naturelles - DIPCN***

Comme on l'a déjà mentionné, le Canada participe au programme de la DIPCN de l'ONU qui s'intéresse aussi à nombre des préoccupations liées au changement climatique. Le programme comprend une évaluation des risques, des activités d'atténuation, de la recherche, la mise sur pied de réseaux d'alerte et une collaboration internationale. Le changement climatique est en jeu dans trois des quatre risques naturels cités : les risques météorologiques, hydrologiques et biologiques.

Les compagnies de réassurance y portent un grand intérêt parce que plusieurs de leurs compagnies d'assurance clientes ont été mises en faillite par des événements comme l'ouragan Andrew (1992), en Floride. Au cours des dix dernières années, les grands désastres naturels qui ont eu lieu au Canada ont coûté aux compagnies d'assurance un milliard de dollars pour des orages, des tempêtes de grêle, des tempêtes de vent et des inondations. Ces compagnies avertissent qu'une catastrophe géologique, un tremblement de terre majeur dans la région de Vancouver, pourrait nécessiter des paiements de 14 à 32 milliards de dollars, et elles ont demandé des allégements fiscaux pour permettre la mise sur pied d'un fonds afin de parer à cette éventualité. Si l'assurance ne peut couvrir des pertes majeures, il incombe généralement aux gouvernements de contribuer et, dans les deux cas, une onde de choc économique déferle, avec des conséquences sur d'autres plans qui nécessitent un financement (Comité national canadien de la DIPCN, 1994).
Un prototype de réseau d'échange de renseignements sur les risques naturels et technologiques, actuellement en préparation sur Internet à l'Université Simon Fraser de Vancouver (C.-B.) : HazarNet (*http://hoshi.cic.sfu.ca/hazard/index.html*, a comme objectif d'améliorer la rapidité, la

qualité, la quantité, la spécificité et l'accessibilité de l'information pour les personnes et les organismes du monde entier qui s'occupent de prévention, d'atténuation ou de préparation à des urgences technologiques et naturelles de grande envergure. Cette initiative recoupe clairement les préoccupations liées au changement climatique.

Des services de recherche sur l'atténuation des catastrophes ou sur l'état de préparation aux désastres sont en place aux universités du Québec (Rimouski), du Manitoba et de la Colombie-Britannique. Ce sont des éléments importants du Cadre d'action de la DIPCN (Comité national canadien de la DIPCN, 1997). L'évaluation des risques, les dangers, les vulnérabilités et l'atténuation des inondations et des tempêtes de vent, entre autres, mettent les intérêts de la DIPCN directement au service de l'adaptation au changement climatique (Davenport et Charlwood, 1995). Parmi les activités courantes du Comité, on compte des ateliers qui ont lieu deux fois par année depuis 1988, appelés le projet « Tornado », et qui visent à mieux faire comprendre aux responsables municipaux les phénomènes météorologiques violents. Des centres de prévision des inondations surveillent le débit des cours d'eau dans plusieurs provinces : au Nouveau-Brunswick (fleuve Saint-Jean), en Ontario, au Manitoba et en Alberta. L'inondation récente de la rivière Rouge au Manitoba a été surnommée « l'inondation du siècle », car elle a déplacé 28 000 personnes en dépit des efforts déployés durant des semaines par des milliers de bénévoles et malgré l'existence d'un canal de dérivation permanent aux alentours de la ville de Winnipeg. Les records ne cessent d'être brisés.

Un nouveau projet parrainé par le Centre for Studies in Construction de l'Université Western Ontario fera fond sur l'expertise canadienne dans les technologies de pointe destinées à la construction. Le projet « Storm Shelter » évaluera la vulnérabilité des habitations ordinaires et bon marché, déterminera les conséquences des désastres sur les membres des familles et élaborera des méthodes de construction permettant de réduire la vulnérabilité aux catastrophes naturelles. Ce projet s'adresse surtout aux pays du tiers-monde, et on entrevoit pour les constructeurs d'habitations canadiens des possibilités d'exportation dans les pays asiatiques de la bordure du Pacifique et des Caraïbes. On cherchera à obtenir la coopération internationale pour l'élaboration de programmes de formation, d'indices de résistance aux catastrophes et de méthodes de construction.

### *Adaptation par l'efficience énergétique*

Bien qu'ils aient été inspirés par des inquiétudes quant à l'accès aux ressources pétrolières internationales, les programmes de conservation qui ont été lancés par divers organismes gouvernementaux fédéraux sont de bons exemples d'adaptation aux risques perçus pour le milieu bâti, et ils sont en réalité parfaitement harmonisés aux recommandations de réduire les émissions de $CO_2$. Les listes et sources de référence suivantes sont loin d'être complètes, mais elles donnent une indication de l'ampleur des recherches et des ressources technologiques déjà en place.

Canada

Le Comité permanent de l'environnement de la Chambre des communes a tenu plusieurs séances de 1989 à 1993, entendant tout d'abord le témoignage de témoins experts et de parties intéressées

d'à peu près tous les secteurs de l'économie, et préparant par la suite une série de rapports. Certaines remarques inscrites dans ce volumineux dossier donnent un aperçu intéressant sur les mesures d'adaptation discutées ou recommandées, dont certaines sont devenues des recommandations de politiques gouvernementales.

- Brian Foody a mentionné que les sociétés pétrolières concevaient les plates-formes de forage de la mer du Nord en tenant compte d'une élévation d'un mètre du niveau de la mer qui, selon les prévisions, résulterait des GES (Comité permanent de l'environnement de la Chambre des communes, 1989 - p. 27-28).

- Bert Metz, de l'Ambassade royale des Pays-Bas, a fait remarquer que la hausse du niveau de la mer ne serait pas un problème comme tel, même si 25 % des Pays-Bas sont situés sous le niveau de la mer et que 65 % du territoire risque d'être inondé si la mer montait. Ce pays est spécialisé dans la construction de digues et pratique avec succès cette activité dans le monde entier. Il en coûterait à la Hollande 6,7 milliards de dollars canadiens pour rehausser ses digues d'un mètre. Les Hollandais se préoccupent toutefois de l'intrusion de l'eau salée dans les réserves d'eau souterraine et aussi de la fréquence et de l'intensité des tempêtes hivernales. La Communauté européenne a l'intention de bannir les CFC d'ici 1998 et de réduire les $CO_2$ aux niveaux de 1989-1990 d'ici l'an 2000, en rendant le chauffage résidentiel plus efficient, en renforçant les codes du bâtiment, en favorisant le transport en commun et en taxant les sources d'énergie (la terrible taxe sur les hydrocarbures). Les Pays-Bas, qui comptent une population d'environ 15 millions d'habitants, produisent environ un pour cent du $CO_2$ issu des combustibles fossiles.

- Jim Bruce, président d'office du Comité scientifique et technique de la DIPCN (Canada), présentait la recommandation suivante au Comité sur l'environnement : renforcer les codes nationaux du bâtiment dans le sens de la conservation de l'énergie dans les immeubles résidentiels et commerciaux, avec des incitatifs pour des appareils éconergétiques et des incitatifs pour l'énergie solaire et éolienne; et des centrales hydroélectriques de petite et moyenne taille.

- M. Skinner, directeur de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), a déclaré que l'ex-Allemagne de l'Ouest a augmenté son PNB tout en diminuant sa consommation d'énergie, par un vigoureux programme d'efficience énergétique et des subventions gouvernementales. L'une de ces subventions visait le vitrage double des fenêtres (Comité permanent de l'environnement de la Chambre des communes, 1990).

Immeubles fédéraux

- À compter de 1975, le gouvernement fédéral canadien a réduit la consommation énergétique des immeubles gouvernementaux d'environ 24,3 %, en prenant l'année 1976 comme année de référence. Ce résultat a été atteint en s'attaquant à toutes les cibles, de l'entretien aux réfections des immeubles et en effectuant des conversions du pétrole au bois, au gaz naturel et au propane.

- Les déchets des immeubles du Parlement mis en décharge ont diminué de 78 %.

- En trois ans, 2 200 tonnes de papier ont été recyclées, permettant d'économiser 700 000 $.

- Dans un immeuble seulement, l'éclairage éconergétique a permis d'économiser 27 200 $.

- Les véhicules convertis au gaz naturel permettent d'économiser 20 cents/km (Comité permanent de l'environnement de la Chambre des communes, 1993).

> R-2000 : Programme de la maison à haut rendement énergétique de Ressources naturelles Canada

Ressources naturelles Canada (RNCan) fait la promotion des maisons à haut rendement énergétique avec des niveaux élevés d'isolation, une enveloppe d'immeuble étanche, un système de ventilation permanente obligatoire ainsi que des matériaux et de l'équipement sans danger pour l'environnement. Ces maisons doivent être bâties par des constructeurs spécialement formés dont le travail est testé périodiquement, et des certificats sont émis pour les maisons R-2000. Les fiches techniques R-2000 indiquent que, même si le prix d'achat peut dépasser de 2 à 6 % celui d'une maison « classique » comparable, les économies d'énergie à elles seules devraient fournir un retour en quelques années seulement. Certaines banques offrent des taux d'hypothèque inférieurs à titre d'incitatifs et, dans certains cas, le montant total pourrait être inférieur pour les maisons R-2000 (Ressources naturelles Canada 1994).

Les coûts de l'énergie sont habituellement moins élevés dans une maison R-2000, mais la période de récupération de l'investissement dépend aussi d'autres facteurs comme le climat et le coût du mazout. Une évaluation indépendante sur des maisons d'essai dans les trois provinces des Prairies a servi à comparer des maisons R-2000 avec des maisons classiques semblables, ce qui a produit divers résultats (Innovative Housing Grants Program - Alb., 1989).

- Dans une ville donnée, les économies moyennes d'énergie ont montré une variation atteignant 40 %.

- Un mode de chauffage différent a été utilisé dans certaines maisons R-2000 (électricité au lieu du gaz, même si elle coûte 2,5 fois plus au Manitoba et 5 fois plus en Alberta et en Saskatchewan).

- À Saskatoon, une maison classique serait construite à un coût égal ou plus élevé qu'une maison R-2000 optimisée à Regina.

- Le programme R-2000 a changé la façon dont on construit maintenant les habitations classiques et certaines caractéristiques avancées qu'on ne trouvait auparavant que dans les maisons R-2000 sont désormais considérées presque comme de l'équipement standard.

- En Alberta, l'étude a permis de constater que le concept R-2000 au complet n'était pas économique; les périodes de récupération de l'investissement s'étalaient de 15 à plus de 25 ans.

Mais a) en appliquant de l'isolant R-20 sur les murs des sous-sols; b) en scellant hermétiquement, en ventilant et en récupérant la chaleur par un ventilateur, on obtenait des périodes de récupération de 4 à 10 ans et de 6 à 10 ans.

- En Saskatchewan, avec des prix plus élevés du gaz (3,40 $/gigajoule (GJ) comparativement à 2,70 $/GJ), les périodes de récupération comparables étaient de 2 à 9 ans, de 3 à 7 ans et, pour tout l'ensemble de mesures R-2000, de 5 à 20 ans.

- Au Manitoba (gaz à 5,30 $/GJ), les périodes de récupération simple pour tout l'ensemble variaient de 4 à 13 ans.

> Programme des bâtiments commerciaux performants C-2000 de Ressources naturelles Canada

Le Centre de technologie de l'énergie (CTE) de CANMET de RNCan a mis au point cette démonstration de bureaux à haut rendement et l'a lancée à la fin de 1993. Deux des sept immeubles conçus sont maintenant construits et font l'objet d'une surveillance (avril 1997; pour plus de renseignements, veuillez contacter C-2000, CTE, au numéro de télécopieur (613) 996-9416). Un rendement élevé correspond à plusieurs critères :

- Consommation énergétique projetée ne dépassant pas de 50 % de celle exigée par la norme ASHRAE 90.1 (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1989).

- Impact minimal sur l'environnement.

- Milieu intérieur d'excellente qualité.

- Adaptabilité.

- Matériaux de construction durables.

- Facilité de l'entretien futur.

Le coût additionnel par rapport à la construction classique pour chacun des deux immeubles parachevés jusqu'à présent a été de 8 %; l'un des deux a atteint le critère annuel de rendement énergétique et l'autre l'a dépassé. Dans le cadre du programme de démonstration actuel, il reste encore deux ans de surveillance à faire, mais des conclusions préliminaires permettent de croire que la clé du succès réside dans a) un travail de conception en équipe, incluant la participation de spécialistes (énergéticiens, experts-conseils en coûts, spécialistes en environnement), et b) un guide clair et complet. Cet effort de conception additionnel, comprenant des simulations sur l'énergie, coûterait probablement 50 à 70 000 dollars de plus, et la mise en service de tous les grands systèmes, notamment l'enveloppe de l'immeuble, constitue un autre élément important.

Les lignes directrices C-2000 seront refondues en un code canadien de l'énergie du bâtiment, une nouvelle référence en matière de rendement énergétique qui se substituera à la norme ASHRAE 90.1, et qui traitera des questions de rééquipement; la documentation complémentaire sera mise à jour et élargie. Les critères du programme ont été appliqués à un programme de la SCHL, appelé *Défi Idées,* qui vise les immeubles résidentiels à plusieurs logements. Devant le succès obtenu par les projets C-2000 en Colombie-Britannique, deux grands services publics ont conçu un programme de facilitation de la conception afin de tirer parti des leçons apprises. Selon une démarche connexe, le gouvernement fédéral a annoncé, en février 1997, qu'au cours des trois prochaines années, 20 millions de dollars par an seraient consacrés à promouvoir les investissements en matière d'efficience énergétique et d'énergie renouvelable dans les immeubles commerciaux, nouveaux et existants (RAIC, 1997).

Code modèle canadien de l'énergie dans les bâtiments

En 1976 ont commencé les travaux en vue de créer un code normatif fondé sur la norme ASHRAE 90.1, qui venait tout juste d'être publiée. En 1978, ces travaux ont donné lieu à une publication intitulée « Mesures d'économie d'énergie dans les nouveaux bâtiments », revue et mise à jour en 1983 avec un nouveau chapitre sur les maisons. Les travaux subséquents ont consisté à relever le défi d'en faire un code d'application, mais, entre-temps, malgré l'appui accordé auparavant par les provinces, seuls la SCHL (en 1978) et le Québec (en 1983) ont adopté les « Mesures ». À cette époque, les prix du pétrole étaient revenus à leur niveau d'avant la crise et les priorités avaient changé. L'utilisation limitée des « Mesures » et la perte d'assistance technique à cause des compressions imposées par le gouvernement fédéral à la recherche en matière d'énergie ont presque stoppé la mise au point du code en 1989, mais RNCan, l'Association canadienne de l'électricité et tous les ministères provinciaux ont sauvé l'entreprise au dernier moment au moyen d'un financement de 1,5 million de dollars, permettant ainsi de terminer l'édition de 1995 (Conseil national de recherches, 1995b; c). Il est à noter que ces références sont des réimpressions d'ébauches en vue de consultations publiques. Les versions finales seront disponibles au début de 1997).

Les deux nouveaux codes sur l'énergie vont plus loin que les « Mesures » et que la norme ASHRAE 90.1, de plusieurs façons. Tout d'abord, les codes traitent spécifiquement des variations régionales des coûts de l'énergie et de la construction. Ensuite, on en simplifie beaucoup plus l'application aux maisons en ayant divisé le document en deux. Troisièmement, bien qu'on ait dû retenir la formule normative comme exigence par défaut, d'autres options sont permises si les simulations par ordinateur prouvent que le rendement énergétique n'est pas réduit. La façon d'effectuer les simulations, notamment les mécanismes de contrôle des données d'entrée, sera précisée dans des documents auxiliaires (Haysom, 1993).

Climatisation éconergétique

La climatisation des immeubles consomme près de 10 % du total de l'énergie mondiale et ce pourcentage augmentera probablement avec le réchauffement planétaire, qui annulera en partie toute économie réalisée sur le chauffage. Dans les immeubles commerciaux, près de la moitié de la climatisation sert à éliminer la chaleur perdue par l'éclairage électrique (Lord, 1994). On prétend

qu'il y a des avantages pour la santé et l'environnement à utiliser des systèmes de refroidissement par absorption fonctionnant à la chaleur pour refroidir les locaux d'un groupe d'immeubles (Hart et Rosen, 1996). L'élimination des CFC dans les frigorigènes nécessite des substituts, dont l'un est la technologie de refroidissement faisant appel à des déshydratants (Painchaud, 1993; Shelpuk, 1993).

Programme de transfert de la technologie de l'énergie dans les bâtiments

En 1975, Énergie, Mines et Ressources (maintenant RNCan) a commencé à appliquer le plan fédéral de gestion de la conversion de l'énergie à des substituts du pétrole à tous les ministères, organismes et sociétés d'État, en vue de ramener les dépenses de 1985-1986 à 90 % de celles de 1975-1976. À la fin du programme, les bénéfices accumulés qui ont été déclarés auraient été de 872 millions de dollars pour des mises de fonds de 200 millions de dollars et l'objectif a été plus que dépassé, soit 24,3 % de moins que l'année de référence, en modernisant les immeubles ainsi qu'en améliorant la tenue des lieux sans dépenser plus d'argent (EMR, 1985). Le Ministère a également diffusé, de 1984 à 1986, une série d'au moins 20 rapports de recherche destinés au grand public et intitulés Programme de transfert de la technologie de l'énergie dans les bâtiments (BETT 1984-1986).

Publications de la Société canadienne d'hypothèque et de logement

La SCHL commande des recherches sur de nombreux aspects de l'habitation, dont certaines nous intéressent dans le contexte actuel. La première consiste en un livre offrant des plans de maison utilisant un système solaire passif pour le Canada, avec une liste d'articles et d'autres ressources sur l'efficience énergétique et la technologie solaire passive (SCHL, 1989). Chacun de ces plans s'accompagne d'une analyse de l'énergie indiquant les coûts pour plusieurs villes du Canada. D'autres publications intéressantes traitent principalement des problèmes de durabilité et de leurs causes, offrent des études de cas venant de partout au Canada et des guides des meilleures pratiques en vue d'aider les constructeurs et les concepteurs à appliquer les leçons apprises. En outre, des séminaires ont souvent lieu dans tout le Canada, comme le plus récent, sur la lutte contre la pénétration de l'eau (SCHL, 1996).

Publications et recherches de l'INR/CNRC

Le Digest de la construction au Canada, produit à l'intention des architectes et des ingénieurs en particulier, est une série très appréciée, parce qu'il donne un aperçu de divers sujets relatifs à la science du bâtiment. Parmi les 250 documents publiés, plus de 100 traitent d'aspects de la conception axée sur la durabilité. On peut en mentionner quelques-uns, portant sur le bois (DCC 111, 112, 1969), sur le béton (DCC 116, 1971), sur les métaux (DCC 170, 1975) et sur les garages de stationnement (DCC 224, 225, 1982). Deux autres séries utiles sont les Notes de recherches en bâtiment et les Notes sur la construction. Une liste partielle de 110 documents de recherche, chapitres de manuels et présentations de séminaires portant sur la conservation de l'énergie va de 1975 à 1992. Elle couvre la période où le gouvernement fédéral a financé le maximum de recherches sur les sources d'énergie de substitution et les mesures de conservation de l'énergie.

La recherche et les publications actuelles traitent de l'évaluation et du renouvellement des infrastructures, de la restauration et de la rénovation des immeubles existants et de l'optimisation du milieu intérieur pour assurer la santé, la sécurité, le confort et la productivité de ses occupants. Les salaires des occupants pour les 40 ans de durée utile d'un immeuble de bureaux sont estimés à près de dix fois le coût initial de celui-ci (Barakat, 1995). L'accès du public aux rapports de l'IRC et à d'autres sources a été facilité par la production de listes de 2 à 8 pages de publications, d'organisations, de bases de données bibliographiques et d'autres documents concernant un domaine particulier. Ces pistes d'orientation sont disponibles en s'adressant à l'IRC par l'AutoFax au (613) 990-4101 et aussi par Internet (http://www.nrc.ca/irc/library/guide.html). Parmi les sujets particulièrement intéressants : les thermopompes géothermiques, la détérioration du béton dans les garages de stationnement, les immeubles sains, le remblayage avec des isolants (Ganguli, 1994a;b;c;d).

États-Unis

Une évaluation effectuée par Nordhaus sur les impacts du changement climatique aux États-Unis a donné peu de raisons de s'inquiéter (Nordhaus dans Dornbusch et Poterba, 1993). En ce qui concerne la construction, le principal effet décelé était l'avantage que procure une saison de construction plus longue. Cet optimisme repose sur le fait qu'on est confiant de pouvoir s'adapter à un climat plus clément, même si des phénomènes inattendus et désagréables peuvent survenir plus fréquemment. Pour ce qui est des mesures d'atténuation et d'adaptation à prendre, les recommandations étaient les suivantes :

- Améliorer les connaissances.
- Mettre au point de nouvelles technologies.
- Appliquer les politiques « sans regrets ».
- Et seulement si l'on y est obligé, imposer une taxe sur les hydrocarbures.

Building Envelope Research Centre, Oak Ridge National Laboratory (ORNL)

La recherche et les politiques en matière de conservation de l'énergie suscitées par la crise du prix du pétrole de 1973 ne sont pas propres au Canada. En réalité, les premières versions du code canadien de la conservation de l'énergie ont été adaptées d'une norme de la ASHRAE (1989). Tout comme au Canada, les inquiétudes concernant les réserves de pétrole se sont évanouies dès que les prix ont baissé et, comme au Canada, les installations de recherche se sont tournées vers la question des immeubles éconergétiques. Aux États-Unis, le Building Envelope Research Center du ORNL a réalisé des progrès intéressants en mettant sur pied un projet de base de données accessible par Internet en vue de comparer le rendement thermique de systèmes de murs complets de conception nouvelle (Christian et Kosny, 1996).

Il s'agit d'effectuer des tests en laboratoire sur des sections murales complètes de modèles classiques et de conception nouvelle, en vue d'en analyser le rendement thermique en ayant recours à des modèles informatiques tridimensionnels complexes et ensuite de fournir des pointages unidimensionnels équivalents destinés aux constructeurs et aux concepteurs. La raison d'être de cette base de données est que les actuelles méthodes de comparaison des divers systèmes muraux, particulièrement lorsqu'on a recours à la documentation produite par les fabricants, ne représentent pas adéquatement les effets des ponts thermiques comme les montants, les fuites d'air, etc. Au fur et à mesure que les matériaux traditionnels comme le bois d'oeuvre deviennent rares, coûteux et de moins bonne qualité en raison de l'épuisement des réserves, il importe de plus en plus de pouvoir évaluer les autres options et de mettre au point des systèmes d'un rendement thermique égal ou meilleur. Dans la majeure partie des États-Unis, le changement climatique augmenterait probablement les coûts de la climatisation plutôt que les coûts du chauffage, mais, dans les deux cas, on peut économiser de l'énergie avec des murs à haut rendement.

## LACUNES DANS LES CONNAISSANCES

### *Introduction*

Le milieu bâti est bien plus qu'un simple secteur économique. « Nous, les Canadiens, considérons notre milieu bâti comme un abri contre les éléments (survie), comme notre foyer (refuge), et comme un moyen de générer de la richesse (p. ex., transports, communications, énergie, bureaux, usines, eau, etc.); de disposer de réseaux d'approvisionnement en eau et en énergie, et de traitement des déchets (survie, richesse et santé); et d'assurer notre bien-être (hôpitaux, écoles); il nous sert aussi d'habitat. Il est aussi important pour nous que le milieu naturel l'est pour les autres habitants de cette planète ». (Auld, 1997)

Le milieu bâti concrétise la plupart des moyens qui permettent aux Canadiens de s'adapter aux rigueurs et aux conditions extrêmes d'un climat nordique. Cette adaptation englobe la variabilité et les tendances, que ces changements climatiques soient causés par des contributions anthropiques au réchauffement planétaire ou par d'autres forces. La consommation de combustibles fossiles joue un rôle central dans notre adaptation au climat, ainsi que dans le transport des biens et des personnes sur de grandes distances à travers notre territoire faiblement peuplé. L'efficience énergétique devient donc une arme à deux tranchants pour affronter les conséquences du réchauffement planétaire : on pourrait à la fois prendre des mesures d'atténuation et améliorer notre adaptation.

Les Canadiens économisent aussi de l'énergie en gérant mieux la durée de vie utile des biens immobiliers, puisque la fabrication des matériaux de construction et leur mise au rebut éventuelle nécessitent de l'énergie. Dans certains cas, nous devrions penser à recycler des ressources plutôt que de chercher simplement à allonger leur durée de vie utile, compte tenu que l'emplacement et le type des diverses activités économiques évoluent à un rythme rapide. Lorsqu'il s'agit de construction dans le grand Nord, le rythme et l'envergure du changement dans les limites du pergélisol est un autre sujet de préoccupation relativement au milieu bâti.

Une gestion sage du milieu bâti nécessite des données de conception sur le climat qui soient adéquates et pertinentes. Non seulement on doit prédire correctement les extrêmes au moment de la conception initiale, mais on veut aussi mesurer l'exposition d'année en année aux agents de détérioration (p. ex., pluie battante et rayonnement solaire). Lorsque nous en viendrons à apprécier les avantages de l'évaluation du coût du cycle de vie, nous exigerons une surveillance accrue de l'impact de ces agents environnementaux sur les structures existantes et originales afin de déterminer quels matériaux et méthodes de construction sont les plus efficaces.

Le Canada s'étend sur un grand territoire et comprend plusieurs types de climat. Il faut des années pour recueillir suffisamment d'information pour déceler des tendances, évaluer les variations et prédire les extrêmes. Les stations d'observation ne doivent pas être trop éloignées ou séparées des lieux de construction. De toute évidence, on fait face à des difficultés quand l'emplacement et les caractéristiques des lieux changent. Les spécialistes d'Environnement Canada sont ceux qui sont le mieux en mesure de déterminer quelles sont les exigences précises en matière de collecte et d'analyse des données. Mais on doit souligner que des lacunes existent et existeront probablement toujours dans le réseau de données (dans le temps et dans l'espace). L'industrie de la construction elle-même ne semble que vaguement consciente de l'urgence d'obtenir l'information la plus précise possible et elle n'a jusqu'à présent exercé aucune pression pour obtenir des améliorations. Ce manque de sensibilisation est peut-être l'élément essentiel par lequel il faut tout d'abord commencer!

Les sections précédentes sont parsemées de commentaires, d'observations et de recommandations sur la nécessité de données climatiques ou de certaines méthodes de construction pour faire face au changement climatique et aux fluctuations du climat. Une trentaine de ces remarques ont été répétées ci-dessous afin d'appuyer le sommaire sur les connaissances nécessaires concernant le milieu bâti.

***Données de modélisation du climat***

La sécurité, la fonctionnalité et l'économie du milieu bâti dépendent grandement de prévisions exactes et réalistes des variables climatiques, en particulier des extrêmes. Même sans tenir compte des tendances possibles issues du réchauffement planétaire, les lacunes des connaissances qui existent depuis longtemps empêchent de prendre les meilleures décisions. Les méthodes d'observation et d'enregistrement correspondent davantage aux besoins des transports, de l'agriculture et des loisirs, et les changements prennent du temps à se produire, peut-être parce que l'industrie de la construction a été trop fragmentée pour percevoir les besoins ou exiger des améliorations. La couverture géographique fait défaut dans certaines régions et cette situation va s'aggraver si le réchauffement planétaire impose de relocaliser des activités industrielles et agricoles dans des régions non peuplées auparavant.

- La durée de vie utile des bâtiments varie entre moins de 10 ans et plus d'un siècle; les prévisions des extrêmes climatiques peuvent donc nécessiter des ajustements spécifiques en fonction des tendances, dont certaines peuvent être attribuables au réchauffement planétaire. [Résumé]

- Le secteur de la construction serait mieux desservi par une collecte des données plus complète tant dans les éléments enregistrés que dans la superficie géographique couverte. La modification récente des charges dues au vent et à la neige dans de nombreux endroits du Canada a considérablement modifié la sécurité et la durée de vie utile prévues de nombreuses structures qui avaient été conçues conformément aux données antérieures. Ces nouvelles données modifieront le coût et la résistance à des phénomènes météorologiques extrêmes de structures conçues en fonction des nouvelles données. [Résumé]

- Il importe plus que jamais de mettre des données climatologiques à la disposition de l'industrie de la construction, mais les compressions gouvernementales laissent à Environnement Canada peu de marge de manœuvre pour améliorer ce service. Si nous prévoyons que les extrêmes se manifesteront avec une variabilité et une gravité accrues, des données de modélisation du climat et des méthodes poussées de traitement de celles-ci seront indispensables afin d'améliorer et de justifier les prévisions imposant des dépenses additionnelles pour que les structures demeurent sécuritaires et économiques. [Résumé]

- S'il est de plus en plus difficile d'établir des prévisions exactes des phénomènes météorologiques extrêmes, et si celles-ci changent de façon marquée, certaines structures qui ont été construites en fonction de prévisions récemment dépassées seront alors en danger. Si les phénomènes météorologiques extrêmes devenaient plus fréquents et aussi plus graves, un nombre croissant de structures seront exposées à subir des dommages; seules celles construites plus récemment correspondront à des normes plus réalistes. [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

- Au Canada, les données climatiques ont habituellement été définies davantage en fonction des besoins opérationnels des transports et de l'agriculture que de la construction. Elles sont toutefois indispensables pour la conception, la construction et l'entretien de toutes nos constructions, qu'il s'agisse de barrages, de tours de transmission, de routes ou de réseaux d'égouts et d'aqueduc, d'usines, d'immeubles de bureaux ou de résidences. [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

- Dans la mesure où les nouvelles données présentent une évaluation plus exacte de la variabilité actuelle du climat, le risque de perte au cours d'un phénomène météorologique extrême est mieux géré et les fonds réservés pour les coûts du cycle de vie sont mieux répartis. [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

- Il faut souligner que c'est le milieu bâti qui accusera l'impact de ce changement, avec ou sans l'adaptation éclairée des concepteurs et des constructeurs utilisant les données climatiques recueillies au cours des années et analysées par leurs conseillers d'Environnement Canada. De toute évidence, une collaboration étroite des divers intervenants est dans l'intérêt de tous. [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

### *Efficacité énergétique*

Une façon de démontrer la valeur d'adapter sur mesure la capacité des structures et les niveaux d'isolation au climat d'une région consiste à modéliser les impacts des décisions de conception sur les coûts du cycle de vie de structures typiques. Une démarche dans la bonne direction a consisté à concevoir un entrepôt en comparant par simulation les besoins annuels en chauffage et en climatisation pour sept endroits du Canada (Yazici, 1996). Cette étude pourrait servir de prototype de modélisation pour examiner les coûts liés aux tendances du réchauffement planétaire qui modifient les données conceptuelles climatiques.

- La conservation de l'énergie peut être considérée comme une parade importante au changement climatique parce que le niveau optimal d'isolation des immeubles varie en fonction des moyennes climatiques de chaque endroit. [Résumé]

- Deux nouveaux codes modèles concernant la construction éconergétique doivent être publiés en 1997; il faut maintenant trouver le moyen d'amener les constructeurs et les propriétaires à les utiliser. [Résumé]

- Il faut prendre garde aux mesures visant à réduire la perte (ou le gain) de chaleur dans les immeubles, si l'on veut éviter deux effets secondaires désagréables, soit les incidences d'immeubles plus hermétiques sur la qualité de l'air et la santé de leurs occupants, et ensuite les répercussions sur le gros oeuvre des immeubles eux-mêmes si l'on ne réussit pas à éviter l'accumulation d'humidité dans l'enveloppe. On doit analyser le coût du cycle de vie et notamment des procédures d'entretien pour préserver les gains obtenus par des coûts d'énergie moins élevés. [Résumé]

- Les besoins en énergie sont étroitement liés au fonctionnement des immeubles et aux variations du climat où ils sont situés. Le choix d'un site pour des immeubles, que ce soit dans des villes ou ailleurs, pour les industries primaires et l'agriculture, est influencé dans une mesure considérable par les conditions climatiques. [Caractéristiques du secteur]

- Jim Bruce, président d'office du Comité scientifique et technique de la DIPCN (Canada), présentait la recommandation suivante au Comité sur l'environnement : renforcer les codes nationaux du bâtiment dans le sens de la conservation de l'énergie dans les immeubles résidentiels et commerciaux, avec des incitatifs pour des appareils éconergétiques et pour l'énergie solaire et éolienne; et des centrales hydroélectriques de petite et moyenne taille. [Stratégies et options d'adaptation]

- La climatisation des immeubles consomme près de 10 % du total de l'énergie mondiale et ce pourcentage augmentera probablement avec le réchauffement planétaire, qui annulera en partie toute économie réalisée sur le chauffage. Dans les immeubles commerciaux, près de la moitié de la climatisation sert à éliminer la chaleur perdue par l'éclairage électrique (Lord, 1994). On prétend qu'il y a des avantages pour la santé et l'environnement à utiliser des systèmes de refroidissement par absorption fonctionnant à la chaleur pour refroidir les locaux d'un groupe d'immeubles (Hart et Rosen, 1996). L'élimination des CFC dans les frigorigènes nécessite des

substituts, dont l'un est la technologie de refroidissement faisant appel à des déshydratants (Painchaud, 1993; Shelpuk, 1993). [Stratégies et options d'adaptation]

- Les immeubles comptent pour le tiers de l'énergie consommée pour le chauffage des locaux et de l'eau, l'éclairage, la climatisation, la ventilation et l'équipement (Barakat, 1995). Mais le milieu bâti représente encore bien plus si l'on tient compte de l'énergie dépensée pour la fabrication des matériaux de construction. L'enjeu est de contribuer à réduire les GES en rendant les immeubles plus éconergétiques. [Caractéristiques du secteur]

- ...l'appui du public peut susciter un nouvel élan pour faire cesser le gaspillage d'énergie si l'on s'entend sur le fait que la contribution des activités humaines aux GES pose une menace importante. [Caractéristiques du secteur]

***Méthodes de construction***

- Les phénomènes météorologiques extrêmes et les conditions climatiques moyennes jouent aussi un rôle direct dans le processus de construction. La construction hivernale peut nécessiter du chauffage et des abris temporaires, le décongélation des matériaux des fondations et le recours à des ponts de glace ou à des voies d'accès sur des sols gelés. La construction de printemps est souvent retardée ou compromise par de fortes pluies et des inondations. De grands vents peuvent arrêter la construction et même détruire les travaux en cours si les contreventements provisoires sont inadéquats. Même si les dispositions prises pour remédier à ces situations demeurent les mêmes, la variabilité et le changement climatiques détermineront dans quelle mesure on doit les utiliser et les endroits où elles sont requises. [Caractéristiques du secteur]

- Dans les plans visant la durabilité, il faut tenir compte de tout processus qui raccourcit la durée de vie utile d'une structure, mais il est aussi salutaire de prévenir les phénomènes climatiques extrêmes en érigeant des structures sécuritaires et de tenir compte des moyennes climatiques pour faire face à la détérioration graduelle des éléments et de l'assemblage. [Caractéristiques du secteur]

- « Dans le secteur de la construction, il est essentiel de définir quelles normes sont indispensables et de les respecter. Souvent on doit blâmer un processus de construction déficient en cas de dommage, et l'un des grands défis de l'avenir consistera effectivement à moderniser les immeubles qui sont en deçà des normes. » [Caractéristiques du secteur]

- À moins qu'on ne réussisse à contrôler correctement le rayonnement, l'humidité et les polluants, les murs ou les toits peuvent subir une défaillance prématurée. Au fur et à mesure que le milieu bâti prend de l'âge et que le changement s'accélère dans le milieu du travail, la durabilité et la prolongation de la durée de vie utile prennent plus d'importance. On a alors davantage besoin de disposer d'une information exacte et détaillée sur le climat. [Caractéristiques du secteur]

- La gestion des déchets de construction est un autre domaine qui illustre le vieillissement du milieu bâti canadien... Les immeubles qui ont une plus longue durée de vie utile font un

meilleur usage des matériaux et permettent d'économiser indirectement sur l'énergie nécessaire pour fabriquer des produits comme les cloisons sèches, l'acier et le béton. [Caractéristiques du secteur]

- L'INR-CNRC, la SCHL et TPSGC ont tous pris au sérieux la détérioration prématurée et, de diverses façons, ont offert de l'information afin d'aider à réduire ce problème attribuable au climat. Pour tenter de mesurer l'ampleur du problème au Canada, l'IRC a commandé une étude afin de déterminer quelles économies d'argent pourraient être réalisées si on avait utilisé de meilleures méthodes dans la conception et la construction de murs et de toits. [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

- Comme dans de nombreux domaines d'activité économique, la population aspire de plus en plus à une plus grande qualité et à une assurance de la qualité pour les produits qu'elle achète et utilise. C'est une décision sensée que de dépenser plus au début, la différence étant comblée en fin de compte par un fonctionnement prolongé et sans problèmes. La recherche de la qualité est un trait de comportement important qui favorise les techniques et les attitudes de conservation nécessaires pour réagir au réchauffement planétaire. [Stratégies et options d'adaptation]

- En ce qui concerne le modèle de l'adaptation, les codes et les normes sont des applications actives en vue de prévenir les effets indésirables de la variabilité du climat. Un ajout récent est le nouveau code modèle de l'énergie destiné à l'habitation, qui a le potentiel de modifier le cours des événements (c.-à-d. réduire les émissions de $CO_2$). [Stratégies et options d'adaptation]

***Emplacement des constructions***

On devrait de nouveau accorder la priorité aux études sur le pergélisol, qui faisaient autrefois la force de la recherche canadienne en construction afin de pouvoir ajuster le milieu bâti nordique actuel et les méthodes de construction des nouveaux immeubles à l'approfondissement de la couche active et au recul éventuel des limites du pergélisol.

- Avec des températures à la hausse, les conditions influant sur les fondations changeront graduellement dans le grand Nord. Le pergélisol dégèlera malgré les précautions actuellement prises pour qu'il reste gelé sous les structures, les assiettes des routes et autour des pipelines souterrains. Pendant le dégel du pergélisol, il y aura une période de transition qui nécessitera d'autres mesures, ce qui touchera les nouvelles constructions comme les actuelles. [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

- À titre d'option en vue de s'adapter au changement d'utilisation ou de catégorie d'emplacement, on pourrait s'orienter vers des constructions mobiles (c.-à-d. d'une nature plus nomade)... L'adaptation vise ici à ménager une transition plus rapide dans la fonction, mais la même démarche pourrait aider à faire face au changement climatique qui oblige à se déplacer vers un autre lieu. [Stratégies et options d'adaptation]

### *Innovation dans la surveillance et la planification à plus long terme*

La recherche du rendement énergétique, qu'elle soit motivée en tout ou en partie par la volonté de réduire les GES, nécessite de consacrer davantage d'attention à la construction d'enveloppes de bâtiment durables et saines. Pour ce faire, il faut mettre en service de nouveaux immeubles et assurer une surveillance à long terme des produits et des méthodes de construction non éprouvés. Si l'on tient compte du coût énergétique de la fabrication des matériaux eux-mêmes, les propriétaires doivent s'efforcer de prolonger la durée de vie utile des structures en prévoyant un changement de vocation à une époque ultérieure. Il pourrait être nécessaire d'effectuer des recherches sur la façon de conserver plus de flexibilité dans la conception, ce qui permettait de réaménager les lieux de façon économique et de réutiliser les éléments et les assemblages.

- Le rendement des structures durant des phénomènes météorologiques extrêmes doit être surveillé afin de confirmer et d'affiner davantage les données de modélisation climatique. [Résumé]

- Les mesures prises pour réduire la consommation énergétique en rendant les enveloppes des immeubles plus hermétiques peuvent entraîner une dégradation inacceptable de la qualité de l'air si la ventilation est insuffisante. Des recherches approfondies sont en cours sur les méthodes de surveillance. [Stratégies et options d'adaptation]

- La norme CSA S478 met l'accent sur la tenue de dossiers et de calendriers d'entretien ainsi que sur l'évaluation du cycle de vie comme un grand incitatif à envisager des compromis entre un coût initial plus élevé entraînant moins d'entretien et un coût initial inférieur nécessitant un entretien plus grand ou plus fréquent. Si elle est respectée, cette norme peut éventuellement aider à réduire le coût du cycle de vie et à prolonger la durée de vie utile des immeubles. L'une des questions qui ont été à peine effleurées est celle de la désuétude fonctionnelle. [Stratégies et options d'adaptation]

- L'évaluation du cycle de vie conçue spécialement pour les biens immobiliers est en train d'être mise au point par TPSGC et l'IRC (Vanier, 1996a;b; Brown, 1996) et ces méthodes devraient s'avérer utiles pour évaluer les coûts occasionnés par l'adaptation au changement climatique. [Stratégies et options d'adaptation]

- Pour les immeubles, la détérioration liée au climat est probablement limitée à l'enveloppe, mais les routes, les tours de transmission, les ponts et les barrages deviennent tous graduellement moins fonctionnels à cause de leur interaction avec le vent et la pluie battante, les polluants, les matières abrasives et aussi l'action des rayons solaires. En certains cas, la durée de vie de ces autres structures pourrait utilement être prolongée par une meilleure estimation des impacts des agents environnementaux. La variabilité et le changement climatiques influent sur la gravité de ces impacts (p. ex., heures d'ensoleillement, valeurs extrêmes de température, fréquence d'un mélange de vent et de pluie). [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

- Si l'on cherche à prolonger la durée de vie utile comme moyen de réduire le coût du cycle de vie, il faudra prévoir les changements climatiques qui incitent les personnes et les emplois à

migrer, peut-être vers des régions nordiques de plus en plus clémentes et loin des centres établis qui pourraient connaître des pénuries d'eau, la désertification ou une plus grande exposition aux ravageurs et aux infections. [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

***Faire face aux phénomènes météorologiques extrêmes***

Des fonds additionnels devront être consacrés à la création d'un réseau d'enquête sur les catastrophes naturelles. Une intensité et une fréquence accrues des phénomènes météorologiques extrêmes sont deux conséquences possibles du réchauffement planétaire et, même si cette tendance n'est pas encore évidente au Canada, les tendances inquiétantes des réclamations d'assurance prouvent sans aucun doute l'utilité de ces études. Des enquêtes sur les catastrophes ont un intérêt par les mesures d'atténuation qu'elles permettent de prendre face à de futures catastrophes et, pour tirer le maximum d'enseignement de ces leçons coûteuses, le Comité national canadien de la DIPCN doit recevoir un appui additionnel en vue de l'élaboration de réseaux d'informations et d'avertissements.

- Les Canadiens ne sont pas suffisamment préparés à faire face aux phénomènes météorologiques extrêmes qui provoquent des désastres majeurs, comme les inondations au Québec en 1996 ou la possibilité d'une forte secousse sismique sur la côte ouest. La participation du Canada au programme de la DIPCN a été limitée jusqu'à présent en raison du manque de fonds; il faut des systèmes d'avertissement et des équipes d'enquête qui peuvent réagir rapidement. Il serait encore plus souhaitable de prendre des mesures visant à diminuer les dommages, grâce à une conception plus résistante et en évitant les régions à risque élevé. [Résumé]

- L'intérêt pour le réchauffement planétaire attire l'attention sur la variabilité et les extrêmes du climat, et les expériences de l'industrie de l'assurance dans le monde entier illustrent d'une façon spectaculaire l'impact des phénomènes météorologiques extrêmes sur le milieu bâti. Ces expériences donnent lieu à des recommandations de modifier en profondeur notre façon de traiter les risques posés par les phénomènes météorologiques extrêmes. [Caractéristiques du secteur]

- Les risques naturels deviennent des désastres nationaux quand des phénomènes météorologiques extrêmes frappent des parties importantes du milieu bâti, que les vies et les modes de subsistance sont soudainement menacés, qu'il faut déployer rapidement des mesures d'urgence et des fonds de secours. [Impacts du changement et de la variabilité climatiques]

- Des services de recherche sur l'atténuation des dangers ou sur l'état de préparation aux catastrophes sont en place aux universités du Québec (Rimouski), du Manitoba et de la Colombie-Britannique. Ce sont des éléments importants du Cadre d'action de la DIPCN (Comité national canadien de la DIPCN, 1997). L'évaluation des risques, les dangers, les vulnérabilités et l'atténuation des inondations et des tempêtes de vent, entre autres, mettent les intérêts de la DIPCN directement au service de l'adaptation au changement climatique (Davenport et Charlwood, 1995). [Stratégies et options d'adaptation]

## RÉFÉRENCES

ASHRAE/IESNA (1989). *Energy efficient design of new buildings except low-rise residential buildings*, ASHRAE/IESNA Standard 90.1 - 1989. Table des matières disponible à : www.ashrae.org/BOOK/4-90.htm

Auld, Heather (1997). Communication personnelle (lors de la révision de ce document).

Barakat, Sherif A. (1995). « R & D of current environmental technologies in Canada - Buildings and the environment », *Pan Pacific Symposium on Building and Urban Environmental Conditioning in Asia, Nagoya, Japan, March 1995*, p. 609-619.

Berz, Gerhardt (1990). *Windstorm - New loss dimensions of a national hazard*, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Königinstraße 107, D-8000 Munich 40 (Allemagne).

BETT – Programme de transfert de la technologie dans le bâtiment (Canada) (1984). *Airtightness tests on 200 new houses across Canada: summary of results: a research report*, Publication No. 84-01, BETT, Ottawa (Ont.), 46 p.

BETT – Programme de transfert de la technologie dans le bâtiment (Canada) (1984a). *Économies d'énergie et profits à la carte*, BETT, Ottawa (Ont.), 34 p.

BETT – Programme de transfert de la technologie dans le bâtiment (Canada) (1985). *Effects of insulation on basement walls: a research report*, Publication No. 85-03, BETT, Ottawa (Ont.), pages div.

BETT – Programme de transfert de la technologie dans le bâtiment (Canada) (1985a). *Residential ventilation requirements: a research report*, Publication No. 85-04, BETT, Ottawa (Ont.), pages div.

Brown W.C., G.A. Chown, B.R. Kyle, M.A. Lacasse et D.J. Vanier (1996). *Applying service life and asset management techniques to roofing systems*, présenté à « Sustainable Low-Slope Roofing », atelier, Oak Ridge (Tenn.), 9-10 oct. 1996, 8 p.

Comité national canadien de la DIPCN (1994). *Rapport national du Canada*, préparé pour la revue mi-terme de la DIPCN et pour la Conférence mondiale de 1994 sur la prévention des catastrophes naturelle, Yokohama, Japon, 23-27 mai 1994, Société royale du Canada et Académie canadienne du génie, Ottawa (Ont.), 132 p. + 2 annexes.

Comité national canadien de la DIPCN (1997). *Plan stratégique : un cadre d'action*, février 1997.

Comité permanent de la Chambre des communes sur l'environnement (1989). *Déposition des témoins au Comité*; 34e législature, 2e session, 27 avril-11 mai 1989.

Comité permanent de la Chambre des communes sur l'environnement (1990a). *Déposition des témoins au Comité*; 34e législature, 2e session, juin 1990.

Comité permanent de la Chambre des communes sur l'environnement (1990b). *No Time to Lose: the challenge of global warming*, Part II of « Our changing atmosphere », 34e législature, 2e session, octobre 1990.

Comité permanent de la Chambre des communes sur l'environnement (1993). *Our Planet ... Our Future*, 34e législature, 2e session, juin 1993, 8e rapport.

Conseil national de recherches du Canada (1995). *Code national du bâtiment du Canada 1995*, 11e éd., Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, Conseil national de recherches Canada, Ottawa (Ont.), 571 p.

Conseil national de recherches du Canada (1995b). *Code national de l'énergie pour les bâtiments 1995*, Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, Conseil national de recherches Canada, Ottawa (Ont.), 323 p.

Conseil national de recherches du Canada (1995c). *Code national de l'énergie pour les maisons 1995*, Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, Conseil national de recherches Canada, Ottawa (Ont.), 253 p.

Christian, J. E. et J. Kosny (1996). *Thermal Performance and Wall Rating*, http://www.ornl.gov/roofs+walls/whole-wall/index.html

CSA-Association canadienne de normalisation (1994). *Parking structures - structures (design)*, Canadian Standards Association, Etobicoke (Ont.).

CSA-Association canadienne de normalisation (1995). *Guideline on durability in buildings - structures (design)*, Canadian Standards Association, Etobicoke (Ont.).

Daniel, P. (1992). *The construction industry - national information base phase 1*, présentation au ministère de l'Industrie, des Sciences et de la Technologie Canada (ISTC) le 12 mars 1992 par le président de Vista Strategic Information Management Inc.

Davenport, A.G. et R.G. Charlwood (1995). « Towards a comprehensive assessment of risks due to natural hazards », dans *Proceedings of a Tri-Lateral Workshop on Natural Hazards, held February 14-15, 1995 in Merrickville, Ontario*, D. Etkin (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 1-26 à 1-44.

Digeste de la construction au Canada, M.C. Baker (1969). *La pourriture du bois*, DCC 111, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.).

Digeste de la construction au Canada, M.C. Baker (1969). *Conception des toitures de bois de manière à prévenir la pourriture*, DCC 112, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.).

Digeste de la construction au Canada, E.G. Swensen (1971). *Durabilité du béton sous conditions hivernales*, DCC 116, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.).

Digeste de la construction au Canada, P.J. Sereda (1975). *Corrosion atmosphérique des métaux*, DCC 170, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.).

Digeste de la construction au Canada, G.G. Litvan (1982). *Détérioration des garages de stationnement*, DCC 224, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.).

Digeste de la construction au Canada, G.G. Litvan (1982). *Évaluation et réparation des planchers de garage endommagés*, DCC 225, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa (Ont.).

Dornbusch, R. et J. M. Poterba (dir.) (1993). *Global warming: economic policy responses*, MIT Press, Cambridge (Mass.), 389 p.

Ganguli, V. (1994a). *Ground Source Heat Pumps*, Conseil national de recherches Canada (CNRC), Ottawa (Ont.), 38447, *Pathfinder*-7, 4 p.

Ganguli, V. (1994b). *Concrete Deterioration in Parking Garages*, Conseil national de recherches Canada (CNRC), Ottawa (Ont.), 38450, *Pathfinder*-10, 7 p.

Ganguli, V. (1994c). *Healthy Buildings*, Conseil national de recherches Canada (CNRC), Ottawa (Ont.), 38457, *Pathfinder*-17, 5 p.

Ganguli, V. (1994d). *Insulated Backfill*, Conseil national de recherches Canada (CNRC), Ottawa (Ont.), 38501, *Pathfinder*-5, 2 p.

Hanscomb Consultants Inc. (1993). *National roofing and exterior cladding market assessment*, préparé pour le Conseil national de recherches du Canada, 30 novembre 1993, Hanscomb Consultants Inc., Toronto (Ont.).

Harries, Jim, (1997). Climate change: the growing explosion of catastrophic damage (discours), *Canadian Speeches*, vol. 10, n° 9, janvier-février 1997, p. 21-25.

Hart, D. R. et M. A. Rosen (1996). Environmental and health benefits of district cooling using utility-based cogeneration in Ontario, Canada, *Energy*, Vol. 21, No. 12, Pergamon Press, New York (N.Y.), p. 1135-1146.

Haysom, J. C. (1993). « Canada's National Model Energy Code for Buildings: The Long and Difficult Gestation of an "Imperfect Tool" for Regulating Energy Consumption », *Third World Congress of Building Officials "The Changing World Perspective on Building Regulations", New Orleans, Louisiana, May 1 - 6, 1993*, World Organization of Building Officials (WOBO), hosted by Council of American Building Officials, Falls Church (Va.), 22041, 17 p., Section 3.

Ledbetter, S.R. (1990). *A comparative study of the facade industry in the UK, Europe, Japan and the USA*, Part 1, *The nature and structure of the facade industry*, Centre for Window and Cladding Technology, University of Bath, Claverton Down, Bath (G.-B.), 68 p.

Lord, David (1994). « Modeling energy and materials flow in building design and construction using an electronic spreadsheet », *Sustainable construction: proceedings of the First International Conference of CIB TG 16: Construction and Waste, held November 6-9, 1994 at Tampa, Florida*, C.J. Kilbert (dir.), Center for Construction and Environment, Gainesville (Fla.), p. 307-316.

McG. Tegart, W. J., G. W. Sheldon et D. C. Griffiths (dir.) (1990). *Climate Change - The IPCC Impacts Assessment*, report prepared for IPCC by Working Group II, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), 365 p.

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (EMR) Canada (1985). *Rapport de 1985*, Programme de gestion de l'énergie.

Painchaud, G. (1993). « Evaluation of advanced absorption technologies for Canadian applications », *Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference, held January 19-21, 1994 at New Orleans, Louisiana*, R. Radermacher (dir.), American Society of Mechanical Engineers, New York, AES, Vol. 31, ASME 1993, p. 353-360.

Pym, D.V. (1989). *Yesterday, today, the future: from roofs to curtain walls*, presentation at Encon Insurance Managers Inc. Loss Control Seminars across Canada, 1989 by President, International Specialized Risk Management (I.S.R.M.) Ltd.

RAIC - Royal Architectural Institute of Canada (1997). News: 1997 Budget introduces incentives for high performance, *Advanced Buildings Newsletter*, vol. 1, n° 16, janvier-février 1997, p. 1-2.

Reardon J. T. et C. Y. Shaw (1993). Carbon dioxide concentrations and minimum air change rates in a high-rise office building, *Indoor Environment*, 2:337-343.

Richesses naturelles Canada (1994). *R-2000, is it worth it?*, ministère des Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.), 4 p.

Sanderson, M. (dir.), (1993). *The impact of climate change on water in Grand River Basin, Ontario*, Department of Geography Publication Series No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 218 p.

SCHL-Société canadienne d'hypothèques et de logement (1989). *Passive solar designs for Canada*, préparé par Allen Assoc., Toronto et Marbek Resource consultants, Ottawa, pour la Société canadienne d'hypothèques et de logement, Ottawa (Ont.).

SCHL-Société canadienne d'hypothèques et de logement (1991). *Making a Molehill our of a Mountain; Implementing the Three R's in Residential Construction*, Société canadienne d'hypothèques et de logement, Ottawa (Ont.).

SCHL-Société canadienne d'hypothèques et de logement (1996). *Rain penetration control seminar and best practice guide*, Société canadienne d'hypothèques et de logement, Ottawa (Ont.).

Science Council of British Columbia (1991). *Construction waste management report*, the SPARK Construction Waste Sub-committee of the Science Council of British Columbia, janvier 1991, 53 p.

Shaw, C.Y. et J.T. Reardon (1993). « Changes in airtightness levels of six office buildings », *ASTM Symposium on Airflow Performance of Building Envelopes, Components, and systems, Fort Worth, TX, 1993*, p. 47-57 (aussi ASTM Special Technical Publication, vol. 1255).

Shaw, C.Y. (1997). *Maintaining acceptable air quality in office buildings through ventilation*, NRCC-40626 Construction Technology Updates, No. 3, 4 p.

Shelpuk, B. (1993). The technical challenges for solid desiccant cooling, Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 13, No. 4, p. 321-328.

Smit, B. (dir.) (1993). *Adaptation to climatic variability and change - Report of the task force on climate adaptation*, Department of Geography, University of Guelph Occasional Paper No. 19, Université de Guelph, Guelph (Ont.), 53 p.

Statistique Canada (1990a). *La construction au Canada 1988-1990*, Catalogue annuel 64, Ottawa (Ont.), 201 p.

Statistique Canada (1990b). *Flux et stock de capital fixe : Méthodologie*, Division des investissements et stocks de capital, Ottawa (Ont.), 33 p.

Statistique Canada (1990c). *Flux et stock de capital fixe : Âge moyen des actifs*, Division des investissements et stocks de capital, Ottawa (Ont.), 51 p.

Statistique Canada (1993a). *Dépenses en immobilisations par type d'actif, 1993*, Catalogue annuel 61, Ottawa (Ont.), 223 p.

Statistique Canada (1993b). *La construction au Canada 1991 – 1993*, Catalogue annuel 64, Ottawa (Ont.), 201 p.

Strauss, S. et J.S. Zhang (1995). New air-quality software to help end 'sick' buildings: Canada-U.S. project measures airborne chemicals from construction materials, indoor furnishings, *Globe and Mail*, 1995, p. A12.

Swinton, M.C. et J.T. Reardon (1993a). Airtightness and energy efficiency: A delicate balance, CNRC 37858 *Building Performance News 17,* p. 3.

Swinton, M.C. et J.T. Reardon (1993b). Potential for energy conservation through air tightening of new Canadian house, *Indoor Environment*, 2:344-349

Travaux publics Canada (1990). Premature failure of building envelopes and structural components, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, Ottawa (Ont.), 287 p.

Vanier, D.J. (1996a). Proposal for establishing a building envelope life cycle asset management (BELCAM) project, Institute for Research in construction (IRC), 29 août 1996.

Vanier, D.J. et M.A. Lacasse (1996b). « BELCAM project: service life, durability and asset management research », *7th International Conference on the Durability of Building Materials and components, held May 19-23, 1996 in Stockholm, Sweden*, C. Sjöström (dir.), E&FN SPON, London (G.-B.), p. 848-856.

Veitch, J.A. (1993). SBS and psychology: Is it real or all in your head?, *Building Management and Design*, décembre 1993, p. 5, 6, 8.

Veitch, J.A. (1994). Sick building syndrome: Adding psychology to the prescription, CNRC 38460, *Building Performance News 22,* , p. 2.

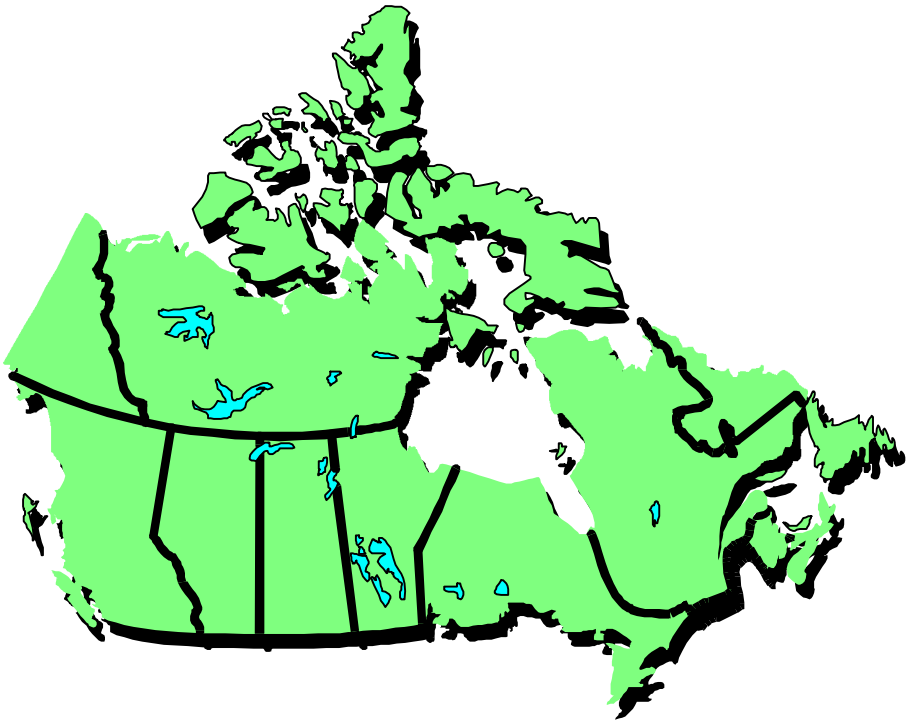
Yazici, D., K. Pressnail, D. O'Malley, L. O'Malley et D. Etkin (1996). Impact of Climate on the Cost of Buildings, *Canadian Meteorological and Oceanographic Society (CMOS) Bulletin*, October 1996, Vol. 24, No. 5, p. 105-111.

# CHAPITRE DIX

# ÉTUDE PAN-CANADIENNE SUR LA VARIABILITÉ ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUES -

# SECTEUR DES ASSURANCES

*Mark. W. Baker*[1]



1. Surveillant des services administratifs, State Farm Insurance Companies, 1845, chemin Clements, Pickering (Ontario) L1W 3R8, téléphone : (905) 837-5817, télécopieur : (905) 837-5822, courriel : 73622.77@ compuserve.com

## RÉSUMÉ

Les assurances sont un secteur décentralisé hétérogène de l'économie canadienne qui revêt d'autant plus d'importance qu'il intervient à la fois dans la vie professionnelle et dans la vie personnelle de tous les Canadiens.

Il y a de fortes chances pour que le changement climatique soit lourd de conséquences sur le secteur des assurances et sur l'économie dans son ensemble. À l'heure actuelle, la plupart des travaux sont de nature générale et, en grande partie, surtout ceux des réassureurs, présentent un caractère mondial plutôt que national. La majorité des recherches se concentrent sur le secteur des biens et des risques divers de l'industrie et concernent les impacts possibles du changement climatique sur les phénomènes extrêmes comme les ouragans, les tornades et d'autres phénomènes météorologiques violents. Plusieurs experts, surtout dans le domaine de la réassurance, craignent que le changement climatique n'ait des effets dévastateurs sur l'industrie ou, du moins, qu'il n'entraîne une augmentation de la fréquence et de la gravité de certains types de phénomènes. D'autres pensent que les changements qui affectent la fréquence et la gravité des phénomènes catastrophiques sont imputables à la variabilité climatique normale ainsi qu'à d'autres facteurs socio-économiques.

Plus de recherches s'imposent dans les domaines qui relient le changement climatique et les phénomènes météorologiques violents à la quantité et au type de dégâts causés et, par conséquent, à l'argent et aux mesures qu'il faut prendre pour atténuer et/ou réparer ces dégâts. Il faut que ces recherches soient à la fois spécifiques et pratiques pour présenter la moindre utilité pour l'industrie.

L'industrie des assurances est à une sorte de carrefour, puisqu'elle est éminemment vulnérable aux catastrophes naturelles et qu'elle se préoccupe donc beaucoup de tout ce qui risque de majorer ses pertes. Il est difficile de prouver hors de tout doute que ce que l'on vit actuellement est imputable au changement climatique et, par conséquent, de prendre des mesures, surtout dans le domaine de la tarification et des primes. Par contre, si l'on attend d'avoir des preuves irréfutables pour prendre des mesures, on risque de se laisser dépasser par les événements.

## INTRODUCTION

### *But*

Le but de ce rapport est d'analyser la prise de conscience, le niveau de connaissance et les opinions de l'industrie des assurances au Canada en ce qui concerne les impacts que le changement climatique risque d'avoir sur elle. On a cherché à résumer les points de vue de diverses provenances. Comme le thème de cette étude est un examen des attitudes du secteur des assurances à l'égard du changement climatique, ce rapport se concentre sur les publications et les revues d'assurance de même que sur les déclarations publiques des porte-parole de ce secteur. On espère ainsi présenter un point de vue détaillé et équilibré du secteur. C'est incontestablement le secteur des biens et des risques divers de l'industrie des assurances qui a publié le plus grand

nombre de documents sur le changement climatique, car il craint d'être sérieusement touché par le phénomène. Le présent rapport se concentre donc sur cette littérature.

***Caractéristiques du secteur de l'industrie des assurances***

L'assurance au Canada est un secteur décentralisé très hétérogène de l'économie qui compte maints protagonistes de taille très variable. En outre, c'est l'un des éléments les plus importants de l'économie car aucune entreprise ne peut fonctionner sans lui. De nombreux paramètres de la vie d'un citoyen (comme le fait de conduire un véhicule) ont un rapport avec le secteur des assurances; c'est pourquoi l'on peut dire que ce secteur pèse sur tous les Canadiens d'une façon ou d'une autre.

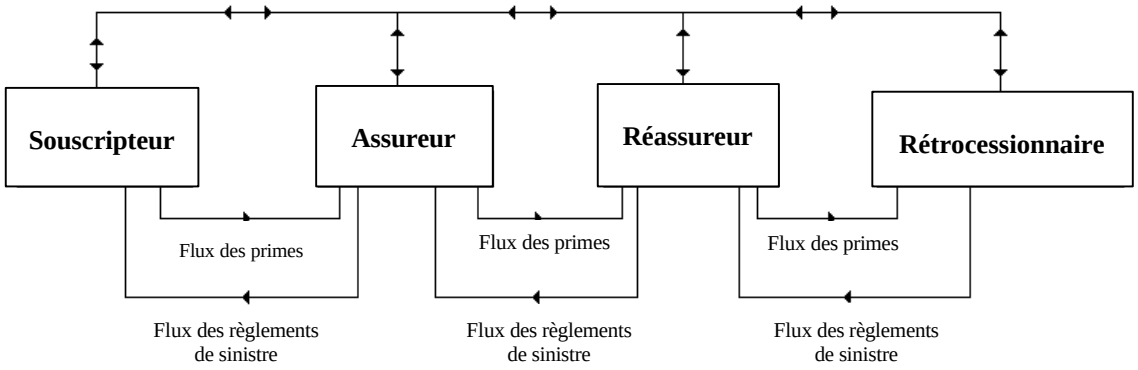
« L'assurance est le moyen de répartir les pertes essuyées par quelques citoyens entre les nombreux autres qui n'en subissent pas » (Institut d'assurance du Canada, 1987). Les pertes essuyées par quelques-uns sont donc compensées par les primes des nombreux autres. La fréquence et l'ampleur des réclamations présentent donc beaucoup d'intérêt, car ces facteurs sont au cœur de l'établissement des tarifs et des sommes remboursées. L'influence possible du changement climatique sur les catastrophes naturelles, qui donnent lieu à de nombreuses réclamations souvent très coûteuses, est le segment qui a beaucoup retenu l'attention du secteur des biens et des risques divers de l'industrie des assurances, et est en fait au cœur de la plupart des réflexions de ce secteur sur l'influence du changement climatique. Les compagnies d'assurance du monde entier, et non pas seulement les compagnies canadiennes, s'estiment très vulnérables aux phénomènes météorologiques extrêmes qui entraînent de nombreuses réclamations. De fait, l'industrie craint qu'un phénomène météorologique erratique provoqué par le réchauffement de la planète ne lui porte à tout moment un coup dont elle aura du mal à se relever. Gerhard Berz, directeur des recherches géoscientifiques à la compagnie Munich Re, d'Allemagne, a dit à ce propos : « Les pertes dues aux catastrophes continueront d'augmenter de façon spectaculaire en taille et en fréquence » et les simulations informatiques indiquent déjà qu'une perte assurée de 50 milliards de dollars US est possible aux États-Unis à la suite d'un seul ouragan (*The Financial Post*, 1997).

On peut se faire une idée de la structure générale du secteur de l'assurance des biens et des risques divers dans le modèle suivant (figure 10.1).

C'est le souscripteur qui paie les primes. L'assureur qui souhaite répartir les risques davantage souscrit une réassurance auprès d'un réassureur. Le réassureur peut lui aussi diluer le risque en se réassurant lui-même. C'est ainsi que le secteur de la réassurance peut diluer les risques à l'échelle internationale, répartissant les pertes entre les différents pays.

Les demandes de règlement sont payées par l'assureur au souscripteur. L'assureur présente alors une demande au réassureur (Remarque : Il n'y a pas de lien juridique entre le réassureur et le souscripteur). Ce sont les rapports entre toutes les parties qui fournissent le retour d'information qui modifie les tarifs, les franchises, le libellé des polices, les couvertures, les souscriptions et tous les éléments des contrats d'assurance qui entrent en jeu.

**Figure 10.1 Modèle simple du secteur de l'assurance des biens et des risques divers**




Source : Adapté de Meyer (1997)

**Tableau 10.1 Les dix premiers assureurs**

| COMPAGNIE | PRIMES DIRECTES |
|---|---|
| | |
| General Accident | 1 304 388 000 $ |
| Zurich | 1 001 731 000 $ |
| Co-operators | 899 259 000 $ |
| Axa | 885 664 000 $ |
| Royal | 822 078 000 $ |
| Ing | 692 957 000 $ |
| Fairfax | 660 939 000 $ |
| Economical | 618 629 000 $ |
| State Farm | 583 051 000 $ |
| Dominion du Canada | 542 164 000 $ |
| Wawanesa | 522 627 000 $ |

Les compagnies d'assurance au Canada peuvent appartenir à des intérêts canadiens ou étrangers, alors que les réassureurs appartiennent pour la plupart à des intérêts étrangers. On ne recense pas seulement un grand nombre d'assureurs, mais aussi de nombreux types différents. Ces types peuvent aller de sociétés mutuelles d'assurance à des compagnies d'assurance par actions à divers groupements d'assureurs. En outre, le marché de l'assurance est investi depuis peu par les banques (Bureau d'assurance du Canada, 1996). On dénombre plus de 230 compagnies qui se livrent une lutte acharnée dans le secteur des biens et des risques divers, et environ 40 réassureurs. Le tableau 10.1 montre le niveau de décentralisation de cette industrie, attesté par le fait que les dix premiers assureurs contrôlent moins de 50 % du marché.

Le secteur canadien de l'assurance des biens et des risques divers engrange environ 16 milliards de dollars (environ 2,24 % du PIB) (Colombo, 1997). Sur ce montant, près de 1,3 milliard de dollars est réassuré. Le surplus (valeur nette) est d'environ 11 milliards de dollars. Sur le total de 16 milliards de dollars, environ 6,49 milliards sont exposés aux catastrophes (tous les montants sont en dollars de 1993). Les bénéfices du secteur ont été de 800 millions de dollars, impôts déduits, ou 7 %, en 1993 (Ross, 1994).

En général, l'industrie est tout simplement un fonds commun d'immobilisations. Or, les capitaux dans le monde moderne sont éminemment mobiles. C'est ainsi que le risque peut être dilué à l'échelle planétaire à la fois par les réassureurs et les assureurs. Le fait qu'une bonne partie du secteur des assurances appartient à des intérêts étrangers (environ 60 %) signifie que le point de vue du reste du monde sur le changement climatique compte beaucoup pour l'industrie canadienne des assurances. Sur le plan positif, cela signifie que les coûts encourus par le Canada à cause du

changement climatique seront répartis entre les pays du monde entier. Cette arme est toutefois à double tranchant et l'industrie canadienne des assurances ne subira pas seulement le contrecoup des changements qui surviendront à l'intérieur de ses propres frontières, mais également des changements qui se produiront dans le reste du monde. Malheureusement, la balance a tendance à pencher du mauvais côté, car le Canada n'est pas perçu comme une zone exposée aux catastrophes (les catastrophes sont le segment du changement climatique que l'industrie craint le plus), surtout par rapport aux États-Unis. Même les pertes récentes essuyées par le Québec et le Manitoba ne souffrent pas la comparaison avec les pertes résultant du passage de l'ouragan Andrew en Floride. La majeure partie des recherches consacrées au changement climatique et à l'industrie des assurances renvoie aux phénomènes météorologiques catastrophiques et à leurs conséquences.

Peut-être convient-il de signaler que les pressions visant à étudier le changement climatique ne proviennent pas seulement de l'industrie des assurances, mais également des investisseurs qui craignent pour la sécurité de leurs placements (*Citizens Trust*, 1997).

## IMPACT DE LA VARIABILITÉ ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUES SUR L'INDUSTRIE DES ASSURANCES

Comme on l'a déjà vu, la plupart des recherches ont porté sur l'assurance des biens et des risques divers et se sont concentrées sur les secteurs de l'assurance commerciale, de l'assurance des biens et, dans une moindre mesure, de l'assurance-automobile. L'industrie des assurances a tendance à mettre sur le même pied tous les phénomènes catastrophiques (les séismes étant souvent mentionnés au même chapitre que les tempêtes dans sa littérature), même si elle reconnaît qu'il s'agit de dangers différents et exceptionnels (Bureau d'assurance du Canada, 1995).

Les compagnies d'assurance et de réassurance se préoccupent des catastrophes d'une année à l'autre et d'une catastrophe à l'autre et elles les suivent de très près. Ce phénomène n'est pas propre au Canada, mais au monde entier, et témoigne du fait que les sommes remboursées à l'issue de catastrophes naturelles peuvent grandement varier d'une année à l'autre (Sigma, 1994; 1996). On semble toutefois s'accorder à penser que les phénomènes météorologiques violents deviennent de plus en plus courants et que les montants remboursés augmentent. Ce constat est attribué, du moins en partie, au changement climatique.

Il faut signaler qu'une grande catastrophe peut provoquer des dégâts incommensurables (l'ouragan Andrew aurait causé pour 30 milliards de dollars US de dégâts) (Ross, 1994). Il devient donc possible d'épuiser une part importante du surplus avec une seule catastrophe. Cela explique la grande vulnérabilité de l'industrie des assurances aux phénomènes météorologiques violents, surtout à une seule grande catastrophe. Certes, ces catastrophes ne sont pas aussi courantes au Canada qu'elles le sont aux États-Unis ou en Europe. Les tempêtes qui s'abattent sur le Canada, même si elles sont coûteuses, n'ont toutefois pas le potentiel destructeur des séismes ou des ouragans qui frappent les États-Unis (Ross, 1994). Il n'en demeure pas moins qu'une augmentation de phénomènes moins importants peut également se solder par une « mort à petit feu ». Le changement climatique peut également donner lieu à une hausse des phénomènes de haute fréquence/faible gravité (comme les tempêtes de grêle) et des phénomènes de basse

fréquence/gravité élevée (comme les ouragans) (Ross, 1994). Une compagnie d'assurance risque de se retrouver aux prises avec les deux situations, souvent en même temps.

Il faut également noter qu'en raison du caractère international de l'industrie des assurances, l'augmentation du nombre de catastrophes imputables au changement climatique ailleurs dans le monde risque d'entamer la capacité à assurer les risques au Canada et d'entraîner une hausse des tarifs. Cela vaut surtout pour le secteur de la réassurance. Comme on l'a vu plus haut, l'industrie estime que le Canada n'est pas très exposé aux catastrophes (par opposition à la côte est des États-Unis par exemple) et semble penser qu'au Canada, le changement climatique produira un plus grand nombre de phénomènes « de haute fréquence/faible gravité ».

L'idée que le Canada n'est pas très exposé aux catastrophes n'est peut-être pas juste, car le pays risque d'être la proie de phénomènes météorologiques violents. Les récentes inondations du Saguenay qui ont coûté 350 millions de dollars et les violentes tempêtes de grêle qui se sont abattues sur Calgary et Winnipeg, et ont coûté respectivement 140 millions et 120 millions de dollars, sont survenues ces dernières années. En outre, le débordement de la rivière Rouge en 1997, même s'il n'a pas entraîné un montant colossal de règlements de sinistre, a néanmoins été un phénomène très violent. Le fait est qu'en dépit des apparences, il se pourrait bien que les Canadiens aient eu de la chance jusqu'ici.

Si les catastrophes se classent en tête de liste des préoccupations de l'industrie face au changement climatique, c'est qu'il est difficile d'y faire face par les méthodes de tarification traditionnelles. Si les changements liés au changement climatique se produisaient progressivement sur un délai de 20 à 30 ans, l'industrie s'y adapterait en modifiant lentement ses couvertures ou tarifs sur des périodes de cinq ans, en utilisant les méthodes actuarielles traditionnelles. Toutefois, si le changement climatique se manifeste par à-coups, entraînant très rapidement un plus grand nombre de phénomènes sensiblement plus coûteux, il y a de fortes chances pour que l'approche lente et régulière, traditionnelle de l'industrie, ne donne pas les résultats escomptés. Les tarifs évoluent pour tenir compte des perturbations atmosphériques (Kovacs, 1994), mais cela prend du temps, et l'industrie n'a peut-être pas le temps qu'il faut.

Le président du Bureau d'assurance du Canada, M. George Anderson, fait observer que l'industrie des assurances a présenté des données qui signalent une augmentation de la fréquence et de la gravité des phénomènes météorologiques violents. Moyennant des chiffres corrigés de l'inflation, le coût des 40 pertes catastrophiques les plus graves essuyées dans le monde entier par les assureurs entre 1970 et 1996 a été tout juste supérieur à 100 milliards de dollars US. Toutefois, 8 % seulement de ce coût a été encouru dans les années 70, 22 % dans les années 80 et 70 % des pertes assurées résultant de catastrophes survenues au cours du dernier quart de siècle ont été enregistrées dans les années 90. Le nombre de pertes assurées résultant de catastrophes survenues dans les années 90 a été neuf fois plus élevé que dans les années 70. Il reste trois années à la présente décennie, et il se pourrait fort bien que ce chiffre augmente encore (Anderson, 1997).

M. Anderson estime que trois facteurs influent sur l'augmentation des pertes résultant de catastrophes naturelles. Le premier est la croissance démographique, le deuxième est le plus grand nombre d'infrastructures coûteuses situées dans des endroits plus vulnérables et le troisième est la

reconnaissance qu'il se produit un changement climatique, dont l'un des résultats semble être la fréquence accrue de phénomènes météorologiques violents. Selon M. Anderson, l'attitude de l'industrie des assurances face au changement climatique s'explique par le fait que les compagnies d'assurance ne sont pas certaines que ce sont les changements climatiques provoqués par les activités humaines qui ont entraîné une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes. Il pense que les détails du débat scientifique ne présentent pas beaucoup d'intérêt pour l'industrie. Ce qui importe, c'est la survie et la durabilité de couvertures d'assurance abordables dont la société moderne est devenue tributaire. L'augmentation du nombre de tempêtes et de phénomènes météorologiques-surprise et leur caractère imprévisible signifient que la couverture d'assurance ne doit sans doute plus être tenue pour acquise (*idem*).

D'autres membres du Bureau d'assurance se font l'écho de ces réflexions. M. Jim Harries, responsable de l'élaboration des polices au Bureau d'assurance du Canada, estime que le changement climatique a déjà des répercussions sur l'industrie des assurances. Les polices d'assurance ont peu à peu offert des garanties multiples, couvrant un éventail de risques beaucoup plus étendu, et précisant plus clairement les éléments exclus. Outre les dégâts matériels, le secteur de l'assurance des biens réagit souvent aux coûts économiques, notamment aux locaux de remplacement ou aux pertes d'exploitation. Il constate que les deux catastrophes les plus coûteuses qui ont frappé le Canada sont survenues au cours de la présente décennie. La première est la tempête de grêle qui s'est abattue sur Calgary en septembre 1991, et qui a entraîné des pertes assurées de 343 millions de dollars CAN. La deuxième a été les graves inondations qui ont frappé en juillet 1996 la région du Saguenay au Québec, provoquant des pertes assurées dépassant 350 millions de dollars CAN et des pertes économiques globales dont on s'attend à ce qu'elles dépassent 1 milliard de dollars CAN. Malgré cela, nous n'avons pas été frappés par une mégacatastrophe de l'ampleur de celles que l'on voit couramment aux États-Unis, en Europe ou au Japon (Harries, 1996).

M. Harries cite Dlugolecki (1996), selon qui il y a cinq grandes catégories de phénomènes extrêmes qui risquent de subir le contrecoup du changement climatique, dont certains sont interconnectés :

A. Inondations des bassins fluviaux et du littoral.

B. Sécheresses.

C. Tempêtes de vent – Les ouragans et les typhons sont considérés comme les principaux risques, les dégâts dépendant de leur force, de leur durée et de la présence de centres de population dans leur trajectoire.

D. Autres phénomènes convectifs extrêmes, parmi lesquels les tempêtes de grêle, les orages et les tornades.

E. Extrêmes de température – les principaux risques pour le secteur de l'assurance des biens sont le froid extrême qui peut faire éclater les tuyaux et provoquer d'importants dégâts d'eau.

Tous ces phénomènes coûtent de l'argent à l'industrie en règlements de sinistre, et tous peuvent subir l'influence du changement climatique.

Les publications officielles de l'industrie de la réassurance témoignent d'un niveau de préoccupation encore plus élevé. M. Berz, de la compagnie Munich Re, estime que « l'effet de serre » ajoutera aux problèmes actuels des pertes catastrophiques (Berz, 1993). Il pense que l'intensité croissante de tous les phénomènes convectifs dans l'atmosphère multipliera la fréquence et la gravité des cyclones tropicaux et extratropicaux, des tornades, des tempêtes de grêle, des inondations et des raz de marée dans quantité de régions du monde. Il estime que les réassureurs paient une portion disproportionnée de ces coûts (Berz, 1995). Selon M. Berz, la question décisive n'est pas de savoir si cette longue liste de preuves est concluante, mais de déterminer si les données climatiques et les modèles informatiques du climat peuvent fournir suffisamment d'informations pour nous donner le temps d'évaluer les changements futurs et d'élaborer des stratégies d'adaptation et de prévention fructueuses. Les stratégies visant à faire face au changement climatique doivent pouvoir être ajustées et ne pas aboutir à des impasses. En outre, les stratégies les plus fructueuses sont celles qui dès le départ sont « sans regrets », comme la diminution de la consommation de carburant des véhicules ou la réduction de la consommation d'énergie en général (Berz, 1995).

Dans un autre rapport (Berz *et al*., 1995), on apprend que le nombre de catastrophes naturelles majeures survenues ces dix dernières années a été quatre fois plus élevé que dans les années 60, que les pertes économiques ont été multipliées par six et les pertes assurées par 14, par rapport aux années 60 (compte tenu de l'inflation). Berz *et al*. (1995) sont d'avis qu'il y a plusieurs causes à ce phénomène :

A. Forte augmentation des pertes en raison des concentrations de plus en plus denses de populations et de biens, surtout dans les régions gravement exposées à des catastrophes naturelles, comme les zones côtières.

B. Les changements climatiques et les autres dommages causés à l'environnement exercent une influence croissante sur la fréquence et l'intensité des catastrophes naturelles.

C. Ce n'est pas une coïncidence si les sinistres attribuables aux catastrophes naturelles ont augmenté de manière si spectaculaire depuis le début des années 80, c'est-à-dire dans la période même qui a été marquée par une hausse exceptionnelle des températures moyennes globales.

D. La température plus élevée de l'atmosphère et des océans renforce quantité de processus atmosphériques et multiplie les risques de tempêtes de vent, de raz de marée, de tempêtes, d'inondations et d'autres phénomènes extrêmes.

C'est pourquoi, selon eux, le phénomène du changement climatique se manifestera en premier lieu par des catastrophes naturelles qui auront des effets dévastateurs à long terme. C'est pour cette raison même qu'ils estiment qu'il faut prendre des mesures radicales le plus vite possible pour empêcher toute nouvelle hausse de l'effet de serre d'origine humaine (*idem*).

La Swiss Reinsurance Company a elle aussi émis des déclarations sans équivoque sur le changement climatique. Elle est d'avis qu'il est impossible de prédire les impacts du changement climatique sur la société, faute de connaissances et en raison du fait que la réaction de l'homme aux manifestations météorologiques est essentiellement une question d'ajustement et d'adaptation (*Swiss Re,* 1994).

Ces différents types de tendances compliquent les prévisions du changement climatique. Il y a peu de chances qu'un signal sans équivoque du réchauffement climatique se dégage de la somme de statistiques avant que la valeur actuelle de la tendance ne devienne si catégorique qu'il n'est plus possible de la confondre avec les processus périodiques et épisodiques qui la masquent (Swiss Re, 1994).

Le rapport de la compagnie Swiss Re a été préparé sur la base des constatations du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC). Il est intéressant de noter que cette compagnie a eu du mal à déceler les différences ténues à cause du manque de données. L'« effet de serre » signifie peut-être que les régimes météorologiques n'ont pas encore ressenti le plein effet du changement climatique à cause d'autres processus. Il n'en reste pas moins que l'incertitude et la variabilité du climat signifient qu'un amer désillusionnement est possible à tout moment, et non pas seulement dans plusieurs dizaines d'années. Le groupe Swiss Re pense qu'une élévation du niveau de la mer est possible et qu'il est éminemment probable que les brefs épisodes de précipitations extrêmement fortes se multiplient. Il ne pense pas toutefois qu'il y aura une augmentation du nombre de cyclones tropicaux.

Selon le groupe Swiss Re, le climat n'est pas constant, mais variable. Il s'ensuit donc que tous les plans fondés sur la constance du climat sont inexacts, dans la mesure où les phénomènes climatiques futurs s'écartent de ceux qui les ont précédés. Fait important, le rapport du groupe Swiss Re souligne que le passé ne détient plus les clés de l'avenir. Il est totalement impossible de prédire les probabilités dans un climat variable où les caractéristiques du temps futur peuvent être aussi différentes des caractéristiques du temps passé qu'un hiver froid peut l'être d'un été chaud. Tant qu'il sera impossible de prévoir l'évolution du climat futur et que l'on pourra présumer à juste raison qu'en l'espace de deux générations humaines, on atteindra des valeurs plus élevées qu'à n'importe quel moment des 10 000 dernières années, il sera impossible d'exclure la survenue possible, n'importe où sur la Terre, de tempêtes soudaines d'une force et d'une durée sans précédent et difficilement imaginables. C'est pourquoi toute tentative d'estimer la probabilité de situations météorologiques extrêmes risque de causer plus de tort que de bien, sans compter que ces calculs procurent un sentiment de sécurité trompeur (*idem*).

Le groupe Swiss Re mentionne également la notion de coup de frein à la prospérité qui équivaut à une aggravation plus ou moins prononcée des possibilités de développement. Cette notion permet de déterminer dans quelle mesure le développement d'un système touché peut subir un recul. Essentiellement, il s'agit d'une perte de potentiel. Moyennant une assurance suffisante, il est possible d'atténuer considérablement le coup de frein à la prospérité, même si cela présuppose l'existence d'une couverture d'assurance abordable. Il faut signaler que ce rapport va beaucoup plus loin qu'une simple analyse de la situation du secteur des assurances et qu'il fait également état des guerres et autres troubles sociaux à même de résulter du réchauffement de la planète, en allant

même jusqu'à dire que ceux-ci subiront une hausse spectaculaire (*idem*). Malgré l'utilité de ces affirmations, elles semblent s'écarter du domaine de l'assurance pour investir celui de la science politique.

Les remarques précédentes de l'industrie de la réassurance ont une orientation mondiale au lieu de porter expressément sur la situation du Canada, tandis que les déclarations du Bureau d'assurance du Canada sont de nature plutôt générale. Malheureusement, il ne semble pas qu'il soit possible de faire mieux pour l'instant. Un document canadien signé de Etkin et Brun (1997) analyse la situation dans une optique un peu moins apocalyptique et est aussi précis que le permet la science aujourd'hui. Les auteurs de ce document affirment ceci :

A. Si l'on se fonde sur les résultats de la plupart des modèles numériques du climat, au cours du prochain demi-siècle, le doublement des concentrations de $CO_2$ occasionnera un réchauffement global moyen du climat de la Terre qui se situera entre 1,5 et 4,5 °C, une augmentation proportionnelle des précipitations moyennes globales et une multiplication des phénomènes extrêmes en général.

B. Aucune preuve incontestable n'étaye l'hypothèse que les ouragans gagneront en fréquence ou en gravité, même si certains experts adhèrent à cette théorie.

C. On ne sait pas encore si la fréquence des tempêtes extratropicales (les cyclones des latitudes tempérées) augmentera à l'avenir, même si on a des indications que certaines régions connaîtront des tempêtes plus fréquentes ou plus intenses.

D. Divers indices appuient l'hypothèse que les orages augmenteront en fréquence et en gravité à l'avenir.

E. Les vagues de chaleur, relativement rares, deviendront plus courantes avant le milieu du siècle prochain et les vagues de froid moins fréquentes.

F. Tout porte à croire que les inondations locales augmenteront, les orages étant plus intenses et plus fréquents.

G. Des sécheresses plus fréquentes sont l'une des conséquences probables du réchauffement du climat.

Selon Etkin et Brun (1997), les conclusions sont mitigées quant aux impacts du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des phénomènes extrêmes au Canada. Un réchauffement du climat se traduira par un plus grand nombre d'orages accompagnés de précipitations extrêmes, de tornades, de grêle et de sécheresses, tandis que les vagues de froid se feront de plus en plus rares.

Il faut mentionner que les inondations préoccupent l'industrie des assurances, mais pas autant ni de la façon qu'un profane pourrait l'imaginer à première vue. La plupart des polices d'assurance, surtout celles des propriétaires occupants, ne couvrent pas les inondations. Les préoccupations de

chaque compagnie d'assurance dépendent des couvertures qu'elle offre et qui sont affectées par les inondations. C'est ainsi qu'une compagnie qui offre une protection contre le refoulement des égouts sera plus préoccupée par les inondations qu'une autre qui ne le fait pas. Il semble néanmoins que de nombreux professionnels de l'industrie des assurances écartent souvent prématurément les inondations comme une éventuelle catastrophe, car ils ne pensent initialement qu'aux polices d'assurance des particuliers et ne tiennent pas compte des polices d'entreprises, des garanties de privation de jouissance, des assurances contre les pertes d'exploitation ou d'autres polices et avenants qui protègent contre les inondations.

Il faut signaler que plusieurs autres facteurs peuvent être à l'origine d'une augmentation des pertes dues aux catastrophes. Parmi les facteurs qui peuvent expliquer l'augmentation des dégâts causés par les tempêtes figurent :

A. L'étalement des villes – On a assisté ces 20 dernières années à une augmentation appréciable de la population et de la taille des villes. En outre, les populations en général s'installent dans des zones exposées aux catastrophes, surtout les communautés de loisirs ou de retraités;

B. L'insuffisance des infrastructures – Il est fréquent que l'augmentation de la taille d'une ville ne s'accompagne pas de l'amélioration nécessaire des infrastructures. Citons à titre d'exemple l'augmentation insuffisante du potentiel des égouts et des égouts pluviaux. Cela peut se traduire par un plus grand nombre de demandes de règlement en cas de refoulement des égouts;

C. Une piètre planification – Quand on autorise notamment la construction d'immeubles dans des plaines inondables. Il est rare que cela soit le cas au Canada à l'heure actuelle;

D. Des codes du bâtiment insuffisants ou mal appliqués. Cela est d'autant plus préoccupant qu'on évalue que 25 % des pertes causées par l'ouragan Andrew auraient pu être évitées par un meilleur respect du code du bâtiment local (Kunreuther, 1996);

E. L'« arnaque » postérieure à un sinistre – Hausse injustifiée du coût des matériaux de construction et de la main-d'œuvre dans le sillage d'une grande catastrophe;

F. La fraude – Malheureusement, certains cherchent à profiter d'un phénomène extrême. Par exemple, certains ne font pas réparer leur automobile endommagée par la grêle après avoir déposé une demande de règlement et déposent une autre demande après une deuxième tempête de grêle;

G. La vulnérabilité des ouvrages aux dégâts. L'usage répandu des parements en aluminium dans les zones exposées à la grêle est un bon exemple;

H. Le règlement des pertes d'entretien par les assurances;

I. Le potentiel d'intervention des assureurs – C'est-à-dire que les compagnies de moindre importance ne sont peut-être pas en mesure de dépêcher des experts sur les lieux d'une catastrophe pour y régler les sinistres (Ross, 1994). Les experts en sinistres sont toujours tentés dans ces circonstances de se dérober au règlement d'un sinistre, ce qui se solde par la majoration globale du règlement des réclamations;

J. L'élargissement des couvertures offertes depuis 20 ans. L'augmentation des couvertures s'accompagne d'une augmentation du nombre de demandes de règlement et des remboursements.

Il faut signaler que ces facteurs sont sans doute aussi importants, sinon plus, que le changement climatique. À tout le moins, ils constituent un facteur de « bruit » dans tout calcul financier qui rend plus difficile de dégager une tendance.

Il faut également signaler l'existence d'un courant d'opinion selon lequel les catastrophes n'affichent pas de tendance à la hausse. Pielke et Landsea (1997) affirment avoir réfuté la thèse des effets des ouragans aux États-Unis et des impacts du changement climatique sur ce pays. Ils déclarent que, si l'on normalise les données sur les pertes des trois dernières décennies, en tenant compte de l'inflation, de l'augmentation de la richesse et des changements démographiques, on s'aperçoit que les dégâts normalisés ont en fait baissé dans les années 70 et 80. Les pertes essuyées dans les années 90 ne sont pas sans précédent et ressemblent en fait aux pertes enregistrées dans les années 40 pour ce qui est de la fréquence et de la gravité (Pielke et Landsea, 1997). Les pertes causées par les ouragans seraient donc plus indicatives des changements survenus dans la société, comme les neuf facteurs mentionnés plus haut. C'est ainsi que l'augmentation du nombre d'ouragans s'inscrit dans la variabilité naturelle du climat et non dans le changement climatique. Étant donné que, selon d'autres sources, on n'a guère de preuves d'une augmentation du nombre des ouragans due au changement climatique (Etkin, 1997), il se pourrait que Pielke et Landsea (1997) aient partiellement raison. Cela n'est malheureusement pas d'un grand réconfort pour une industrie vulnérable à un phénomène du type de l'ouragan Andrew. En outre, Pielke et Landsea (1997) font fi des autres types de phénomènes climatiques qui provoquent de sérieux dégâts matériels et que le Canada a plus de chances de connaître.

Les compagnies d'assurance du Canada semblent faire peu de recherches de leur propre chef. Elles participent bien à des tribunes lorsqu'on les y invite et collaborent aux travaux des organisations qui les représentent, comme le Bureau d'assurance du Canada ou le Groupement technique des assureurs du Canada. C'est là un excellent moyen de mettre leurs ressources en commun, de faire des recherches, de diffuser les résultats et d'obtenir le meilleur rendement pour leurs investissements.

Si les réassureurs font bien quelques recherches de leur côté, celles-ci sont d'échelle mondiale, et les données propres au Canada sont publiées de la même manière que par les assureurs. Le gouvernement et le milieu universitaire sont en fait responsables d'une bonne part de ces recherches dont les résultats sont présentés à l'industrie des assurances dans le cadre de diverses tribunes. Plusieurs tentatives ont été faites pour quantifier les résultats de ces recherches pour le changement climatique et l'industrie des assurances. Citons à titre d'exemple les recherches

menées par Friedmann en 1988, dont les résultats financiers portaient sur l'est des États-Unis et peuvent se résumer ainsi :

Changement estimatif du potentiel destructeur annuel des catastrophes répertoriées par l'industrie des assurances causé par les périls assurés du vent et de la grêle, entre le régime climatique actuel et une période indéfinie se situant dans la période climatique (1990-2110) de transition vers un réchauffement prévu du climat imputable à « l'effet de serre » (tableau 10.2). Le potentiel destructeur est exprimé en dollars US de 1989 (tableau 10.3).

L'intention du document est louable et c'est l'un des rares à mettre un prix sur une prévision. Friedmann omet toutefois de citer le modèle de réchauffement climatique sur lequel reposent les calculs. De fait, il déclare dans sa conclusion qu'à l'époque, ils étaient fondés sur « la maigre somme de données pertinentes alors disponibles. Les résultats seront l'objet de modifications majeures à mesure qu'un plus grand nombre de données crédibles seront recueillies ». Ses résultats sont donc suspects sur le plan de la prévisibilité et, de fait, Friedmann déclare qu'il reste encore beaucoup de travail à faire (Friedmann, 1988).

En dehors de l'assurance des biens et des risques divers, la littérature fait état des effets possibles du changement climatique sur les taux de mortalité et sur l'assurance-vie. On peut lire à plusieurs reprises que le vieillissement de la population complique beaucoup le tableau. À mesure que la population vieillit, elle est moins en mesure de faire face aux catastrophes naturelles. De plus, et cela est malheureux, les personnes âgées se regroupent souvent dans des zones dangereuses. On peut lire également que les sécheresses, les inondations et les vagues de chaleur peuvent accroître la mortalité et la morbidité. Il y a en outre le risque des maladies à transmission vectorielle qui sont de nature tropicale, l'exemple cité étant celui de la malaria (Lecomte, 1994). On ne semble

**Tableau 10.2 Changement du potentiel destructeur annuel**

| Type de tempête | Dégâts annuels fondés sur les conditions climatiques actuelles | Changement du potentiel destructeur annuel | Dégâts annuels fondés sur les conditions climatiques de transition |
|---|---|---|---|
| | | | |
| Tempête hivernale | 230 000 000 $ | - 20 000 000 $ | 210 000 000 $ |
| Ouragan | 680 000 000 $ | + 270 000 000 $ | 950 000 000 $ |
| Violente tempête locale | 780 000 000 $ | + 25 000 000 $ | 805 000 000 $ |
| | | | |
| Total | 1 690 000 000 $ | + 275 000 000 $ | 1 965 000 000 $ |

D'après Friedmann, 1988

**Tableau 10.3 Dommages totaux prévus**

| Intervalle de temps | Hausse du potentiel destructeur annuel des catastrophes d'origine météorologique par rapport au régime climatique actuel | Hausse approximative en pourcentage par rapport au régime climatique actuel |
|---|---|---|
| 1995-1999 | + 150 000 000 $ | 10 % |
| 2000-2004 | + 300 000 000 $ | 20 % |
| 2005-2010 | + 500 000 000 $ | 30 % |

D'après Friedmann, 1988

pas croire toutefois que cela risque d'altérer beaucoup les tableaux actuariels, du moins pas à l'échelle de la pandémie de sida ou d'autres phénomènes qui ont eu une profonde incidence sur l'industrie de l'assurance-vie. Cette dernière ne semble guère porter d'intérêt à la question (Dlugolecki *et al.*, 1996).

Il se peut par ailleurs que l'assurance-récolte doive elle aussi faire face au changement climatique. Sur le plan des catastrophes naturelles, ce secteur se retrouve dans le même bateau que l'assurance des biens et des risques divers, surtout en ce qui concerne la grêle. Il doit néanmoins composer avec d'autres problèmes comme la sécheresse, le gel et l'humidité excessive (Wallace, 1997). Il y a fort à parier que ces autres facteurs ne présenteraient guère de problèmes si le climat devait évoluer lentement sur un certain nombre d'années. Toutefois, les systèmes naturels fonctionnent généralement par à-coups, et tout bond important de ces phénomènes sur un court intervalle de temps risque de ne pas laisser à l'industrie le temps de s'adapter.

Il est intéressant de constater que l'industrie de l'assurance maritime ne semble guère s'intéresser à la question. Cela est d'autant plus curieux que le changement climatique et ses effets possibles sur le littoral, la banquise, le volume et le moment de la rupture des glaces et d'autres effets océaniques auront incontestablement des répercussions sur la marine marchande et sur les compagnies d'assurance qui l'assurent.

Les compagnies d'assurance sont capables de faire face à une évolution méthodique lente. Cependant, comme on l'a déjà vu, le climat n'évolue ni lentement ni méthodiquement, mais plutôt par à-coups. Même si les méthodes actuelles permettent de faire face à une augmentation des phénomènes météorologiques violents, il ne semble pas que la nature soit prête à coopérer. C'est pourquoi une bonne part de l'industrie estime ne pas pouvoir adopter une attitude attentiste à l'égard du changement climatique. Même si une certaine incertitude persiste, le scénario le moins probable est une absence totale de changement climatique. Toute évaluation des risques, comme celle à laquelle procède l'industrie des assurances pour les dangers naturels en partant de l'hypothèse que le climat est constant, risque donc d'être erronée, et sans doute même sérieusement. Cela paraît être en fait le principal message qui s'adresse à l'industrie, à savoir que le passé ne détient plus les clés de l'avenir et que l'ancienne façon de faire des affaires n'est plus adaptée à la conjoncture actuelle. S'il n'a rien fait d'autre, le débat sur le changement climatique a certainement permis de mieux comprendre le climat et ses rapports avec le secteur des assurances.

## STRATÉGIES D'ATTÉNUATION

L'industrie dispose de plusieurs stratégies d'atténuation. Celles-ci doivent être efficaces, car le secteur de l'assurance est l'une des principales méthodes dont dispose la société pour faire face aux phénomènes météorologiques violents et, par conséquent, à quantité de paramètres du changement climatique. L'industrie des assurances est de nature pragmatique et a besoin de méthodes pragmatiques pour atténuer les effets des catastrophes naturelles (Lecomte, 1994).

Dlugolecki (1996) affirme que l'industrie des assurances a adopté quatre stratégies pour faire face à l'évolution des risques. Il s'agit de la limitation des risques, de la gestion des risques matériels, du transfert des risques et du calcul des prix d'ordre technique. Il est d'avis qu'il faut une démarche

plus fondamentale pour faire face au changement climatique et aux risques de catastrophe, notamment des voies de communication et de coopération entre les souscripteurs, l'industrie des assurances et le gouvernement. Il fait également valoir la nécessité de financer les réserves par des allégements fiscaux (Dlugolecki, 1996).

On trouvera ci-après une liste plus détaillée de toutes les options citées par toutes les sources :

A. Tenter de modifier le climat

1 Il faut une intervention politique pour réduire les GES. C'est ce qu'ont souvent suggéré les compagnies de réassurance européennes comme la Munich Reinsurance et la Swiss Reinsurance.

2. Il faut financer les activités de modification du temps. Mentionnons à titre d'exemple l'ensemencement des nuages dans les Prairies. Cette démarche canadienne a porté fruit. Il faut signaler toutefois les problèmes juridiques que soulève le fait de forcer la grêle destinée à une région à tomber dans une autre et à y provoquer d'éventuels dégâts.

B. Tenter de modifier les infrastructures sociales

1. Il faut financer les recherches sur la façon d'améliorer les matériaux et les méthodes de construction, et les pressions visant à améliorer les codes du bâtiment. C'est là un mode de gestion des risques qu'affectionne l'industrie des assurances qui possède une grande expérience de ce type d'activité de concert avec d'autres industries et secteurs de l'économie.

C. Limiter l'exposition. Étant donné que cela limite seulement l'exposition d'une compagnie d'assurance, il ne s'agit pas vraiment d'une stratégie d'atténuation pour la société en général. De fait, les assureurs sont toujours réfractaires à limiter les couvertures. Le retrait du marché n'est qu'un dernier recours. L'industrie de la réassurance préfère répartir encore plus les risques, mais là aussi sans autres stratégies, ce qui n'atténue pas réellement les risques pour toute la société.

1. Limiter le nombre de polices souscrites ou la couverture totale dans une région géographique donnée.
2. Réduire les limites des polices.
3. Augmenter les franchises.
4. Changer les modalités de paiement (en remboursant la valeur réelle plutôt que le coût de remplacement).
5. Modifier les règles de souscription quant aux risques couverts.
6. Se retirer du marché.
7. Se tourner vers le secteur de la réassurance pour répartir encore plus les risques.

D. Atténuation financière

1. Allégement fiscal pour les réserves destinées à rembourser les dégâts causés par les catastrophes naturelles. Cela a pour effet de créer un fonds commun d'immobilisations qui protège les souscripteurs de la compagnie (Bureau d'assurance du Canada, 1995).

2. Augmenter les taux pour produire d'autres primes. Encore une fois, il ne s'agit pas d'une méthode qu'affectionne beaucoup l'industrie.

Il faut signaler que le régime fiscal du Canada ne facilite pas l'établissement de réserves, ce qui explique que l'argent soit sorti du pays pour permettre la création de ces réserves (Ross, 1994). Il existe quantité de moyens d'agir ainsi, ce qui suppose la création de sociétés captives. Cette option n'est pas seulement accessible aux assureurs, mais également à toute compagnie qui entend faire face à un risque par l'entremise d'une société captive ou d'un groupement d'assureurs (Head *et al.*, 1993).

Le concept de groupement d'assureurs connaît une grande popularité à l'heure actuelle et est en fait envisagé dans le monde entier, même au palier international où des groupes de petits pays songent à créer leurs propres groupements d'assureurs pour faire face aux catastrophes attribuables au changement climatique (PNUE, 1997).

Enfin, presque chaque document cité souligne la nécessité d'une coopération entre tous les paliers de gouvernement, l'industrie des assurances et les souscripteurs, dans tous les cas qui mettent en jeu les phénomènes météorologiques violents, les risques de catastrophe, le changement climatique et les assurances. Il ne faut pas seulement s'efforcer d'atténuer les effets par des moyens pratiques et durables, mais éduquer toutes les parties sur les différents paramètres du problème. Il s'agit d'un problème qui touche toute la société et dont la solution nécessitera de mobiliser toutes les ressources de la société.

## LACUNES ET DOMAINES NÉCESSITANT DES RECHERCHES PLUS FOUILLÉES

Les recherches sérieuses menées jusqu'ici semblent s'être limitées à un tour d'horizon des effets possibles du changement climatique sur l'industrie des biens et des risques divers. Ces recherches sont habituellement de nature très générale. Il faut signaler cependant qu'il existe suffisamment de données de base sur les catastrophes et les phénomènes météorologiques violents au Canada. Par exemple, les ouragans sont l'affaire des services météorologiques et environnementaux du Service de l'environnement atmosphérique, alors que l'analyse des risques des tornades est entre les mains du groupe d'évaluation des risques de la Division des risques naturels (Davenport et Charlwood, 1995). En bref, quantité de travaux préliminaires ont été faits sur l'évaluation des risques, qui ont une application directe au secteur de l'assurance, particulièrement aux catastrophes naturelles. Mais, en dépit de toutes ces données et des divers modèles climatiques et de réchauffement de la planète dont on dispose, il n'a pas été possible d'établir des prévisions régionales détaillées qui fournissent des statistiques définitives sur l'augmentation ou la diminution des catastrophes naturelles.

Il existe donc une lacune considérable « au bas de l'échelle », compte tenu du peu de recherches qui ont été menées et qui permettent d'attribuer une valeur monétaire au changement climatique. Ce dont l'industrie a besoin, ce sont des renseignements détaillés comme : « le doublement des concentrations de $CO_2$ entraînera une hausse de la température de X degrés Celsius dans le sud de l'Ontario. Cela provoquera environ un nombre Y de tempêtes de grêle qui causeront pour Z dollars de dégâts ». Ce genre de données devrait permettre à l'industrie de déterminer quels changements elle doit apporter à ses pratiques commerciales pour faire face à une telle situation. On a également besoin de modèles améliorés du climat par rapport aux dégâts (Ross, 1994), et non pas seulement du changement climatique (White et Ross, 1995). Quant au secteur de l'assurance-vie, il a besoin de recherches pour savoir l'effet qu'une hausse de la température et des phénomènes météorologiques violents aura sur les tableaux de mortalité. Tous les « modèles » doivent également faire preuve d'un taux de confiance élevé. Il est en effet difficile d'augmenter les tarifs ou de réduire les couvertures sur la foi d'une possibilité ou même d'une vague probabilité.

Dans le cas des phénomènes météorologiques violents, la question du changement climatique peut même ne pas se poser. L'industrie de l'assurance des biens et des risques divers doit se pencher dès maintenant sur la question des phénomènes qui risquent de lui porter préjudice, comme les ouragans, de même que sur les populations et les infrastructures exposées. Il se peut que ces situations soient ou non attribuables au changement climatique. Ce qui peut ou non être fait en prévision de l'avenir se classe donc derrière ce que l'on peut faire dès maintenant.

L'industrie semble être à la croisée des chemins. Il n'y a pas d'accord général au sein des milieux scientifiques sur le changement climatique, et les mesures à prendre pour contrecarrer ses effets font donc l'objet d'une importante controverse. Lorsque le milieu scientifique sera parvenu à un accord à ce sujet, l'industrie des assurances devra décider quelles mesures elle entend prendre, ce qui risque d'être assez éloigné dans le temps. Quelle que soit la solution, elle devra faire partie intégrante de la réponse globale de la société, car les mesures d'atténuation du secteur des assurances sont insuffisantes à elles seules (Wallace, 1997). En bref, il faudra opter pour le concept global de « gestion des risques ». Il faut bien admettre que le Canada est vulnérable aux phénomènes climatiques et, par conséquent, à toute force, naturelle ou artificielle, qui risque de les modifier.

Le changement le plus profond concerne sans doute la façon de penser de l'industrie des assurances. Si le passé ne détient plus les clés de l'avenir, bon nombre des méthodes actuarielles dont on se sert pour prévoir les pertes et, par conséquent, pour fixer les taux, devront sans doute être modifiées. Confier cette méthode éprouvée au secteur de la modélisation sera une démarche importante pour de nombreuses compagnies, que beaucoup refuseront sans doute d'adopter.

En fin de compte, si aucune mesure n'est prise avant qu'il n'y ait plus l'ombre d'un doute, les compagnies d'assurance et de réassurance auront vraisemblablement essuyé de très lourdes pertes, préjudiciables pour toute l'industrie. Pour l'heure, ce n'est pas ce que nous savons, mais ce que nous ignorons qui risque de nous causer du tort.

## RÉFÉRENCES

Anderson, G. (1997). Présentation à la 22nd Royal Bank Financial Management Conference for Insurance Companies, Victoria (C.-B.), 4 juin 1997.

Berz, G. (1993). Global Warming and the Insurance Industry, *Interdisciplinary Science Reviews*, 18(2), p. 120-125.

Berz, G. (1995). *National Disasters and the Greenhouse Effect: Possible Countermeasures by the Insurance Industry*, Geoscience Research, Munich Reinsurance Company, Munich (Allemagne), 9 p.

Berz, G. et Conrad K. (1994). Stormy Weather: The Mounting Windstorm Risk and Consequences for the Insurance Industry, *Ecodecision*, 12, p. 65-68.

Berz, G., Gamble, M., Loster, T. et Wirtz, A. (1995). Schaden-Spiegel, losses and loss prevention, 1995, No. 1, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Munich (Allemagne).

Bureau d'assurance du Canada (1995). *Facts of the General Insurance Industry in Canada, 1995*, 22e éd., The Insurance Bureau of Canada, Toronto (Ont.).

Bureau d'assurance du Canada (1996). *Facts of the General Insurance Industry in Canada, 1996*, 23e éd., The Insurance Bureau of Canada, Toronto (Ont.).

Bureau d'assurance du Canada (1986). Principles and Practice of Insurance, Course 11, édition 1987, The Insurance Institute of Canada.

Citizens Trust Web Page; Climate Change and the Insurance Industry, HTTP://www.elund.com.climate_change.html

Colombo, J.R. (dir.) (1997). *The 1997 Canadian Global Almanac*, Macmillan Canada, Toronto (Ont.).

Davenport, A. G. et Charlwood, R. G. (1995). « Towards a Comprehensive Assessment of Risks due to Natural Hazards », dans *Proceedings of a Tri-Lateral Workshop on Natural Hazards, held Feb. 11-14, 1995 in Merrickville, Ontario*, D. Etkin (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 1-26 à 1-44.

Dlugolecki, A.F., Clark, K.M., Knecht, F., McCaulay, D., Palutikof, J.P. et Yambi, W. (1996). Financial Services, dans *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific - Technical Analyses*, R. Watson, M. Zinyowera et R. Moss (dir.), Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), p. 539-560.

Etkin, D. et Brun, S.E. (1997). Climate Change and Atmospheric Hazards, dans *Coping with Natural Hazards in Canada: Scientific, Government and Insurance Industry Perspectives*, Environmental Adaptation Research Group, Environnement Canada et The Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Insurers' Advisory Organisation Inc., Toronto (Ont.), p. 66-73.

*The Financial Post*, 12 mars 1997, Toronto (Ont.).

Friedman, D.G. (1989). « Implications of climate change for the insurance industry », dans *Coping with Climate Change, Proceedings of the Second North American Conference for Climate change, held in Washington D.C., December 6-8, 1988*, J.C. Topping Jr. (dir.), Climate Institute, Washington (D.C.), p. 389-400.

Harries, J. (1997). « Climate Change and Extreme Events: An Insurance Industry Perspective », dans *Clean Air, Clean Water, Proceedings of the Climate Variability, Atmospheric Change and Human Health Conference held November 4-5, 1996 in Toronto, Ontario*, K.B. Ogilvie, R. White, D.V.J. Bell et Q. Chiotti (dir.), Pollution Probe, Toronto (Ont.), p. 76-79.

Head, G.L., Elliott, M.W. et Blinn, J.D. (1993). *Essentials of Risk Financing*, Vol. 1, Insurance Institute of America.

Kovacs, P. (1995). « Discussion - Insurance Industry », dans *Proceedings of a Workshop on Improving Responses to Atmospheric Extremes, The Role of Insurance and Compensation, held October 3-4, 1994, Toronto, Ontario*, J. McCulloch et D. Etkin (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 4-14 à 4-18.

Kunreuther, H. (1996). Mitigating Disaster Losses Through Insurance, *Journal of Risk and Uncertainty*, 12, p. 171-197.

Lecomte, E.L. (1995). « International Disaster and Mitigation Efforts; The American Experience », dans *Proceedings of a Workshop on Improving Responses to Atmospheric Extremes, The Role of Insurance and Compensation, held October 3-4, 1994, Toronto, Ontario*, J. McCulloch et D. Etkin (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 4-8 à 4-13.

Meyer, M. (1997). Appendix D - The insurance industry and climate change on the Prairies: a status report, dans *Responding to global climate change in the Prairies: Volume III of the Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, R. Herrington, B. Johnson et F. Hunter (dir.)., Environnement Canada, Regina (Sask.), 8 p.

Pielke, R.A. et Landsea, C.W. (1997). « Normalised Hurricane Damages in the United States: 1925-1995 », *Paper prepared for a Panel on Social, Economic, and Policy Aspects of Hurricanes at the 22nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, held May 19-23, 1997*, American Meteorological Society, Fort Collins Co. Aussi sur le World Wide Web à http://www.dir.ucar.edu/esig/HP-roger/hurr/norm.html

Ross, A.H (1995). « Canadian Insurance Industry », dans *Proceedings of a Workshop on Improving Responses to Atmospheric Extremes, The Role of Insurance and Compensation, held October 3-4, 1994, Toronto, Ontario*, J. McCulloch et D. Etkin (dir.), Environnement Canada, Downsview (Ont.), p. 4-1 à 4-7.

Swiss Re (1994a). *Global warming: Element of risk*, Swiss Reinsurance Company, Zurich (Suisse), 48 p.

Swiss Re (1994b). *Sigma 2*, Swiss Reinsurance Company, Economic Research Section, Zurich (Suisse), 48 p.

Swiss Re (1996). *Sigma 2*, Swiss Reinsurance Company, Economic Research Section, Zurich (Suisse).

UNEP (s.d.). Insurance Against Climate Change, the AOSIS Proposal, http.//www.unep.ch/iucc/fs238.html

Wallace, L. (1997). Responsibility for Natural Hazards, dans *Coping with Natural Hazards in Canada: Scientific, Government and Insurance Industry Perspectives*, Environmental Adaptation Research Group, Environment Canada, The Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Insurers' Advisory Organisation Inc., Toronto (Ont.), p. 165-173.

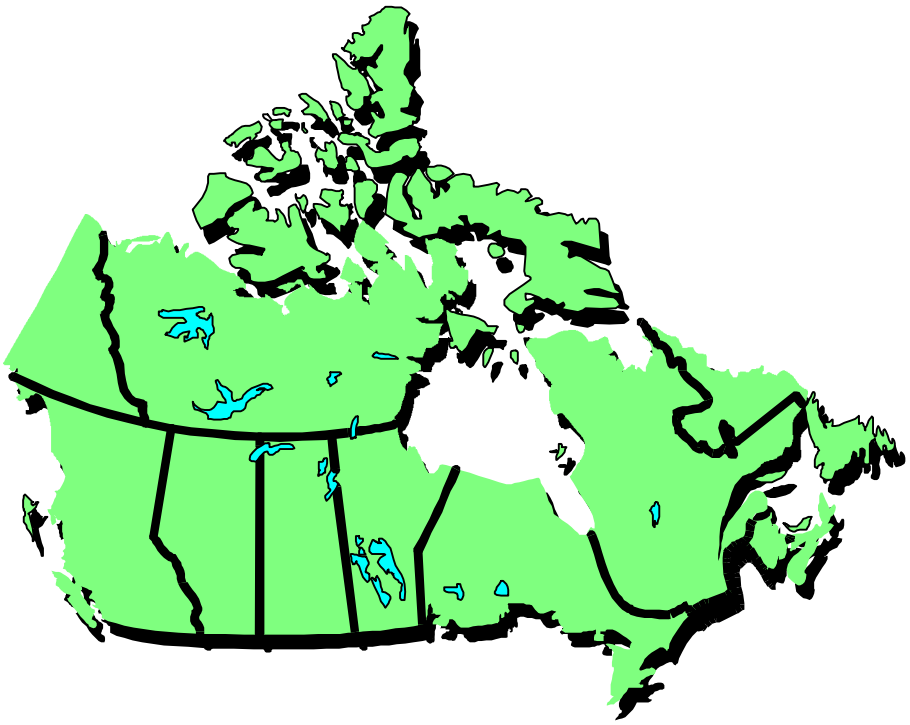
White, R.R. et Ross, A. (coprés.) (1995). *Minutes of the Round Table on the Insurance Industry, Natural Hazards and Environmental Risks*, sous l'égide du Bureau d'assurance du Canada, 16 janvier 1995.

# CHAPITRE ONZE

# ÉTUDE PAN-CANADIENNE SUR LA VARIABILITÉ ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUES -

# SECTEUR DE LA SANTÉ

*Kirsty Duncan[1], Tee Guidotti, Weiping Cheng, Komali Naidoo, Ginger Gibson, Laurence Kalkstein, Scott Sheridan, David Waltner-Toews, Shauna MacEachern, John Last*



1. Département de géographie, Université de Windsor, Windsor (Ontario) N9B 3P4, téléphone : (416) 241-6326 (lundi et vendredi) (519) 253-4232, poste 218 (mardi au jeudi), télécopieur : (416) 247-2126 (lundi et vendredi) (519) 971-3662 (mardi au jeudi)

## RÉSUMÉ

La santé humaine est intimement liée à l'environnement. Le maintien de la santé des populations humaines repose sur la préservation de l'intégrité des systèmes naturels de la Terre (GIEC, 1996). « En dernière analyse, la santé humaine dépend de la capacité de la société à gérer l'interaction entre les activités humaines et l'environnement physique et biologique de manière à préserver et à promouvoir la santé sans menacer l'intégrité des systèmes naturels qui conditionnent cet environnement. Il s'agit donc également de maintenir un climat stable » (OMS, 1992a).

Les activités humaines ont une incidence sur le climat et la chimie de l'atmosphère de la Terre. Six problèmes atmosphériques, certains d'envergure planétaire, d'autres de dimension régionale, représentent aujourd'hui des sources de préoccupations importantes au Canada. Ces problèmes sont, à l'échelle planétaire : 1) le changement climatique (réchauffement planétaire); 2) l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (et l'augmentation du rayonnement ultraviolet) et à l'échelle régionale : 3) la présence de substances toxiques dans l'air; 4) les précipitations acides; 5) le smog; et 6) la présence de particules en suspension dans l'air.

En considération des liens étroits qui existent entre l'environnement et la santé humaine et de l'importance des six problèmes atmosphériques ci-dessus, les auteurs du présent rapport passent en revue les effets de ces six problèmes sur la santé de la population canadienne, proposent des stratégies et des options d'adaptation et examinent les lacunes des connaissances et les besoins liés à la recherche.

Il convient de noter que les six problèmes sont interdépendants. Par leur capacité d'interagir, ils peuvent avoir des effets néfastes ou bénéfiques sur l'atmosphère, les écosystèmes et la population humaine. Malheureusement, leur impact n'a presque jamais été évalué de façon globale. Qui plus est, l'impact de chacun de ces problèmes sur la santé humaine a dans une large mesure été examinée en relation avec un seul de ces facteurs, les effets des conditions météorologiques et de la pollution de l'air sur la santé représentant la seule exception notable à cette règle.

### *Impacts du changement climatique (réchauffement planétaire) sur la santé*

Le changement climatique risque de perturber considérablement les systèmes physiques (p. ex., régimes météorologiques) et les écosystèmes (p. ex., habitats des organismes vecteurs de maladies) de la planète et, en conséquence, constitue une menace directe et indirecte pour la santé des populations humaines. Les facteurs climatiques qui ont des répercussions directes sur la biologie humaine sont considérés comme des risques directs. Les autres facteurs climatiques qui n'influent pas directement sur la biologie humaine sont qualifiés de risques indirects.

Impacts directs potentiels du changement climatique (réchauffement planétaire) sur la santé

(1) Effets des températures extrêmes sur la santé

Certains auteurs estiment que l'augmentation de la fréquence et de la gravité des vagues de chaleur pourrait entraîner une hausse de la morbidité et de la mortalité, en particulier chez les enfants, les personnes âgées et les sujets frêles et malades, spécialement dans les grands centres urbains. Les vagues de chaleur ont des répercussions néfastes sur les troubles de santé existants et toutes les causes de mortalité, et non pas seulement sur les troubles respiratoires ou cardio-vasculaires. Des liens ont également été établis entre les vagues de chaleur et l'apparition de comportements violents et d'autres formes de manifestations antisociales.

L'augmentation des taux de morbidité et de mortalité imputable à la chaleur pourrait être en partie compensée par l'acclimatation des populations aux nouvelles conditions climatiques. Il convient toutefois de noter que le processus d'acclimatation s'effectue de façon progressive, en particulier chez les personnes âgées, et risque de se produire moins rapidement que le changement des températures ambiantes. Un lien a été établi entre l'élévation de la température centrale du corps et une augmentation des taux de mortalité périnatale, de naissance prématurée et de calculs rénaux.

Une étude empirique globale de l'incidence potentielle du changement climatique sur la mortalité due à la chaleur dans dix grandes villes du Canada a révélé que les régions urbanisées du sud-est de l'Ontario et du sud du Québec pourraient être très durement touchées si les températures montent selon le rythme prévu et que les concentrations de $CO_2$ atmosphérique doublent. En l'absence d'acclimatation, le nombre de décès additionnels imputables à la chaleur, en 2050, au cours d'un été « moyen », pourrait varier annuellement entre 240 et 1 140 à Montréal, entre 230 et 1 220 à Toronto et entre 80 et 500 à Ottawa.

(2) Effets des événements météorologiques extrêmes sur la santé

L'augmentation de la fréquence et de la gravité des événements météorologiques extrêmes pourrait entraîner une hausse : 1) des décès, des blessures, des maladies infectieuses et des troubles liés au stress; 2) de diverses autres conséquences néfastes pour la santé résultant de perturbations sociales, de mouvements migratoires provoqués par l'altération des conditions environnementales et de ghettoïsation des régions urbaines.

Impacts indirects potentiels du changement climatique (réchauffement planétaire) sur la santé

Maladies transmises par des vecteurs

Selon certains auteurs, l'aire d'endémicité des encéphalites équines de l'Ouest et de l'Est, de l'encéphalite de Saint-Louis et de l'infection causée par le virus Snowshoe hare (SSH) pourrait s'étendre au Canada en cas de réchauffement atmosphérique. La malaria pourrait également effectuer une percée vers le nord et atteindre le Canada. Une étude a cependant indiqué que le resserrement des mesures de lutte et de surveillance des maladies et le traitement rapide des cas

permettraient probablement de contrebalancer l'augmentation de l'activité des vecteurs dans les pays tempérés. Le réchauffement climatique pourrait également favoriser l'apparition au Canada de la dengue et de la fièvre jaune, deux autres maladies dont la propagation est assurée par des moustiques.

Certaines maladies transmises par des tiques, comme la maladie de Lyme et la fièvre pourprée des montagnes Rocheuses, pourraient également effectuer une remontée vers le nord par suite du réchauffement climatique. Enfin, le réchauffement planétaire laisse également présager une augmentation du nombre de cas de syndrome pulmonaire dû à un hantavirus.

Contamination de l'environnement et/ou de l'eau

Une augmentation de l'incidence de certaines maladies associées à la contamination de l'environnement (p. ex., par le *Bacillus anthracis*) et de l'eau (p. ex., par les *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Leptospira* ou par des toxines produites par des fruits de mer) ou à l'altération de la qualité de l'eau (p. ex., par des parasites) est également à craindre en cas de réchauffement climatique.

Accessibilité de l'approvisionnement en eau

L'élévation du niveau de la mer pourrait avoir les impacts suivants : invasion d'eau salée marine dans les réserves d'eau souterraine; inondation et contamination éventuelle des réseaux d'aqueduc par des produits chimiques et des organismes pathogènes, par suite de l'élévation du niveau des nappes phréatiques; et inondation des installations d'épuration de l'eau par les eaux réceptrices contaminées. La baisse des niveaux d'eau des Grands Lacs et du débit du Saint-Laurent fait craindre une altération de la qualité de l'eau. Enfin, la hausse des fluctuations pluviométriques et la modification du moment saisonnier des épisodes de ruissellement au printemps pourraient entraîner une augmentation du nombre d'évacuations forcées dans les communautés riveraines.

Intoxications alimentaires et santé nutritionnelle

Les principaux impacts du réchauffement planétaire sur l'alimentation des Canadiens seront vraisemblablement associés à ses impacts sur la production d'aliments dans les pays étrangers. On s'attend à ce que la consommation de denrées alimentaires importées entraîne une augmentation du nombre d'éclosions de cas de certaines maladies virales, parasitaires et bactériennes (p. ex., hépatite A).

Troubles respiratoires

Le réchauffement planétaire pourrait modifier la distribution saisonnière de certains troubles respiratoires. En milieu tant urbain que rural, la hausse des températures fait craindre une aggravation de la pollution atmosphérique et, dès lors, une hausse de l'incidence des troubles respiratoires. De la même façon, la hausse prévue du nombre de jours de smog pourrait se traduire par une augmentation du nombre d'admissions dans les hôpitaux.

Migration

Le réchauffement planétaire laisse présager une augmentation du nombre de réfugiés de l'environnement, avec tout ce que cette éventualité comporte comme risque d'introduction d'agents pathogènes dans des environnements de plus en plus favorables. À l'intérieur même du Canada, la survenue de crues soudaines, l'inondation des basses régions côtières ou la contamination des réserves d'eau potable pourraient forcer de nombreuses personnes à quitter leur communauté pour aller s'établir ailleurs.

Infrastructure de santé publique

À l'heure actuelle, l'infrastructure de santé publique n'est pas suffisamment bien organisée pour composer avec les relations complexes entre les politiques fiscales, énergétiques, agricoles ou liées au transport, l'incidence de ces politiques sur le climat et, en fin de compte, les impacts du changement climatique sur la santé.

***Impacts du rayonnement ultraviolet sur la santé***

L'exposition au rayonnement solaire ultraviolet (UV) est associée à un certain nombre de troubles de la santé, dont diverses formes de cancer de la peau, les cataractes et certains troubles du système immunitaire.

Cancers de la peau

Les cancers de la peau se répartissent en trois grandes catégories : a) les mélanomes malins, b) les épithéliomas basocellulaires (forme de cancer avec mélanome bénin) et c) les épithéliomas malpighiens spino-cellulaires (autre forme de cancer avec mélanome bénin).

Mélanomes malins

L'incidence des formes de cancer de la peau avec mélanome malin a considérablement augmenté au cours des dernières décennies. Bien que moins fréquents que les formes de cancer à mélanome bénin, ces cancers sont la cause d'un plus grand nombre de décès en raison de leur plus grande propension à essaimer. Le rôle de certains facteurs (facteurs héréditaires/sensibilité de la peau, exposition au début de l'âge adulte, exposition professionnelle/cumulée et exposition intermittente) dans l'apparition des cancers avec mélanomes malins a été examiné.

Une propension à brûler plutôt qu'à bronzer et une exposition intermittente au soleil durant une période vulnérable de la vie sont considérées comme des facteurs de risque importants. Les personnes qui ont subi de nombreux coups de soleil sont également à risque du fait de la sensibilité de leur peau. La faculté de bronzer confère une certaine protection contre le rayonnement solaire ultraviolet.

Cancers avec mélanome bénin

De toutes les formes de cancer de la peau, ce sont les cancers avec mélanome bénin qui sont diagnostiqués le plus fréquemment. Si les épithéliomas basocellulaires sont numériquement plus importants, les épithéliomas malpighiens spino-cellulaires sont plus invasifs. L'incidence des cancers avec mélanome bénin a également augmenté au cours des dernières années. Ainsi, de 1973 à 1987, en Colombie-Britannique, la hausse enregistrée pour chaque type de tumeur s'établissait à 60 %.

Des études récentes ont confirmé l'existence d'un lien entre l'exposition cumulée aux rayons solaires et le risque de cancer de la peau avec mélanome bénin. L'exposition intermittente aux rayons solaires, en particulier durant l'enfance, a également été mise en cause dans l'apparition des cancers de la peau avec mélanome bénin, en particulier des épithéliomas basocellulaires.

Yeux

Un certain nombre d'enquêtes épidémiologiques ont été réalisées dans le but de déterminer si le risque de cataractes augmente en fonction de la durée de l'exposition aux rayonnement ultraviolet. Une vaste enquête menée au Népal a mis en évidence l'existence d'une corrélation positive entre la prévalence de cataractes et la durée d'exposition aux rayons solaires. Une autre étude, italienne cette fois, a révélé que le risque de cataractes corticales et mixtes augmente chez les personnes qui, du fait de leurs activités professionnelles ou dans le cadre de leurs loisirs, s'exposent davantage au rayonnement solaire. Aucune augmentation n'a cependant été notée dans le cas des cataractes nucléaires. Une étude réalisée auprès de 838 gens de mer de la baie de Chesapeake a indiqué que le risque de cataractes corticales s'élève en cas d'exposition cumulée élevée aux rayons ultraviolets B. En revanche, une autre étude a conclu à l'absence de lien entre l'exposition cumulée aux rayons solaires et le risque de cataractes. Par contre, cette étude a révélé que le port régulier d'un chapeau durant la saison estivale réduit le risque de cataractes.

Système immunitaire

La peau est considérée comme la première ligne de défense du système immunitaire. La responsabilité de la fraction non ionisante du spectre de rayonnement ultraviolet dans l'érosion du rôle protecteur joué par la peau a été mise en cause. Malgré la nature partielle des indications confirmant l'existence d'un lien entre l'exposition au rayonnement ultraviolet et l'altération du système immunitaire et, subséquemment, la carcinogenèse, les données existantes portent à croire que : 1) le système immunitaire est incriminé dans l'apparition des cancers de la peau; 2) l'exposition de la peau au rayonnement ultraviolet peut affaiblir les réponses immunitaires au niveau de la peau et entraîner leur suppression tant à l'échelle locale qu'à celle de l'ensemble de l'organisme. Certains auteurs croient que l'exposition au rayonnement ultraviolet peut compromettre la capacité de l'hôte à réagir de façon locale ou générale aux attaques des agents infectieux.

### *Impacts des substances toxiques dans l'air sur la santé*

Notre organisme est exposé quotidiennement à un large éventail de substances toxiques présentes dans les aliments, le sol et la poussière, l'eau potable, l'air intérieur et divers matériaux utilisés au travail. Sur les quelque 160 composés toxiques détectés dans l'air de Toronto, 31 sont reconnus comme carcinogènes ou soupçonnés de l'être.

L'exposition à de faibles concentrations de monoxyde de carbone provoque une impression de fatigue, des maux de tête et des étourdissements. À plus fortes concentrations, toutefois, le monoxyde de carbone entraîne des troubles de vision, une perte de coordination, des nausées et la mort. L'exposition professionnelle à de fortes concentrations d'effluents gazeux a été associée à une augmentation du risque de certains types de cancer. Toutefois, rien pour l'instant ne permet de conclure à une augmentation du risque de cancer parmi l'ensemble de la population.

Les composés organiques volatils (COV) peuvent irriter les voies respiratoires (et favoriser l'évolution de la rhinite vers l'asthme) et causer des maux de tête et d'autres symptômes non spécifiques. À fortes concentrations, les COV ont des effets toxiques graves, notamment sur le plan neurologique.

Les biphényles polychlorés (BPC) ont la propriété de persister durant des décennies dans l'environnement. Ces substances s'accumulent progressivement dans les tissus adipeux des organismes exposés, selon un processus appelé bioaccumulation. Leur présence dans l'environnement a forcé de nombreuses populations autochtones à modifier leurs habitudes alimentaires. Les seuils de contamination établis par le gouvernement semblent dans bien des cas trop élevés pour protéger adéquatement la santé des populations autochtones, en particulier des communautés inuites qui ont conservé leur mode de vie traditionnel et qui consomment de grandes quantités d'huile de poisson, de graisse et de moelle de caribou et de muktuk (peau avec son gras) de narval.

### *Impacts des précipitations acides sur la qualité de l'air et la santé*

Le dioxyde d'azote ($NO_2$) et le dioxyde de soufre ($SO_2$) ont des effets néfastes aigus sur l'appareil respiratoire. À des concentrations égales ou inférieures à 8 ppm, le $SO_2$ entrave la fonction respiratoire chez l'humain du fait de ses propriétés bronchoconstrictrices. Les sujets asthmatiques sont particulièrement vulnérables. Les asthmatiques qui font de l'exercice commencent habituellement à éprouver des troubles respiratoires dès que la concentration de $SO_2$ atteint 0,5 ppm. Par comparaison, des sujets sains faisant régulièrement de l'exercice ont présenté une réduction significative de la fonction respiratoire après avoir été exposés à une concentration de 1 ppm. En raison de leur action sur les mécanismes de défense des voies respiratoires, les oxydes d'azote contribuent à accroître l'incidence et la gravité des infections bactériennes virulentes et entravent de façon significative l'élimination des particules et des bactéries par les poumons. Enfin, les oxydes d'azote ont des propriétés bronchoconstrictrices et provoquent de l'asthme.

Le nombre d'admissions dans les hôpitaux liées à des affections respiratoires augmente durant les épisodes de pollution atmosphérique, les concentrations d'ozone, d'aérosols acides et de

particules en suspension étant alors particulièrement élevées. Les contaminants acides constituent une menace directe pour la santé humaine s'ils sont inhalés, et une menace indirecte s'ils se déposent sur les eaux de surface, le sol ou le feuillage des plantes.

Les concentrations de $NO_2$ dans les grandes villes du Canada demeurent habituellement bien en deçà des seuils à partir desquels les premiers symptômes commencent à se manifester. Toutefois, en réduisant les concentrations de $NO_x$, on peut ralentir de façon significative la formation d'ozone. Le nombre de rhumes et d'infections respiratoires est plus élevé chez les enfants qui vivent dans des villes très polluées que chez ceux qui vivent dans des villes relativement épargnées par la pollution atmosphérique.

Le risque de mortalité associé à la pollution atmosphérique est particulièrement élevé dans le cas des fines particules, tandis qu'il est relativement faible dans celui des polluants acidifiants.

À Toronto, les concentrations de nombreux polluants atmosphériques sont régulièrement suffisamment élevées pour mettre en danger la santé publique. Les personnes atteintes de troubles respiratoires et les sujets sains qui s'adonnent à des exercices violents à l'extérieur sont particulièrement à risque. On estime que l'asthme, l'emphysème ou la bronchite chronique affectent environ 7,5 % de la population canadienne, ou 165 000 des quelque 2,2 millions de résidents de la communauté urbaine de Toronto.

En s'oxydant en $NO_2$, le monoxyde d'azote favorise la formation d'ozone. L'ozone qui provient des États-Unis et celui qui est produit localement font augmenter les concentrations dans les quartiers résidentiels éloignés des zones de circulation routière intense.

***Impacts des précipitations acides sur la qualité de l'eau et la santé***

Une fois biotransformé en méthylmercure, le mercure pénètre facilement dans la chaîne trophique et s'accumule à des teneurs de plus en plus élevées à chaque échelon (bioamplification), se distribuant chaque fois dans l'ensemble de l'organisme. L'acide sulfurique fait baisser le pH et entraîne la dissolution des métaux toxiques, qui se répandent dans l'environnement aquatique et tuent les poissons qui y vivent. Les métaux toxiques peuvent également s'accumuler dans les tissus des poissons et les sources d'eau potable. Certaines denrées faisant partie du régime alimentaire traditionnel de nombreuses communautés autochtones du Nord sont aujourd'hui très fortement contaminées par des polluants de l'environnement. Les grands projets d'aménagement hydroélectrique de la baie James, par exemple, ont entraîné l'exposition des Cris à des concentrations potentiellement nocives de méthylmercure. Chez les Inuits du Groenland, on a cependant noté une réduction des concentrations de mercure dans le sang après que ceux-ci ont renoncé à consommer certains aliments traditionnels.

### *Impacts du smog sur la santé*

L'ozone troposphérique est le principal constituant du smog. L'exposition à de fortes concentrations d'ozone peut entraver à court terme la fonction ventilatoire des poumons et accroître l'incidence des troubles respiratoires. Chez les sujets sains qui font de l'exercice, la fonction ventilatoire est réduite et l'incidence de troubles respiratoires s'accroît en cas d'exposition prolongée à des concentrations d'ozone aussi faibles que 0,12 ppm. Même à une concentration de 0,01 ppm, l'ozone irrite les yeux, le nez et la gorge. À long terme, l'ozone peut endommager les parois des voies respiratoires. L'ozone provoque chez les sujets asthmatiques une réduction de la ventilation pulmonaire et une exacerbation de l'asthme. En cas de pollution atmosphérique, les femmes enceintes et les sujets atteints de troubles respiratoires chroniques (p. ex., emphysème) sont particulièrement à risque.

L'ozone est la deuxième cause de maladies respiratoires. En Ontario, environ 5 % des admissions hospitalières pour cause de difficultés respiratoires (ce pourcentage peut atteindre 15 % chez les enfants de moins de deux ans) sont liées à une exposition à des concentrations élevées d'ozone troposphérique. Les épisodes de pollution aiguë (p. ex., smog au cours des années 50 et 60) ont causé des dizaines de milliers de décès dans des grandes villes nord-américaines et européennes.

### *Impacts des particules en suspension dans l'air sur la santé*

Les principaux problèmes causés par l'exposition aux particules en suspension dans l'air sont une détérioration de la fonction respiratoire, une aggravation des maladies pulmonaires et cardio-vasculaires déjà installées, une atteinte de l'épuration mucociliaire et des autres mécanismes de défense, des troubles morphologiques et la mort. De nombreux décès imputés à une exposition à de fortes concentrations de particules en suspension et d'oxydes de soufre ont été enregistrés au cours des années 50 et au début des 60 années à Londres et à New York à la suite d'épisodes de pollution. En présence de fortes concentrations de particules en suspension dans l'air, les groupes les plus à risque sont les enfants d'âge préscolaire et scolaire, les personnes âgées, les sujets souffrant de maladies cardiovasculaires obstructives chroniques (sujets cardiaques ou atteints d'artériosclérose), les asthmatiques, les personnes atteintes de grippe ou de bronchite, les fumeurs et les personnes qui ont tendance à respirer simultanément par la bouche et le nez ou essentiellement par la bouche.

### *Stratégies et options d'adaptation*

(1) Changement climatique (réchauffement planétaire)

Températures extrêmes

Pour atténuer l'augmentation du risque de mortalité due à la chaleur engendrée par le réchauffement climatique, il convient d'examiner à l'avance les diverses options disponibles. Parmi celles-ci figure la mise sur pied d'un système de surveillance et d'alerte météorologique et sanitaire. L'établissement d'un service d'aide à l'acclimatation est une autre solution qui peut être envisagée.

Il importe également de poursuivre les recherches quant à l'incidence de certains facteurs associés au changement climatique sur la mortalité. Par exemple, les interactions possibles entre la pollution atmosphérique et les conditions météorologiques et leur impact sur la mortalité due à la chaleur demeurent largement méconnues.

Effets indirects sur la santé

Il est urgent d'adopter des approches transdisciplinaires pour étudier les effets indirects du changement climatique sur la santé et de mettre sur pied un institut de recherche capable d'examiner les grands enjeux transdisciplinaires liés aux politiques.

(2) Appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (et accroissement du rayonnement UV)

Toute personne allant à l'extérieur devrait prendre les mesures voulues pour se protéger adéquatement contre les rayons solaires, tant en été qu'en hiver. Comme l'exposition intermittente au soleil est considérée comme un facteur de risque pour les cancers de la peau (tant les formes à mélanome bénin que les formes à mélanome malin), cette recommandation s'impose comme une nécessité absolue, en particulier pour les personnes qui effectuent un séjour dans des pays situés près de l'équateur, où le rayonnement UV atteint son intensité maximale. Les stratégies suivantes permettent de réduire l'exposition au rayonnement ultraviolet : 1) limiter le plus possible l'exposition au soleil; 2) rechercher les endroits ombragés; 3) couvrir les parties du corps exposées; 4) utiliser des filtres solaires présentant un facteur de protection solaire (FPS) d'au moins 15.

(3) Présence de substances toxiques dans l'air

La réduction des émissions contribuera à abaisser les concentrations atmosphériques de substances toxiques. L'application des normes en vigueur, la surveillance, la réalisation d'études de suivi et l'adoption de mesures antipollution représentent d'autres solutions.

(4) Précipitations acides

Un plan de lutte contre les précipitations acides a déjà été mis en place dans l'est du Canada. La recherche sur l'acidification résiduelle pourrait déboucher sur une nouvelle réduction des charges critiques destinée à protéger les écosystèmes sensibles. D'autres solutions existent : atteinte des objectifs de réduction, étude des écosystèmes, surveillance des précipitations, réouverture des accords provinciaux de réduction, suivi, évaluation de l'efficacité des programmes de lutte et de la pertinence des charges cibles.

(5) Smog

La réduction de l'ozone troposphérique repose sur l'inspection des véhicules automobiles, l'éducation de la population, la surveillance des concentrations d'ozone, l'établissement d'un programme d'avertissement de smog, la mise en place d'un réseau régional de surveillance, la réalisation d'initiatives antipollution et la poursuite des travaux de recherche sur le smog.

(6) Particules en suspension dans l'air

En favorisant l'utilisation de sources d'énergie moins polluantes, le développement social et économique contribue à améliorer la qualité de l'air des régions urbaines.

***Lacunes et besoins***

Le climat de recherche actuel ne favorise pas l'adoption de stratégies de recherche novatrices (p. ex., approches transdisciplinaires) au Canada.

Il importe de recueillir des informations de base quant aux effets du changement climatique sur la santé. Nous possédons très peu, ou pas, de données fiables sur les tendances passées ou spatiales de la distribution et l'abondance des insectes vecteurs de maladies au Canada et sur les agents pathogènes qu'ils transmettent.

Il faut mettre en place des programmes de surveillance et d'étude de la distribution et de l'abondance des populations d'anophèles vecteurs de malaria et des migrations effectuées par la souris sylvestre, petit rongeur incriminé dans la transmission du syndrome pulmonaire dû à un hantavirus. La surveillance et l'étude de l'activité de nombreux autres agents pathogènes constituent également une priorité.

Dans une perspective de santé publique, il convient également d'inspecter régulièrement les systèmes de conditionnement de l'air (qui pourraient renfermer l'agent causal de la maladie du légionnaire).

L'efficacité de la surveillance et de la recherche sur les différents facteurs menaçant la santé repose sur une mobilisation transdisciplinaire.

Nous devons revoir certains de nos comportements et nous efforcer de comprendre et de résoudre les problèmes posés par le changement climatique. En particulier, il est grandement temps de mettre un terme à l'exploitation irrationnelle des ressources non renouvelables et de promouvoir le développement durable.

Il faut poursuivre les travaux de recherche en vue de trouver des solutions aux problèmes posés par l'apparition de souches de microorganismes et de moustiques résistantes aux pesticides. On doit également s'employer à recueillir des données concluantes en vue d'établir la séquence des effets causés à la couche d'ozone par certaines substances chimiques, depuis les dommages infligés à la couche d'ozone elle-même jusqu'aux effets sur la santé humaine. Il est essentiel de combler le manque de connaissances dans ces domaines, car l'augmentation du rayonnement ultraviolet à la surface du sol pourrait fort bien être l'un des plus dangereux facteurs associés au changement climatique planétaire. En ce qui a trait à la recherche, on doit établir de nouveaux partenariats entre les spécialistes du domaine biomédical (p. ex., cliniciens, épidémiologistes et microbiologistes) et les scientifiques spécialisés dans l'étude des questions sociologiques et comportementales.

Les brouillards et brumes acides sont la cause de graves irritations des voies respiratoires, en particulier chez les personnes qui éprouvent déjà des difficultés de cet ordre. Il convient d'entreprendre des recherches transdisciplinaires afin d'étudier les liens entre les dépôts acides, la chimie des sols, les effets chez les végétaux et les animaux et les répercussions sur la santé humaine.

Dans un contexte canadien, il est également urgent de suivre l'évolution des tendances en ce qui concerne le travail, la santé, les questions socio-démographiques et le développement urbain, la sécurité des produits alimentaires, l'accessibilité et l'exploitation des ressources, l'essor technologique, etc., à l'échelle tant nationale qu'internationale.

### *Conclusion*

Le présent rapport décrit les principaux effets néfastes sur la santé de six problèmes atmosphériques énumérés à la page 546. Le fardeau imposé par ces problèmes au réseau de santé publique est extrêmement lourd.

Compte tenu de l'ampleur de ces problèmes, il est essentiel de multiplier les efforts dans le domaine de la recherche et, tout particulièrement, de promouvoir l'adoption d'une approche transdisciplinaire et d'intensifier la surveillance des indicateurs des risques pour la santé en relation avec les facteurs de stress atmosphériques. Les trois conseils de recherche (Conseil de recherches en sciences humaines/CRSH, Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie/ CRSNG et Conseil de recherches médicales/CRM) doivent donc reconnaître l'urgence d'examiner les problèmes atmosphériques et leur incidence sur la santé.

## INTRODUCTION

### *Santé*

La santé possède de nombreuses significations (Ma, 1961; Dubois, 1965; Aude, 1971; Task Force Report, 1976; Stokes *et al.*, 1982; Last, 1983; Gurinder *et al.* 1997). Toutefois, la définition la plus fréquemment citée est celle qui est enchâssée dans la Constitution de l'OMS (1946). Cette définition s'énonce comme suit : « La santé est un état de bien-être complet, physique, mental et social, et non pas seulement l'absence de maladie ou d'infirmité ». La santé est également une ressource pour la vie de tous les jours (OMS, 1986) qui permet aux gens de mener une existence productive sur les plans économique et social (OMS, 1977; Hancock et Davies, 1997).

Le Canada consacre annuellement à la santé plusieurs milliards de dollars. En 1994, par exemple, les dépenses totales réelles liées à la santé (en dollars constants de 1986) se sont élevées à 56,78 milliards de dollars, soit 1 941,29 dollars par habitant, ou 9,7 % du PIB (Institut canadien d'information sur la santé, communication écrite, 1997).

### *Déterminants de la santé*

Les déterminants de la santé sont à la fois nombreux et diversifiés, comme en témoigne l'énumération qui suit : disponibilité d'une source d'approvisionnement en eau suffisante; aliments nutritifs de qualité; logements satisfaisants et sécuritaires; services appropriés d'élimination des déchets (OMS, 1992a); patrimoine génétique individuel; soutien de l'environnement social; estime de soi; et accès à des services de santé suffisants (Evans *et al.*, 1994).

Toutes les stratégies de promotion de la santé de la population doivent tenir compte de la nature variée des déterminants de la santé et les aborder de manière complète et corrélative. Les auteurs du rapport intitulé *Stratégies d'amélioration de la santé de la population - Investir dans la santé des Canadiens* regroupaient les nombreux déterminants de la santé en cinq grandes catégories :

1. Environnement social et économique. Revenu, emploi, situation sociale, réseaux de soutien social, niveau d'instruction et aspects sociaux du milieu de travail.

2. Environnement physique. Aspects physiques du milieu de travail et autres aspects de l'environnement naturel ou anthropique.

3. Habitudes de vie personnelles. Comportements favorisant la santé ou entraînant des risques pour la santé.

4. Capacités et compétences de vie personnelles. Caractéristiques psychologiques de la personne (p. ex., talents personnels, compétences d'adaptation et contrôle exercé sur la vie) et caractéristiques génétiques et biologiques.

5. Services de santé. Services destinés à promouvoir la santé, à la maintenir ou à la restaurer.

Ces cinq catégories de déterminants forment collectivement un cadre qui pourrait être adopté par les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux comme fondement de leurs stratégies d'amélioration de la santé de la population.

### *Environnement et santé*

La santé humaine est intimement liée à l'environnement (Last, 1987; OMS, 1990a et b; OMS, 1992a et b; Banque mondiale, 1992; Chivian *et al.*, 1993; McMichael, 1993; OMS, 1994a; OMS, 1996). Dans un premier temps, les variables climatiques comme la température, les précipitations et l'humidité ont une incidence considérable sur le confort ressenti par les humains et l'évolution des populations d'organismes vecteurs de maladies (OMM, 1987; Meade *et al.*, 1988). En deuxième lieu, les dangers de nature climatique comme les ouragans, les tornades, les inondations, les ondes de tempête et la foudre sont la cause de blessures, de maladies ou de décès. Enfin, dans un troisième temps, une exposition soutenue au rayonnement ultraviolet peut être néfaste pour la peau, les yeux et le système immunitaire des humains (IARC, 1992; Armstrong, 1994; PNUE, 1994; OMS, 1994b; McMichael *et al.*, 1996a et b).

Le maintien de la santé des populations humaines repose sur la préservation de l'intégrité des systèmes naturels de la Terre (GIEC, 1996). « En dernière analyse, la santé humaine dépend de la capacité de la société à gérer l'interaction entre les activités humaines et l'environnement physique et biologique de manière à préserver et à promouvoir la santé sans menacer l'intégrité des systèmes naturels qui conditionnent cet environnement. Il s'agit donc également de maintenir un climat stable » (OMS, 1992a).

### *Problèmes atmosphériques*

Les activités humaines ont un impact sur le climat et la chimie de l'atmosphère de la Terre (GIEC, 1996). Six problèmes atmosphériques, certains d'envergure planétaire, d'autres de dimension régionale, représentent aujourd'hui des sources de préoccupations importantes au Canada. Ces problèmes sont, à l'échelle planétaire : 1) le changement climatique (réchauffement planétaire); 2) l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (et l'augmentation du rayonnement ultraviolet) et à l'échelle régionale : 3) la présence de substances toxiques dans l'air; 4) les précipitations acides; 5) le smog; et 6) la présence de particules en suspension dans l'air.

Un bref aperçu des problèmes atmosphériques planétaires et régionaux est présenté dans les pages qui suivent. Ceux qui intéressent l'ensemble de la planète sont d'abord passés en revue, puis examinés en fonction du lien qu'ils présentent avec les problèmes observés à l'échelle nationale (pour éviter les dédoublements, nous restreignons la portée de l'examen des impacts du changement climatique, la question faisant déjà l'objet de l'ÉPC). Les problèmes régionaux, pour leur part, sont définis et examinés sous l'angle de leur incidence à l'échelle canadienne.

#### *Problèmes d'envergure planétaire*

(1) Changement climatique (réchauffement planétaire)

L'expression changement climatique désigne le réchauffement qui devrait résulter de l'augmentation des gaz à effets de serre (GES) dans l'atmosphère. Dans son deuxième rapport d'évaluation, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit, sur la base d'un doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique, une hausse de 1,0 à 3,5 °C de la température moyenne à la surface de la Terre au cours du prochain siècle. La population humaine mondiale n'a jamais été confrontée à un changement aussi rapide. Cette hausse de température aura de toute évidence une incidence sur les variables climatiques (p. ex., température et précipitations) et divers paramètres liés au climat (p. ex., niveau de la mer).

Le modèle de circulation générale du Centre climatologique canadien (MCG CCC) prévoit, ici encore en posant l'hypothèse d'un doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique, un réchauffement de 4 à 8 °C dans le sud du Canada, associé à un nivellement prononcé des fluctuations saisonnières de température. Dans le nord du pays, le réchauffement devrait atteindre 8 à 12 °C en hiver et 0 à 6 °C en été. Une augmentation des précipitations est également prévue à l'échelle du pays en hiver. Par contre, durant la saison de croissance, les précipitations devraient augmenter dans le nord et décroître ou demeurer relativement stables dans le sud. L'élévation du niveau de la mer devrait pour sa part entraîner des inondations à grande échelle. Seraient

notamment touchés les milieux humides côtiers comme les basses terres de la baie d'Hudson et le delta du MacKenzie, ainsi que certains centres densément peuplés comme Vancouver (C.-B.) et Saint-Jean (N.-B.) (Hengeveld, 1995).

(2) Appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (et augmentation du rayonnement UV)

L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique désigne la réduction de la couche protectrice d'ozone ($O_3$), qui se trouve à 15 à 35 km au-dessus de la Terre. Les composés chlorés et bromés d'origine anthropique sont en bonne partie responsables du phénomène (GIEC, 1996), qui s'est amorcé au cours des années 70 (OMM, 1992). L'apparition d'un trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique est une manifestation particulièrement inquiétante de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique. En octobre, les concentrations moyennes totales d'ozone au-dessus de l'Antarctique étaient 50 à 70 % plus faibles que celles enregistrées au cours des années 60 (GIEC, 1996). Une réduction statistiquement significative de l'ozone total a également été observée à des latitudes moyennes des hémisphères Nord et Sud (OMM/PNUE, 1995; GIEC, 1996). Aucune diminution importante n'a toutefois été signalée au-dessus des régions tropicales. Si les recommandations du Protocole de Montréal (1987) et ses amendements sont appliqués intégralement, les pertes les plus importantes surviendront vers la fin du siècle présent. Comparativement aux concentrations observées à la fin des années 60, les pertes maximales d'ozone pourraient être de 12 à 13 % plus élevées au-dessus des régions nordiques moyennes au cours de l'hiver et du printemps, contre 6 à 7 % en été et à l'automne (OMM/PNUE, 1995; McMichael *et al*., 1996b). L'appauvrissement de la couche d'ozone devrait se poursuivre pendant plusieurs décennies, en raison de la persistance des contaminants industriels dans la stratosphère. Les concentrations d'ozone devraient revenir aux concentrations des années 90 vers le milieu du prochain siècle (PNUE, 1994).

L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique a provoqué au cours des dernières années une augmentation du rayonnement ultraviolet au niveau du sol, en particulier dans les régions de latitude moyenne à élevée (Kerr et McElroy, 1993; OMM/PNUE, 1995; Madronich *et al.*, 1995; McMichael *et al.*, 1996b). En supposant que les autres facteurs demeurent constants, on prévoit que les pertes maximales d'ozone s'accompagneront d'une hausse de 15 % du rayonnement ultraviolet au niveau du sol dans les régions de l'hémisphère Nord de latitude moyenne, en hiver et au printemps, contre 8 % en été (OMM/PNUE, 1995).

On mesure les concentrations d'ozone dans l'Arctique canadien depuis 1960. Les concentrations moyennes enregistrées avant les années 80 sont considérées comme normales. Entre 1980 et 1992, les concentrations d'ozone ont chuté de 5 à 10 % au-dessus de l'Arctique entre janvier et avril. Les concentrations mesurées dans le Grand Nord en mars 1997 étaient jusqu'à 45 % inférieures à la normale, et jusqu'à 7 % en deçà des valeurs moyennes pour l'ensemble des régions de latitude moyenne du Canada. La perte totale d'ozone enregistrée dans l'Arctique en 1997 se compare à celle observée ces dernières années dans l'Antarctique. Les répercussions de cet appauvrissement sur le rayonnement ultraviolet atteignant les régions de latitude moyenne ne seront pas considérables, car : 1) la majeure partie du rayonnement ultraviolet survient en mai,

juin, juillet et août; 2) le trou résultant de la perte d'ozone est faible en comparaison de la surface totale des régions de latitude moyenne au Canada (Fergusson, communication écrite, 1997).

***Problèmes régionaux***

(1) Présence de substances toxiques dans l'air

Les substances toxiques dans l'atmosphère peuvent être des gaz, des particules ou des aérosols (mélange de fines particules solides et de gouttelettes liquides). Ces substances peuvent avoir des effets néfastes à court ou à long terme sur la santé humaine et l'environnement. Les effets sur la santé englobent les cancers, les anomalies congénitales, divers troubles du système nerveux et la mort en cas de rejets massifs accidentels (comme celui qui est survenu à l'usine de pesticides de Bhopal, en Inde). Ces substances ont également des effets sur l'environnement, dont la contamination de l'eau, du sol et des aliments.

Ces polluants englobent un large éventail de produits chimiques : biphényles polychlorés (BPC), hydrocarbures non brûlés (p. ex., hydrocarbures aromatiques polycycliques [HAP]), benzène, dioxines, furannes, formaldéhyde, trichloroéthylène et métaux traces comme le plomb, l'arsenic et le mercure. Les substances toxiques proviennent de diverses sources comme les usines de produits chimiques, les établissements de nettoyage à sec, les imprimeries et les véhicules motorisés.

Les composés organiques volatils (COV) sont des produits chimiques organiques qui contiennent du carbone et qui se rencontrent essentiellement sous la forme gazeuse dans l'atmosphère. Les composés organiques sont les principaux constituants chimiques des organismes vivants et des produits dérivés comme le charbon, le pétrole et les produits pétroliers raffinés. Bon nombre des produits chimiques que nous utilisons couramment n'existent pas dans la nature et ont été synthétisés en laboratoire par des chimistes. À la température de la pièce et à la pression atmosphérique normale, les composés volatils en phase liquide passent facilement à la phase vapeur. Les COV comprennent l'essence, divers produits chimiques industriels comme le benzène, des solvants comme le toluène, le xylène et le tétrachloroéthylène (perchloroéthylène, principal solvant utilisé dans le processus de nettoyage à sec). De nombreux COV sont également des polluants atmosphériques très nocifs. Le benzène, par exemple, possède des propriétés cancérigènes (voir le glossaire de la qualité de l'air de l'ÉPA sur Internet).

Les COV peuvent être d'origine végétale ou associés aux activités humaines. Ils s'évaporent facilement à la température de la pièce et à la pression atmosphérique normale. En Colombie-Britannique, la végétation est de loin la principale source de COV, tandis que le transport est la principale source anthropique. Les hydrocarbures, catégorie de COV, ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène et constituent un des principaux composants de combustibles tels que le méthane, le propane, le gaz naturel, l'essence et le kérosène.

Les COV contribuent à la formation de l'ozone troposphérique, dont les effets nocifs ont été décrits précédemment. Un certain nombre de COV sont également toxiques et figurent parmi la liste des polluants atmosphériques dangereux.

La fumée produite par la combustion du charbon et d'autres combustibles solides peut renfermer des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et d'autres agents tels que :

- La combustion de produits pétroliers liquides peut produire du monoxyde de carbone, des oxydes d'azote et d'autres agents. L'industrie et l'incinération peuvent produire un large éventail de produits de combustion tels que des oxydes de soufre et d'azote, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des dioxines, etc.

- L'utilisation de combustibles peut également produire des substances dangereuses autrement que par oxydation chimique et libérer du benzène (craquage du pétrole) ou du plomb (essence contenant du plomb).

La *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* contient une liste de 44 produits chimiques prioritaires qui sont considérés comme potentiellement toxiques et qui, à ce titre, nécessitent de faire l'objet d'une évaluation plus approfondie.

(2) Précipitations acides

Les précipitations qui sont soumises à l'effet acidifiant des polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre ($SO_2$) et les oxydes d'azote ($NO_x$) émis par les fonderies et les centrales alimentées aux combustibles fossiles sont qualifiées d'acides. Ces polluants sont convertis chimiquement en acides sulfurique et nitrique dans l'atmosphère et peuvent être transportés sur de très grandes distances avant d'être entraînés au sol sous une forme diluée par les précipitations (pluie, grêle, bruine, pluie verglaçante ou neige) (Environnement Canada, 1996a).

Le dioxyde de soufre est un polluant gazeux qui est émis principalement par les centrales alimentées au charbon et à l'huile, les fonderies (minerais), les chaudières industrielles et les usines de raffinage de l'huile et du gaz. Certains procédés industriels, comme la production de pâtes par certaines usines, constituent également des sources de $SO_2$. Entre 1974 et 1992, la concentration annuelle moyenne de $SO_2$ au Canada a diminué de 61 % (Environnement Canada, 1995a). Le $SO_2$ et les sulfates sont les principaux composants des précipitations acides. Ces gaz sont transportés sur de longues distances à partir de leur point de rejet et peuvent acidifier l'eau et les sols si les conditions locales sont insuffisantes pour neutraliser leur action.

Les oxydes d'azote sont produits par les émissions des véhicules. Le dioxyde d'azote ($NO_2$) est cependant un polluant secondaire qui est produit par l'oxydation de l'oxyde d'azote par temps ensoleillé ou qui se forme directement par combustion à haute température dans les centrales électriques ou dans les poêles au gaz (Nadakavukaren, 1995). Les limites d'exposition au $NO_2$ indiquées dans les lignes directrices de l'OMS se chiffrent à 0,21 ppm pour une heure ou à 0,08 ppm pendant 24 heures (OMS, 1987). La sensibilisation du grand public et l'adoption de lois plus strictes ont joué un rôle déterminant dans la réduction de 38 % des concentrations annuelles moyennes de $NO_2$ entre 1977 et 1992 au Canada (Environnement Canada, 1995a). Ces gains pourraient cependant être annihilés par l'augmentation de la circulation routière.

En 1992, le MEEO fournissait les renseignements suivants concernant les pluies acides au Canada : 1) plus de 80 % des Canadiens vivent dans des régions exposées à des niveaux de pollution élevés liés aux pluies acides; 2) 300 000 lacs sont vulnérables aux précipitations acides; 150 000 ont déjà été endommagés par les pluies acides, et 14 000 sont acidifiés; 3) 84 % des terres agricoles les plus productives de l'est du Canada reçoivent chaque année des quantités inacceptables de dépôts acides; 4) environ 55 % des forêts de l'est du Canada sont situées dans des régions exposées aux pluies acides; 5) les précipitations acides ont déjà causé des dommages considérables à divers matériels, immeubles et monuments historiques dans l'est du Canada. De toute évidence, les précipitations acides constituent un problème important au Canada.

En 1994, les émissions de $SO_2$ au Canada s'établissaient à environ 2,5 millions de tonnes, soit une diminution de 50 % par rapport aux niveaux de 1980. Depuis 1980, ces émissions ont diminué d'environ 12 % aux États-Unis (plus de la moitié des dépôts acides au Canada en proviennent). Le programme américain de lutte contre les pluies acides prévoit une réduction de 40 % des émissions de $SO_2$ d'ici l'an 2010. Malgré ces réductions, on estime que certains des écosystèmes les plus sensibles subiront des dommages importants (APAC, 1997a).

(3) Smog

Initialement, le terme smog désignait les couches opaques de fumée et de brouillard qui obscurcissaient l'air de Londres. Son sens a depuis été étendu à la pollution atmosphérique causée principalement par l'industrie et les véhicules automobiles. En Amérique du Nord, il est associé à une forme caractéristique de pollution atmosphérique qui s'observe habituellement depuis la fin du printemps jusqu'au début de l'automne (Stieb *et al.*, 1995). Cette forme de pollution atmosphérique est également qualifiée de photochimique, parce que la réaction chimique à l'origine de sa formation est induite par la lumière.

Le smog photochimique est le résultat de réactions photochimiques complexes entre deux polluants, des hydrocarbures et des oxydes d'azote, qui se produisent sous l'action des rayons solaires, en présence de températures élevées (supérieures à 18 ºC) et de masses d'air stables. La lumière du soleil amorce la formation de l'ozone, et les températures élevées contribuent à accélérer les réactions chimiques qui mènent à la formation de l'ozone. C'est la raison pour laquelle les épisodes de smog sont plus fréquents en été. Le smog photochimique est composé de concentrations élevées d'ozone troposphérique et de nitrate de peroxyacétyle (PAN). Les concentrations d'ozone troposphérique sont souvent utilisées comme indices de la gravité globale du smog (Bunce, 1994). Les fluctuations des concentrations d'ozone dans une région donnée peuvent être dues en partie à l'évolution des conditions météorologiques.

Le smog photochimique, qui prend l'aspect d'un nuage opaque de couleur brun jaunâtre, réduit la visibilité et renferme des substances irritantes (ozone, dioxyde d'azote, aldéhydes aliphatiques et nitrates organiques) pour les voies respiratoires et les yeux. La couleur particulière du smog est due à la présence du dioxyde d'azote (Bunce, 1994).

L'ozone troposphérique est l'un des principaux constituants du smog photochimique. Il est produit indirectement par la combustion du charbon, de l'essence et d'autres combustibles, et par

diverses substances chimiques présentes dans des produits chimiques comme les solvants, les peintures et les laques pour cheveux; il réagit très facilement avec de nombreux autres gaz atmosphériques ainsi qu'avec des matières vivantes ou inertes. L'ozone est un polluant secondaire qui est catalysé à partir de l'oxygène par d'autres polluants atmosphériques sous l'action des rayons solaires lorsque les températures sont suffisamment élevées.

Les sources d'hydrocarbures incluent les incendies de forêt, la décomposition de la matière organique, l'évaporation des solvants organiques, des procédés industriels et les émissions des moteurs. Les sources d'oxydes d'azote englobent les moteurs à combustion interne et les chaudières alimentées au charbon, à l'huile ou au gaz naturel. Les précurseurs de l'ozone sont émis par des millions de sources mobiles ou stationnaires (p. ex., automobiles, aéronefs, bateaux, incendies de forêt, centrales électriques, établissements de nettoyage à sec, stations-service).

**Tableau 11.1 Nombre de jours par année durant lesquels les concentrations d'ozone ont dépassé la concentration maximale de $82X10^{-9}$ durant une heure, donnée comme objectif de qualité de l'air (moyenne des trois années durant lesquelles les concentrations ont été les plus élevées entre 1983 et 1990)**

| Ville | Nombre de jours |
|---|---|
| | |
| Victoria (Colombie-Britannique) | 0,0 |
| Vancouver (Colombie-Britannique) | 10,7 |
| Edmonton (Alberta) | 1,3 |
| Calgary (Alberta) | 2,3 |
| Regina (Saskatchewan) | 0,7 |
| Winnipeg (Manitoba) | 2,3 |
| Sault Ste. Marie (Ontario) | 3,0 |
| Windsor (Ontario) | 30,0 |
| Sarnia (Ontario) | 24,7 |
| London (Ontario) | 20,7 |
| Hamilton (Ontario) | 17,0 |
| Toronto (Ontario) | 24,0 |
| Oshawa (Ontario) | 22,3 |
| Cornwall (Ontario) | 10,3 |
| Ottawa (Ontario) | 7,3 |
| Montréal (Québec) | 14,7 |
| Québec (Québec) | 5,7 |
| Halifax (Nouvelle-Écosse) | 0,7 |
| Kejimkujik (Nouvelle-Écosse) | 4,3 |
| Saint-Jean (Nouveau-Brunswick) | 5,0 |

Source : Environnement Canada, 1995a

En dérivant, les panaches de pollution urbaine peuvent avoir des effets néfastes dans les régions rurales adjacentes (Bunce, 1994). La pollution transfrontalière entre les États-Unis et le Canada est un problème important. Des quantités considérables de polluants atteignent ainsi le sud de l'Ontario en provenance des États-Unis.

Bien que la qualité de l'air se soit dans l'ensemble améliorée au Canada au cours des 15 dernières années, des épisodes de smog continuent de se produire. Ces épisodes sont surtout un phénomène estival et résultent principalement d'une hausse des concentrations d'ozone troposphérique (Stieb *et al.*, 1995).

Plus de la moitié des Canadiens vivent dans des régions où les concentrations d'ozone troposphérique atteignent des niveaux inacceptables durant les mois d'été (Olivotto, communication écrite, 1997). Le tableau 11.1 indique le nombre de jours par année durant lesquels les concentrations d'ozone ont dépassé la concentration maximale de $82X10^{-9}$ (parties par milliard) pour une heure, donnée comme objectif de qualité de l'air (moyenne des trois années durant lesquelles les concentrations ont été les plus élevées entre 1983 et 1990).

Les trois régions du Canada les plus touchées par le smog sont : 1) le corridor Windsor-Québec; 2) la vallée du bas Fraser; 3) le sud de la région de l'Atlantique (Environnement Canada, 1995a). Les concentrations maximales d'ozone dans ces régions sont observées presque exclusivement entre mai et septembre et dépassent souvent le seuil critique de $82X10^{-9}$ durant une heure, qui est donné comme objectif de qualité de l'air (Olivotto, communication écrite, 1997).

À l'échelle du pays, c'est le corridor Windsor-Québec qui subit le plus souvent les plus longues expositions à des concentrations inacceptables d'ozone troposphérique (CCME/Conseil canadien des ministres de l'environnement, 1996). Des concentrations supérieures à $82X10^{-9}$ ont été enregistrées simultanément pendant plusieurs heures consécutives, parfois jusqu'à huit jours consécutifs, dans des stations réparties sur plusieurs centaines de kilomètres. Dans le corridor Windsor-Québec, les concentrations maximales (une heure) enregistrées pendant des épisodes de pollution typiques atteignent souvent $150X10^{-9}$; les plus fortes concentrations mesurées à ce jour s'élevaient à $200X10^{-9}$ De toutes les villes canadiennes, c'est Windsor qui est le plus gravement touchée par le smog, avec ses quelque 30 jours (moyenne) de dépassement de la norme de qualité de l'air. Dans la vallée du bas Fraser, les concentrations d'ozone durant les épisodes de pollution atmosphérique fluctuent habituellement entre 90 et $110X10^{-9}$. Dans le sud de la région de l'Atlantique, les concentrations maximales (une heure) varient entre 90 et $150X10^{-9}$ (*idem).*

Préoccupé par le nombre élevé de jours durant lesquels les concentrations d'ozone dépassent la norme canadienne de $82X10^{-9}$, le CCME (1990) a mis au point un plan de lutte contre l'ozone troposphérique afin de faire en sorte que l'objectif de $82X10^{-9}$ soit respecté dans toutes les régions du pays d'ici l'an 2005 (APAC, communication écrite, 1997b).

(4) Particules

On appelle particules les matières en suspension dans l'air qui peuvent être filtrées. Le terme ne correspond à aucune entité chimique ou physique particulière et, dans bien des cas, les

expressions particules, particules en suspension dans l'air, total des particules en suspension et particules aéroportées sont synonymes.

Les particules en suspension incluent la poussière, la suie, les cendres, les fibres, le pollen et tout autre fragment microscopique de matières solides dont le rejet et la dispersion dans l'air sont assurés par des mécanismes naturels et les activités humaines. Dans ce dernier cas, les principales sources incluent la combustion de carburant diesel par les camions et les autobus, l'incinération des déchets, le mélange et l'application d'engrais et de pesticides, la construction de routes, l'exploitation des centrales thermiques et des incinérateurs à déchets, ainsi que divers procédés industriels tels que l'aciérage, l'exploitation minière, les feux dirigés en milieu agricole et l'utilisation de foyers et de poêles à bois. Les principales sources naturelles de particules comprennent la poussière soulevée par le vent, le pollen et les cendres provenant des feux de forêt (Environnement Canada, 1995a).

Les particules peuvent être classées en fonction de leur taille. Sont qualifiées de fines les particules des fractions PM 2,5 (taille ≤ 2,5 ) et PM 10 (taille ≤ 10 ). Ces particules sont si petites qu'elles restent en suspension dans l'air.

Les particules comprises dans la fraction PM 2,5 contiennent en proportion de plus grandes quantités d'eau et de substances chimiques acidifiantes comme les sulfates et les nitrates, de même que des métaux traces. Également qualifiées d'ultrafines, ces particules pénètrent facilement dans les immeubles et se dispersent d'une façon relativement uniforme dans les régions urbaines. Contrairement à d'autres polluants atmosphériques dont les concentrations varient à l'intérieur d'une région donnée, elles se dispersent en général d'une façon relativement uniforme. Dans la vallée du bas Fraser, les véhicules consommant du diesel ou de l'essence sont les principales sources de particules PM 2,5. Les particules de la fraction PM 10 sont plus grosses et moins nocives pour la santé humaine. Les particules d'origine naturelle, comme le pollen, sont en général plus grosses. Font toutefois exception à la règle les poussières produites par les incendies et les volcans (Environmental Protection, Ministry of Environment, Lands and Parks, Colombie-Britannique, 1995).

Depuis mai 1984, Environnement Canada exploite un réseau d'échantillonnage des particules inhalables (diamètre < 10 μ) dans 15 villes canadiennes. Les particules plus grossières sont principalement d'origine naturelle (minéraux provenant de la croûte terrestre, sel marin, matières végétales), tandis que les particules plus fines (principalement du plomb, des sulfates, des nitrates, du carbone et divers composés organiques) sont en général associées à la pollution anthropique. Dans les stations d'échantillonnage de l'est du Canada, les particules fines formaient plus de 60 % de la fraction inhalable, tandis que, dans celles des provinces des Prairies, ce pourcentage était habituellement inférieur à 40 % (Environnement Canada, 1990).

Les concentrations annuelles moyennes de particules en suspension dans l'air à toutes les stations du Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique (RNSPA) ont chuté de 46 % entre 1974 et 1986. Cette amélioration substantielle de la qualité de l'air en région urbaine reflète le fait que la plupart des sources industrielles de particules sont situées à l'extérieur des secteurs

urbains. En 1986, les concentrations moyennes dans plus de 90 % des stations étaient bien en deçà des normes de qualité de l'air (*idem*).

Toutefois, l'exposition à court terme à des concentrations élevées de particules continue de poser des problèmes. Par exemple, la limite acceptable pour une exposition de 24 heures a été dépassée 10 % des fois dans les stations situées à Sydney, Rouyn, Windsor, Edmonton, Hamilton et Calgary. L'objectif de qualité de l'air ambiant pour une période de 24 heures a été dépassé une fois en 1986 dans les stations établies à Edmonton, Calgary et Yellowknife. La présence de concentrations élevées de particules pendant de brèves périodes peut être attribuable en partie à la poussière soulevée par le vent, ainsi qu'à la construction, aux activités industrielles et à l'augmentation du parc automobile en milieu urbain (*idem*).

### *Objet*

En considération des liens étroits qui existent entre l'environnement et la santé humaine et de l'importance des problèmes atmosphériques posés au Canada par le changement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, la présence de substances toxiques dans l'air, les précipitations acides, le smog et la présence de particules en suspension dans l'air, il apparaît utile d'examiner la littérature scientifique traitant des impacts éventuels de ces problèmes sur la santé des Canadiens. Le présent rapport passe donc en revue ces impacts, propose des stratégies et des options d'adaptation et met en lumière les lacunes des connaissances et les besoins en matière de recherche.

Il convient de noter que les six problèmes atmosphériques sont interdépendants. Par leur capacité d'interagir, ils peuvent avoir des effets néfastes ou bénéfiques sur l'atmosphère, les écosystèmes et la population humaine. Malheureusement, leur impact n'a presque jamais été évalué de façon globale. Qui plus est, l'impact de chacun de ces problèmes sur la santé humaine a dans une large mesure été examinée en relation avec un seul de ces facteurs, les effets des conditions météorologiques et de la pollution de l'air sur la santé représentant la seule exception notable à cette règle.

## IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (RÉCHAUFFEMENT PLANÉTAIRE) SUR LA SANTÉ

Le changement climatique planétaire perturbera les systèmes physiques (p. ex., les régimes météorologiques) et les écosystèmes (p. ex., habitats des organismes vecteurs de maladies) de la planète et, en conséquence, constitue une menace directe et indirecte pour la santé des populations humaines. Les facteurs climatiques qui ont des impacts directs sur la biologie humaine sont considérés comme des risques directs. Les autres facteurs climatiques qui n'influent pas directement sur la biologie humaine sont qualifiés de risques indirects (McMichael *et al.*, 1996a et b).

Seul un faible nombre des études entreprises à ce jour dans ce domaine proposent une analyse quantitative des impacts probables du changement climatique sur la santé des Canadiens. Les travaux de Kalkstein, décrits plus loin, constituent toutefois une heureuse exception à cette règle. Les articles scientifiques publiés sur le sujet abordent la question de façon hypothétique, passant

en revue les impacts les plus probables (Guidotti, 1996). Les principales contributions canadiennes à l'étude des impacts du changement climatique sur la santé humaine incluent les travaux suivants : Last, 1989; Direction de l'hygiène du milieu, 1991; Association canadienne de santé publique, 1992; Last, 1993a et b; Guidotti, 1994; Programme canadien des changements à l'échelle du globe, 1995; Environnement Canada *et al.*, 1995b; Guidotti, 1996; Hancock et Davies, 1997.

***Impacts directs potentiels du changement climatique (réchauffement planétaire) sur la santé***

Incidence des températures extrêmes sur la santé

Au Canada, le réchauffement climatique devrait occasionner une augmentation de la gravité et de la fréquence des vagues de chaleur et une réduction de la fréquence des vagues de froid (Etkin, 1996). Par exemple, à Saskatoon, le nombre moyen de jours en juillet durant lesquels la température dépasse 31 ºC pourrait passer de trois à huit jours par an dans l'hypothèse d'un doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique. À l'inverse, le nombre moyen de jours en janvier où la température s'abaisse sous le seuil de -35 ºC pourrait passer de trois jours par an à un jour par quatre ans (Hengeveld, 1995).

Certains auteurs allèguent que l'accroissement de la fréquence et de la gravité des vagues de chaleur pourrait causer une augmentation des taux de morbidité et de mortalité, en particulier chez les enfants, les personnes âgées et les sujets frêles et malades, spécialement dans les grands centres urbains (CDC, 1989; Grant, 1991; Association canadienne de santé publique, 1992; Kalkstein, 1993; Kalkstein et Smoyer, 1993a et b; Programme canadien des changements à l'échelle du globe, 1995; Environnement Canada *et al*., 1995b; Kalkstein, 1995; Guidotti, 1996; Kalkstein *et al*., 1996; McMichael *et al*., 1996a et b; Phelps, 1996; Tavares, 1996; Hancock et Davies, 1997.). Les vagues de chaleur ont une incidence néfaste sur les troubles de santé existants et sur toutes les causes de mortalité, non seulement les troubles respiratoires ou cardiovasculaires (Programme canadien des changements à l'échelle du globe, 1995). Le tableau 11.2 présente le nombre de décès dus à la chaleur signalés au Canada entre 1965 et 1992. Enfin, les vagues de chaleur ont été mises en cause dans l'apparition de comportements violents et d'autres formes de comportements antisociaux (Programme canadien des changements à l'échelle du globe, 1995).

Aux États-Unis, 1 700 décès dus à la chaleur ont été enregistrés en 1980, 556 en 1983 et 454 en 1988 (CDC, 1995). Malgré leur nature extrême, ces exemples illustrent ce qui pourrait se produire si les scénarios de changement climatique se confirment. Plus récemment, les vagues de chaleur ont fait 118 victimes à Philadelphie en 1993 (CDC, 1993 et 1994), 91 à Milwaukee en 1995 et 726 à Chicago en 1995 (Phelps, 1996).

L'acclimatation des populations à la hausse des températures pourrait toutefois contribuer à réduire les taux prévus de morbidité et de mortalité dus à la chaleur. Selon Kalkstein *et al.* (1993b), les populations de Montréal et de Toronto devraient s'adapter assez bien aux nouvelles conditions climatiques. La population d'Ottawa, en revanche, ne montre aucun signe de capacité d'acclimatation. Il convient toutefois de noter que l'acclimatation aux températures plus élevées

**Tableau 11.2 Nombre de décès dus à la chaleur ou au froid signalés au Canada entre 1965 et 1992**

| Année | Chaleur | Froid |
|---|---|---|
| 1965 | 5 | 87 |
| 1966 | 15 | 98 |
| 1967 | 5 | 73 |
| 1968 | 10 | 91 |
| 1969 | 2 | 91 |
| 1970 | 5 | 110 |
| 1971 | 3 | 158 |
| 1972 | 3 | 118 |
| 1973 | 5 | 124 |
| 1974 | - | 126 |
| 1975 | 24 | 104 |
| 1976 | 1 | 106 |
| 1977 | 14 | 113 |
| 1978 | 5 | 106 |
| 1979 | 11 | 112 |
| 1980 | 3 | 120 |
| 1981 | 4 | 84 |
| 1982 | - | 132 |
| 1983 | 6 | 107 |
| 1984 | 3 | 116 |
| 1985 | 7 | 121 |
| 1986 | 10 | 93 |
| 1987 | 9 | 74 |
| 1988 | 19 | 75 |
| 1989 | 4 | 98 |
| 1990 | 5 | 86 |
| 1991 | 2 | 83 |
| 1992 | 3 | 69 |
| Total | 183 | 2 875 |

* Pour les années 1975 à 1978, on ne dispose d'aucune information permettant de déterminer si les décès imputables à la chaleur ou au froid sont liés à des conditions météorologiques ou à d'autres causes.

s'effectue de façon progressive, en particulier chez les personnes âgées, et risque d'être moins rapide que le changement des températures ambiantes. Des températures ambiantes plus élevées influent sur l'élévation de la température centrale du corps. Un lien a été établi entre l'élévation de la température centrale du corps et une augmentation des taux de mortalité périnatale, de naissance prématurée et de calculs rénaux (Programme canadien des changements à l'échelle du globe, 1995).

Deux études empiriques importantes ont été consacrées au changement climatique et aux taux de morbidité et de mortalité imputables à la chaleur au Canada. Tavares (1996), pour sa part, a étudié la relation entre les conditions météorologiques et les taux de morbidité imputables à la chaleur à Toronto de 1979 à 1989. Il a noté l'existence d'une relation significative entre les conditions météorologiques et toutes les causes de morbidité confondues chez les personnes âgées de moins de 65 ans, les facteurs météorologiques expliquant environ 14 % de la variabilité observée. Kalkstein et Smoyer (1993a), pour leur part, ont réalisé une étude globale sur les impacts potentiels du changement climatique sur les taux de mortalité imputables à la chaleur dans dix grandes villes canadiennes. Les grandes lignes de cette étude sont présentées par Kalkstein et Sheridan dans les pages qui suivent.

### *Effets du climat et du changement climatique sur la mortalité due à la chaleur au Canada*

Introduction

La présente analyse concerne les impacts présents et éventuels du réchauffement planétaire sur la mortalité humaine due à la chaleur dans dix villes du Canada. Elle repose sur l'utilisation de quatre scénarios de MCG, dont le modèle canadien, pour l'année 2050. Les résultats indiquent que, si le réchauffement se déroule tel que prévu, en présence d'un doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique, plusieurs grandes villes du Canada normalement exposées à des masses d'air chaudes et humides en été pourraient être très durement touchées.

Méthode

Statistique Canada a gracieusement fourni aux auteurs de l'étude les données de mortalité pour la période 1958-1988 dans les dix villes et régions métropolitaines suivantes du Canada : Calgary, Edmonton, Halifax, Montréal, Ottawa, Québec, Saint-Jean, Toronto, Vancouver et Winnipeg. Ces villes ont été choisies en raison de la taille de leur population et, par conséquent, du nombre relativement élevé de décès qui y sont signalés chaque jour, ainsi que de la diversité des zones climatiques qu'elles représentent. Les données de mortalité ont été subdivisées en fonction de l'âge (moins de un an, plus de 65 ans, tous âges confondus) et de la cause de mortalité (groupe associé aux conditions météorologiques, incluant tous les troubles respiratoires, la grippe, les accidents vasculaires cérébraux, les blessures et coups de chaleur/stress dus à la chaleur, et toutes causes confondues). Les spécialistes ne s'entendent pas sur la validité d'établir une catégorie de mortalité liée aux conditions météorologiques. Comme le nombre de décès imputables à un nombre étonnamment élevé de facteurs semble augmenter en présence de températures extrêmes (Applegate *et al.*, 1981; Jones *et al.*, 1982), les auteurs de l'étude ont jugé utile d'analyser séparément les causes de décès liées aux conditions météorologiques et toutes les autres causes de décès confondues.

Un bref aperçu des méthodes d'analyse des données utilisées est présenté ci-dessous. Le lecteur trouvera des renseignements plus détaillés sur le sujet dans Kalkstein et Smoyer (1993a). Avant d'utiliser les scénarios climatiques, les auteurs de l'étude ont eu recours aux deux méthodes suivantes pour vérifier l'existence de liens historiques entre les conditions météorologiques et la mortalité :

**Tableau 11.3 Variables météorologiques prises en compte dans l'étude de la mortalité**

| | |
|---|---|
| Température maximale | ($T_{max}$) |
| Température minimale | ($T_{min}$) |
| Point de rosée minimal | ($PR_{min}$) |
| Point de rosée maximal | ($PR_{max}$) |
| Nébulosité à 14 h (HNL) | (N 1400)* |
| Vitesse du vent à 14 h (HNL) | (VV 1400)* |
| Période de l'année | (Période) |
| $N^{bre}$ jours consécutifs | (Jours) |
| * Les valeurs représentent la nébulosité et la vitesse du vent mesurées à 14 H (HNL) | |
| HNL = Heure normale locale | |

1) Seuils thermiques. Un seuil thermique a été calculé statistiquement pour chaque ville. Cette valeur correspond à la température maximale quotidienne au-delà de laquelle la mortalité augmente de façon significative (Kalkstein et Davis, 1989). Pour l'établir, il faut déterminer l'écart entre les taux de mortalité enregistrés en deçà et au-delà d'une température donnée. La température à laquelle l'écart maximal est observé est le seuil thermique. Une méthode de régression permet ensuite de déterminer quels facteurs météorologiques additionnels (tableau 11.3) sont les plus étroitement liés à la mortalité enregistrée au cours des jours où la température dépasse le seuil (Draper et Smith, 1981). Il reste alors à déterminer, à l'aide des tests proposés par Box et Wetz (1973), si les algorithmes obtenus à l'aide de ces analyses de régression peuvent être considérés comme des prédicteurs valables de la mortalité.

1. Identification des « masses d'air ». Cette méthode repose sur l'identification des situations météorologiques ou des masses d'air dangereuses qui semblent associées à des taux de mortalité particulièrement élevés (Kalkstein, 1991a). Comme la méthode reposant sur le calcul des seuils thermiques, elle est fondée sur l'hypothèse que l'effet combiné de plusieurs facteurs météorologiques est plus important que la somme des effets individuels de chacun de ces facteurs (un facteur comme dans la méthode du seuil thermique).

Le calcul pour chaque ville d'un indice informatisé fondé sur les masses d'air appelé indice synoptique temporel (Kalkstein *et al.*, 1987) permet de regrouper chaque journée de la période de l'étude en fonction de son degré d'homogénéité sur le plan météorologique (Kalkstein, 1991a). Ce classement est fondé sur l'examen de sept paramètres météorologiques (température de l'air, point de rosée, visibilité, nébulosité totale, pression d'air au niveau de la mer, vitesse du vent, direction du vent) mesurés quatre fois par jour.

L'examen du taux de mortalité quotidienne moyenne associé à chaque catégorie synoptique a ensuite permis de déterminer si une catégorie spécifique présentait des valeurs particulièrement élevées. Les décalages potentiels d'un, deux et trois jours ont également été pris en compte. Comme dans le cas de la méthode des seuils thermiques, chaque jour classé dans une catégorie considérée comme dangereuse a fait l'objet d'une analyse de régression intégrant les variables énumérées au tableau 11.3.

Une fois la validité des liens historiques établie, il faut estimer les changements des taux de mortalité qui risquent d'être engendrés par le réchauffement climatique. À cette fin, les auteurs de

l'étude ont utilisé plusieurs scénarios intégrant des MCG ainsi que des scénarios arbitraires (tableau 11.4). Le nombre de jours durant lesquels la température a dépassé le seuil thermique et classés dans des catégories synoptiques dangereuses est établi à l'aide de ces scénarios, et les algorithmes fournis par cette analyse historique peuvent alors être utilisés pour estimer les taux de mortalité.

La capacité d'acclimatation des populations doit être prise en compte dans l'estimation des impacts du réchauffement climatique sur la mortalité. En d'autres mots, la population de chaque ville continuera-t-elle de réagir aux facteurs météorologiques comme elle le fait présentement, ou se comportera-t-elle comme les populations qui sont actuellement exposées à des climats plus chauds et qui sont déjà acclimatées à la chaleur? Pour tenir compte du facteur d'acclimatation, il faut examiner, pour chaque ville, les différences de mortalité durant les vagues de chaleur entre les étés frais et les étés chauds. En effet, si la population d'une ville donnée présente une bonne capacité d'acclimatation, sa réaction à la chaleur devrait être plus prononcée durant les étés frais, les vagues de chaleur étant alors moins fréquentes que durant les étés chauds (Kalkstein, 1991b; Rotton, 1983). Des études récentes réalisées par la communauté médicale sur le rôle des protéines du stress thermique qui sont synthétisées par l'organisme en réponse à diverses sources environnementales de stress (p. ex., changement de température) portent à croire que le processus d'acclimatation pourrait être relativement rapide (Born *et al.*, 1990).

Si le nombre de décès par journée chaude dans une ville donnée est inversement proportionnel au nombre de jours au cours desquels la température dépasse le seuil thermique durant un certain nombre d'étés, on peut supposer que la population de cette ville pourrait s'acclimater au réchauffement prévu en cas de doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique. Pour ces villes, des estimations de la mortalité fondées sur les divers scénarios de changement climatique peuvent être calculées en utilisant la pente de la droite de régression pour évaluer la réduction de la mortalité durant les étés les plus chauds. Ces estimations intégrant l'effet de l'acclimatation reflètent uniquement les modifications à court terme du comportement physiologique, et non pas l'évolution des infrastructures. Toutefois, ces estimations pourraient fort bien être les plus réalistes, car les ajustements d'ordre culturel et social (p. ex., construction de logements adaptés aux vagues de chaleur plus fréquentes) peuvent accuser un retard considérable sur les adaptations physiologiques de l'organisme à la chaleur (Kalkstein, 1991b).

Les méthodes décrites ci-dessus comportent toutefois plusieurs limites. Premièrement, elles ne tiennent pas compte des effets de la pollution atmosphérique, lesquels peuvent être étroitement liés aux conditions météorologiques (Schwartz *et al.*, 1988). Deuxièmement, même s'ils fournissent actuellement les meilleures estimations des futurs scénarios de changement climatique, les MCG comportent également de nombreuses lacunes, et les résultats obtenus pour une ville donnée diffèrent souvent selon le modèle utilisé (Kalkstein, 1991b). Enfin, l'estimation des

**Tableau 11.4 Scénarios de changement climatique utilisés dans le cadre de l'étude**

| **Modèles de circulation générale (MCG)** |
|---|
| |
| Geophysical Fluid Dynamics Laboratory : modèle GFDL Q-flux R15 (Wetherald et Manabe, sous presse) |
| United Kingdom British Meteorological Office : modèle UKMO (Wilson et Mitchell, 1987) |
| Centre climatologique canadien : modèle de seconde génération du CCC (McFarlane *et al.*, sous presse) |
| NASA Goddard Institute for Space Studies : modèle GISS (Hansen *et al.*, 1988) |

réactions d'acclimatation s'appuie sur une connaissance limitée des réactions individuelles et collectives au changement climatique. Actuellement, aucune étude ne permet de déterminer l'évolution des taux d'acclimatation sur plusieurs décennies, soit la période sur laquelle s'étalera le réchauffement planétaire à long terme induit par les activités humaines.

Résultats

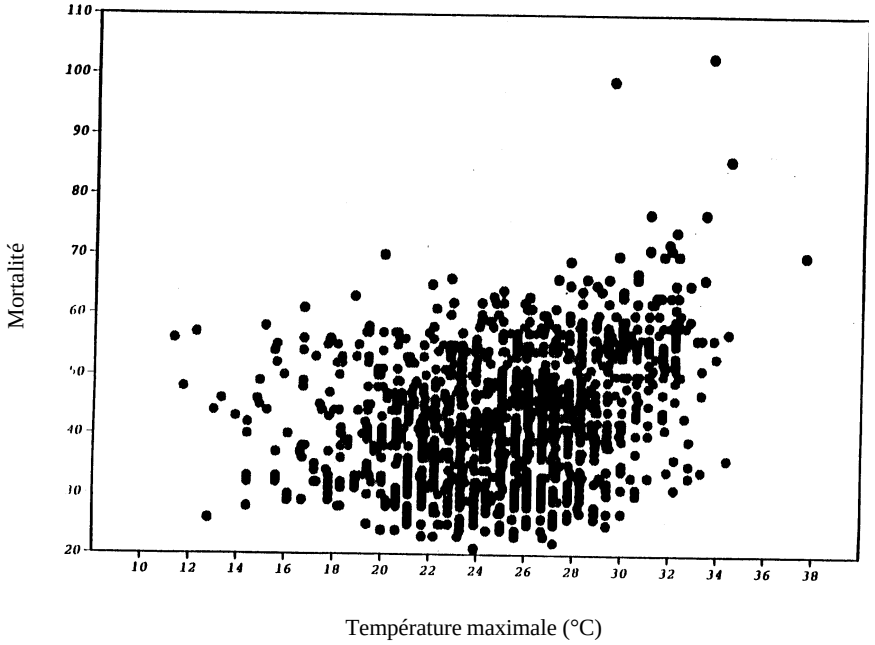
Liens historiques

Un lien significatif semble exister entre les conditions météorologiques estivales et la mortalité dans plusieurs des plus grandes villes canadiennes, en particulier dans les villes exposées à un climat chaud et humide en été. Après vérification à l'aide de la méthode des seuils thermiques, il appert que, parmi les dix villes considérées dans le cadre de l'étude, seules Toronto et Montréal affichent un lien significatif entre la température maximale et la mortalité (figure 11.1). Les seuils thermiques calculés pour Montréal et Toronto s'élevaient respectivement à 29 ºC et à 33 ºC.

L'absence de lien entre la température maximale et la mortalité dans les autres villes canadiennes est imputée à plusieurs facteurs. Ainsi, les villes de Vancouver, Saint-Jean et Halifax ne connaissent presque jamais les éprouvantes vagues de chaleur vécues par Montréal et Toronto. Les populations des villes de Winnipeg, Calgary et Edmonton subissent régulièrement de telles vagues de chaleur mais, comme les masses d'air qui se déplacent au-dessus des Prairies sont nettement moins humides que celles qui atteignent l'est du pays, les conditions durant ces épisodes sont beaucoup plus faciles à supporter. La relation entre la mortalité et la chaleur est également faible dans certaines villes américaines adjacentes (p. ex., Minneapolis) exposées à des conditions climatiques similaires. Enfin, l'absence de lien entre la mortalité et la température à Ottawa et à Québec, combinée à l'existence à Montréal et à Toronto de seuils thermiques relativement faibles comparativement à ceux des villes américaines, donnent à croire que les régions métropolitaines du sud-est du Canada se trouvent à la limite nord d'une zone présentant une relation significative entre la chaleur et la mortalité.

Une évaluation des variables susceptibles d'influer sur les taux de mortalité à Montréal et à Toronto en présence de températures supérieures au seuil thermique révèle que les populations de ces deux villes réagissent de la même façon aux conditions de chaleur excessive (tableaux 11.5 et 11.6). Dans ces deux villes, les conditions météorologiques expliquent à elles seules une part importante de la variation des taux de mortalité en présence de températures supérieures au seuil thermique. À Toronto, cette proportion s'élève à 30 % ($R^2 > 0{,}30$) lorsque la température maximale est supérieure à 33 °C. Cette valeur représente un niveau de signification comparable à celui observé dans bon nombre des villes américaines les plus sensibles aux facteurs météorologiques. À Montréal et à Toronto, une longue série de jours caractérisés par des conditions éprouvantes engendre parmi la population des effets physiologiques néfastes (coefficient positif pour la variable *Jours*). En outre, les vagues de chaleur qui surviennent tôt dans la saison sont plus dommageables que celles qui se produisent en fin de saison (coefficient négatif pour la variable *Période*), ce qui indique une acclimatation intrasaisonnière. Ces résultats portent à croire à l'existence d'un phénomène significatif à un seuil de 99 %, et le coefficient de

**Figure 11.1 Relation entre la température maximale et la mortalité à Montréal**




détermination est suffisamment élevé pour résister aux tests de Box et Wetz. L'algorithme fourni par l'analyse peut donc être utilisé à des fins prédictives.

La méthode d'évaluation synoptique a révélé l'existence d'une masse d'air dangereuse pour Ottawa, de même que pour Montréal et Toronto (tableau 11.7). Cette masse d'air présentait des caractéristiques comparables dans les trois villes (températures très élevées, points de rosée élevés, vents du sud-ouest modérés à forts, anticyclone à noyau chaud au sud). Ces caractéristiques expliquent l'absence de masses d'air dangereuses dans les trois villes les plus sèches des Prairies, où ce type de masse d'air est rarement observé.

**Tableau 11.5 Analyse de régression pour les jours durant lesquels la température a dépassé le seuil thermique à Montréal** (seuil thermique avec décalage de 0 jour = 29 ºC)

| **Mortalité totale** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Étape | Variable | Coefficient | $R^2$ - partiel (%) | $R^2$ - modèle (%) | F | Prob.>F |
| | Coordonnées à l'origine | 11,5015 | | | 0,89 | 0,3456 |
| 1 | Jours | 1,4972 | 8,81 | 8,81 | 18,17 | 0,0001 |
| 2 | Période | -0,1315 | 4,86 | 13,67 | 33,35 | 0,0001 |
| 3 | $PR_{min}$ | 0,7529 | 5,83 | 19,50 | 19,28 | 0,0001 |
| 4 | $T_{max}$ | 0,9358 | 1,05 | 20,55 | 4,99 | 0,0260 |
| **Mortalité - personnes âgées** | | | | | | |
| | Coordonnées à l'origine | 23,6256 | | | 105,99 | 0,0001 |
| 1 | Jours | 1,6175 | 9,01 | 9,01 | 37,81 | 0,0001 |
| 2 | Période | -0,1146 | 4,44 | 13,45 | 19,57 | 0,0001 |
| 3 | $PR_{min}$ | 0,6449 | 3,77 | 17,22 | 17,33 | 0,0001 |
| 4 | VV 1 400 | -0,1124 | 0,96 | 18,19 | 4,47 | 0,0352 |

**Tableau 11.6 Analyse de régression pour les jours durant lesquels la température a dépassé le seuil thermique à Toronto** (seuil thermique avec décalage de 0 jour = 33 ºC)

| Mortalité totale | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Étape | Variable | Coefficient | $R^2$ - partiel (%) | $R^2$ - modèle (%) | F | Prob.>F |
| | Coordonnées à l'origine | 28,0129 | | | 16,62 | 0,0001 |
| 1 | Jours | 4,0598 | 18,10 | 18,10 | 11,65 | 0,0011 |
| 2 | Train | 1,0680 | 6,64 | 24,74 | 7,40 | 0,0083 |
| 3 | VV 1 400 | -0,7068 | 4,81 | 29,55 | 4,18 | 0,0449 |
| 4 | Période | -0,0581 | 1,12 | 30,67 | 1,08 | 0,3028 |
| **Mortalité - personnes âgées** | | | | | | |
| | Coordonnées à l'origine | -50,0612 | | | 2,67 | 0,1072 |
| 1 | Jours | 2,7389 | 16,55 | 16,55 | 13,89 | 0,0004 |
| 2 | $T_{max}$ | 2,1165 | 4,21 | 20,76 | 3,67 | 0,0597 |
| 3 | $PR_{min}$ | 0,6824 | 4,81 | 25,57 | 4,40 | 0,0397 |
| 4 | Période | -0,0842 | 3,31 | 28,88 | 3,11 | 0,0822 |

**Tableau 11.7 Caractéristiques des masses d'air dangereuses : Montréal, Ottawa et Toronto**

| Heure | Variable | Valeur moyenne | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Montréal | Ottawa | Toronto |
| 0 h | Température (ºC) | 22,1 | 22,9 | 20,8 |
| | Point de rosée (ºC) | 18,2 | 19,3 | 17,0 |
| | Pression (mb) | 1 008,9 | 1 013,2 | 1 018,2 |
| | Vent : vitesse et direction | Fort, SW | Fort, SW | Faible, WSW |
| | Nébulosité (dixièmes) | 6 | 5 | 2 |
| 6 h | Température (ºC) | 21,1 | 21,5 | 19,5 |
| | Point de rosée (ºC) | 18,1 | 19,3 | 16,7 |
| | Pression (mb) | 1 008,9 | 1 013,0 | 1 018,6 |
| | Vent : vitesse et direction | Fort, SW | Fort, SW | Faible,WSW |
| | Nébulosité (dixièmes) | 7 | 6 | 3 |
| 12 h | Température (ºC) | 26,2 | 29,8 | 30,1 |
| | Point de rosée (ºC) | 18,9 | 20,6 | 18,6 |
| | Pression (mb) | 1 008,5 | 1 011,9 | 1 018,0 |
| | Vent : vitesse et direction | Très fort, SW | Fort, WSW | Fort, SW |
| | Nébulosité (dixièmes) | 6 | 6 | 4 |
| 18 h | Température (ºC) | 24,9 | 28,4 | 29,2 |
| | Point de rosée (ºC) | 17,1 | 20,1 | 18,5 |
| | Pression (mb) | 1 008,1 | 1 010,1 | 1 016,0 |
| | Vent : vitesse et direction | Fort, WSW | Fort, WSW | Fort, SW |
| | Nébulosité (dixièmes) | 6 | 6 | 4 |

Il convient de noter que les taux de mortalité n'augmentent pas nécessairement en présence d'une masse d'air dangereuse. Bien que la mortalité quotidienne moyenne en présence de masses d'air dangereuses s'élève en pareil cas de 15 % à Montréal et de 20 % à Toronto, les écarts-types associés à ces masses d'air sont également nettement plus élevés. S'il est vrai que les plus forts taux de mortalité sont le plus souvent enregistrés en présence de masses d'air dangereuses, des taux nettement plus faibles, parfois même inférieurs aux taux moyens observés en présence d'autres types de masses d'air, ont également été observés à de multiples reprises en pareilles circonstances.

Les deux analyses (seuil thermique et évaluation synoptique) ont été réalisées pour les sous-ensembles de données sur la mortalité disponibles. Au terme de ces analyses, les conclusions suivantes s'imposent :

1) Au Canada, les personnes âgées ne sont pas incommodées d'une façon disproportionnée par la chaleur. La situation à cet égard diffère d'une façon significative dans la plupart des villes des États-Unis. Les différences observées pourraient tenir à la qualité du système d'assurance-maladie et des soins offerts dans les foyers pour personnes âgées au Canada.

2) Aucun lien significatif entre les taux de mortalité chez les nourrissons (< 1 an) et les conditions météorologiques n'a été relevé dans les dix villes étudiées.

3) L'examen des causes de mortalité liées aux conditions météorologiques estivales n'a révélé aucune hausse de l'intensité de la relation entre la mortalité et les facteurs météorologiques dans aucune des villes canadiennes. En d'autres mots, il semble que la fréquence d'un grand nombre de causes de mortalité, même celles qui ne sont habituellement pas associées à la chaleur, augmente lorsque la chaleur devient oppressante.

Estimations des taux de mortalité actuels imputables à la chaleur

Des estimations des taux de mortalité actuels liés à la chaleur ont été calculées aux fins des analyses fondées sur les seuils thermiques (Toronto et Montréal) et l'évaluation synoptique (Toronto, Montréal et Ottawa), au moyen des algorithmes obtenus à partir des analyses de régression décrites antérieurement. La mortalité a été estimée pour chaque journée de l'échantillon de 30 ans (1958-1988) au cours de laquelle des masses d'air dangereuses ont été observées ou la température s'est élevée au-dessus du seuil thermique. Pour chaque mois, ces valeurs ont ensuite été comparées aux données de mortalité quotidienne moyenne établie sur 30 ans. L'écart entre l'estimation fournie par l'algorithme et la mortalité quotidienne moyenne à long terme a été assimilé à la contribution de la chaleur à la mortalité.

Les estimations indiquent qu'en certaines circonstances, le stress engendré par la chaleur peut causer une hausse appréciable des taux de mortalité en été (tableaux 11.8 et 11.9). Selon une analyse fondée sur les deux approches (seuils thermiques et évaluation synoptique), durant un été normal, la chaleur est responsable d'une hausse annuelle de la mortalité de plus de 2 décès par 100 000 résidents à Montréal. Cette hausse est beaucoup plus marquée chez les personnes âgées, s'établissant à 11,3 (évaluation synoptique) et à 13,9 (seuils thermiques) décès additionnels par 100 000 personnes âgées (décès imputables aux conditions météorologiques). Ce rapport approximatif de six pour un de la hausse de mortalité chez les personnes âgées à la hausse parmi l'ensemble de la population montréalaise reflète approximativement le rapport des taux de mortalité entre les personnes âgées et l'ensemble de la population. En d'autres mots, même si la plupart des décès imputables à la chaleur surviennent chez les personnes âgées, ces dernières ne semblent pas incommodées d'une façon disproportionnée par la chaleur. À Toronto, durant un été normal, la hausse annuelle de la mortalité due à la chaleur est nettement plus faible qu'à Montréal, s'établissant à 1 décès pour 100 000 résidents selon les deux approches. La raison de cette différence n'est pas évidente, mais il convient de noter que l'ajustement de la droite de régression aux données est meilleur dans le cas de Montréal que dans celui de Toronto.

Pour Ottawa, seule l'approche synoptique a été utilisée aux fins des analyses. Selon les estimations obtenues, la hausse annuelle de la mortalité expliquée par les conditions

**Tableau 11.8 Taux de mortalité estimés dus à la chaleur au cours des étés 1958-1988, à Montréal et à Toronto[a] (approche des seuils thermiques)**

| | Saison normale | | | | Saison la plus extrême | | | | Saison la moins extrême | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ville | Juin | Juillet | Août | Total | Juin | Juillet | Août | Total | Juin | Juillet | Août | Total |
| Montréal - Total | 0,57[b] | 1,56 | 0,49 | 2,62 | 0,61 | 3,69 | 3,12 | 7,42 | 0,38 | 0,15 | 0 | 0,53 |
| Montréal - Pers. âgées[c] | 3,76 | 7,81 | 2,32 | 13,89 | 4,05 | 22,28 | 17,65 | 43,99 | 0,58 | 0 | 2,03 | 2,60 |
| Toronto - Total | 0,08 | 0,46 | 0,19 | 0,73 | 0,96 | 3,57 | 1,96 | 6,45 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Toronto - Pers. âgées | 0,84 | 4,63 | 1,68 | 7,15 | 10,52 | 39,55 | 15,99 | 66,05 | 0 | 0 | 0 | 0 |

a = Valeurs déduites des algorithmes (tableaux 11.3 et 11.4).
b = Taux de mortalité par 100 000 résidents.
c = Personnes âgées (65 ans et plus).

**Tableau 11.9 Taux de mortalité estimés dus à la chaleur au cours des étés 1958-1988, à Montréal, Toronto et Ottawa (approche synoptique fondée sur la présence de masses d'air dangereuses)**

| | Saison normale | | | | Saison la plus extrême | | | | Saison la moins extrême | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ville | Juin | Juillet | Août | Total | Juin | Juillet | Août | Total | Juin | Juillet | Août | Total |
| Montréal - Total | 0,27[a] | 1,25 | 0,49 | 2,02 | 0 | 5,55 | 1,56 | 7,11 | 0 | 0,23 | 0,04 | 0,27 |
| Montréal - Pers. âgées[b] | 1,45 | 7,23 | 2,60 | 11,29 | 0 | 34,44 | 8,10 | 42,54 | 0 | 0,29 | 0 | 0,29 |
| Toronto - Total | 0,15 | 0,46 | 0,31 | 0,92 | 0,15 | 1,19 | 1,50 | 2,84 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Toronto - Pers. âgées | 1,26 | 4,21 | 2,10 | 7,57 | 2,10 | 11,78 | 13,04 | 26,92 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ottawa - Total | 0,16 | 0,64 | 0,32 | 1,12 | 0 | 4,48 | 1,60 | 6,08 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ottawa- Pers. âgées | 0 | 5,91 | 3,94 | 7,89 | 0 | 29,57 | 9,86 | 39,43 | 0 | 0 | 0 | 0 |

a = Taux de mortalité par 100 000 résidents.
b = Personnes âgées (65 ans et plus).

météorologiques s'établit à 1,12 décès par 100 000 résidents. Pour toutes ces estimations, il convient de noter que les taux de mortalité durant les années ponctuées d'épisodes météorologiques extrêmes sont entre trois et cinq fois plus élevés que les taux moyens et se comparent aux taux moyens enregistrés à Chicago et Philadelphie

À partir de ces taux, il est possible de comparer l'importance relative de la mortalité due à la chaleur à la mortalité imputable à d'autres causes. Par exemple, le taux de mortalité combiné imputable à la bronchite, à l'emphysème et à l'asthme au Canada se chiffre à 8,8 décès par 100 000 habitants (U.S. Bureau of Census, 1991). Ce taux est légèrement plus élevé que le taux de mortalité totale liée à la chaleur observé parmi l'ensemble de la population montréalaise durant l'été le plus chaud (7,42 décès par 100 000 résidents, selon l'approche des seuils thermiques). Il convient également de noter que la mortalité liée à la chaleur est un phénomène strictement estival, contrairement à la mortalité liée aux troubles respiratoires. Parmi les autres causes de mortalité dont l'incidence sur les taux de mortalité se compare à celle de la chaleur à Montréal, mentionnons les hépatopathies chroniques comme la cirrhose (9,4 décès pour 100 000 habitants) et le cancer de l'estomac (9,0 décès pour 100 000 habitants). Les taux de mortalité due à la chaleur se comparent donc aux taux liés à d'autres causes de mortalité considérées comme modérément importantes à l'heure actuelle.

Estimation de la mortalité due à la chaleur selon les scénarios de réchauffement planétaire

Il y a de fortes raisons de craindre que le réchauffement planétaire provoque une hausse significative de la mortalité due à la chaleur, même si la population parvient à s'acclimater aux nouvelles conditions climatiques (tableaux 11.10 et 11.11). Selon les estimations établies à partir des modèles UKMO et GFDL, en l'absence d'acclimatation et en présence de concentrations de $CO_2$ atmosphérique deux fois plus élevées que les niveaux actuels, la mortalité estivale due à la chaleur pourrait dépasser 40 décès par 100 000 résidents à Montréal. Cette valeur est 15 fois supérieure au taux actuel. Cette perspective plutôt sombre s'explique essentiellement par l'augmentation substantielle du nombre de jours durant lesquels la température dépassera le seuil thermique ou des masses d'air dangereuses seront observées (tableau 11.12). À l'heure actuelle, à Montréal, durant un été typique, la température dépasse le seuil thermique de 29 ºC 13 % des jours. Selon l'estimation établie à l'aide du modèle du CCC, ce pourcentage grimperait à 55 %, dans la mesure où l'hypothèse du doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique s'avère fondée. Le pronostic fondé sur l'évaluation synoptique (masses d'air dangereuses) est également sombre, la fréquence actuelle des masses d'air dangereuses à Toronto passant de 5 % à 23 %, selon les estimations établies au moyen du modèle du CCC.

**Tableau 11.10 Estimation de la mortalité future imputable aux conditions météorologiques estivales au Canada (approche des seuils thermiques)[a]**

| | | UKMO | | GFDL | | GISS | | CCC | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ville | Mortalité actuelle | Pas d'accl. | Accl. | Pas d'accl. | Accl. | Pas d'accl. | Accl. | Pas d'accl. | Ac |
| Montréal –Total | 2,62[b] | 43,16 | 24,79 | 40,69 | 24,95 | 16,35 | 8,29 | 22,39 | 11,6 |
| Montréal –Pers. âgées[c] | 13,89 | 260,17 | 166,69 | 254,67 | 171,61 | 96,65 | 56,14 | 126,18 | 77,8 |
| Toronto –Total | 0,73 | 33,65 | 0 | 16,92 | 0,23 | 9,63 | 0,12 | 13,77 | 0,19 |
| Toronto – Pers. âgées | 7,15 | 387,45 | 0 | 193,10 | 4,27 | 110,22 | 3,79 | 177,53 | 5,47 |

a = Valeurs déduites des algorithmes (tableaux 11.3 et 11.4).
b = Taux de mortalité par 100 000 résidents.
c = Personnes âgées (65 ans et plus).
Accl. = acclimatation

**Tableau 11.11 Estimation de la mortalité future imputable aux conditions météorologiques estivales au Canada (approche synoptique)**

| | | UKMO | | GFDL | | GISS | | CCC | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ville | Mortalité actuelle | Pas d'accl. | Accl. | Pas d'accl. | Accl. | Pas d'accl. | Accl. | Pas d'accl. | Accl. |
| Montréal - Total | 2,02[a] | 42,25 | 13,08 | 36,28 | 13,80 | 10,80 | 6,08 | 13,16 | 8,10 |
| Montréal - Pers. âgées[b] | 11,29 | 250,04 | 166,40 | 216,18 | 150,20 | 68,88 | 45,73 | 79,01 | 54,4 |
| Toronto - Total | 0,92 | 23,52 | 0 | 13,58 | 0,12 | 12,93 | 0,19 | 7,44 | 0,15 |
| Toronto - Pers. âgées | 7,57 | 221,70 | 0 | 122,84 | 0,84 | 112,74 | 2,10 | 68,15 | 1,68 |
| Ottawa – Total | 1,12 | 56,35 | S.O. | 51,70 | S.O. | 23,85 | S.O. | 19,53 | S.O. |
| Ottawa - Pers. âgées | 7,89 | 457,35 | S.O. | 406,10 | S.O. | 187,28 | S.O. | 143,91 | S.O. |

a= Taux de mortalité par 100 000 résidents.
b= Personnes âgées (65 ans et plus).
Accl. = acclimatation

**Tableau 11.12 Comparaison entre la situation actuelle et les estimations établies en fonction des scénarios : pourcentage de jours durant lesquels la température dépasse le seuil thermique ou des masses d'air dangereuses sont observées**

| **Pourcentage de jours durant lesquels la température dépasse le seuil thermique** | | | |
|---|---|---|---|
| Modèle | | Montréal (29 ºC) | Toronto (33 ºC) |
| Situation actuelle | | 13,1 | 2,5 |
| UKMO | | 71,4 | 47,9 |
| GISS | | 43,1 | 20,9 |
| GFDL | | 62,3 | 30,0 |
| CCC | | 55,1 | 28,5 |
| Nombre total de jours durant la période = 2 852 | | | |
| | | | |
| **Pourcentage de jours durant lesquels des masses d'air dangereuses sont observées** | | | |
| Modèle | Montréal (105) | Toronto (103) | Ottawa (101) |
| Situation actuelle | 10,7 | 4,7 | 2,8 |
| UKMO | 38,6 | 39,1 | 42,4 |
| GISS | 21,1 | 30,0 | 27,3 |
| GFDL | 33,4 | 28,9 | 36,6 |
| CCC | 28,1 | 23,3 | 26,9 |
| Nombre total de jours durant la période = 2 852 | | | |

En l'absence d'acclimatation, les taux de mortalité dus à la chaleur dépasseront les taux liés à des causes de mortalité relativement communes à l'heure actuelle, en particulier à Montréal. Par exemple, selon l'approche des seuils thermiques appliquée au modèle UKMO, le taux de mortalité augmente de vingt fois par rapport à sa valeur actuelle, et le taux de 43 décès par 100 000 habitants est largement supérieur au taux actuel de décès pour le cancer du sein (34,4 décès par 100 000 habitants), pour le suicide (13,9 décès par 100 000 habitants) et même pour les accidents de la route (15,6 décès par 100 000 habitants) (U.S. Bureau of Census, 1991; tableau 11.13). Les taux de décès à Toronto se comparent dans l'ensemble à ceux de Montréal, et les dépassent même selon le scénario GISS. L'évaluation synoptique pour Ottawa donne également des taux de mortalité très élevés en cas de doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique.

Il semble, après analyse de la situation, que les populations de Montréal et de Toronto parviendront à s'acclimater jusqu'à un certain point aux nouvelles conditions climatiques engendrées par le réchauffement planétaire. Cela ne semble cependant pas être le cas pour la population d'Ottawa, si bien que les estimations fondées sur l'hypothèse d'absence d'acclimatation paraissent plus réalistes. Si l'on suppose qu'une acclimatation est possible, la mortalité due à la chaleur s'abaisse considérablement (par rapport à ce qu'elle serait dans le cas contraire), tant à Toronto qu'à Montréal, quoiqu'elle soit largement supérieure à sa valeur actuelle. Par exemple, selon l'approche synoptique appliquée au modèle du CCC, la mortalité due à la chaleur, en présence d'acclimatation, serait environ quatre fois plus élevée qu'à l'heure actuelle (valeur actuelle de 2,02 décès par 100 000 résidents, valeur estimée selon le modèle du CCC de 8,01 décès par 100 000 résidents). Ce dernier taux se compare au taux combiné actuel de

**Tableau 11.13 Taux de mortalité due à certaines causes au Canada et aux États-Unis[a]**

| Causes de mortalité | Canada[b] | États-Unis[b] |
|---|---|---|
| Cardiopathie ischémique | 188,1 | 193,4 |
| Accident vasculaire cérébral | 54,8 | 54,6 |
| Cancer du poumon | 52,2 | 54,9 |
| Cancer de l'estomac | 9,0 | 5,5 |
| Cancer du sein | 34,4 | 31,6 |
| Bronchite, emphysème, asthme | 8,8 | 8,7 |
| Hépatopathies chroniques, cirrhose | 9,4 | 11,8 |
| Accidents de la route | 15,6 | 18,5 |
| Suicide | 13,9 | 12,5 |

a= Source : U.S. Bureau of Census, 1991. Taux de décès par 100 000 habitants.
b= Taux canadiens et américains fondés sur les valeurs de 1987.

décès dû à la bronchite, à l'emphysème et à l'asthme (tableau 11.13). Les taux établis d'après les scénarios GFDL et UKMO, ici encore en posant l'hypothèse d'une acclimatation, sont beaucoup plus élevés.

Résumé

Cette analyse avait pour objet d'estimer les effets potentiels du réchauffement planétaire sur la mortalité due à la chaleur dans 10 villes du Canada. Les résultats indiquent que, si le réchauffement s'accompagne comme prévu d'un doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique, les populations des régions urbaines du sud-est de l'Ontario et du sud du Québec pourraient être très durement affectées. À l'heure actuelle, ces populations sont exposées occasionnellement à des intrusions de masses d'air chaud et humide durant les mois d'été.

En l'absence d'acclimatation, le nombre annuel de décès additionnels dus à la chaleur au cours d'un été « normal », en 2050, pourrait varier entre 240 et 1 140 à Montréal, entre 230 et 1 220 à Toronto, et entre 80 et 500 à Ottawa (valeurs établies en fonction des populations actuelles). La question du « décalage » de la mortalité (les décès additionnels signalés seraient survenus de toute façon quelques semaines plus tard) doit également être prise en compte. Des études réalisées dans diverses villes des États-Unis révèlent qu'entre 20 et 40 % seulement des décès sont « décalés » (Kalkstein, 1993). Par conséquent, le réchauffement planétaire risque de provoquer une hausse significative du nombre de décès prématurés.

### *Effets des événements météorologiques extrêmes sur la santé*

Sous un climat plus chaud, la fréquence et la gravité des orages convectifs (orages violents accompagnés de grêle, de foudre, de tornades, de pluies abondantes et de vents violents) et des inondations devraient augmenter. Au Canada, des orages convectifs et des inondations se sont produits en juillet 1996 : 1) Calgary et Winnipeg ont essuyé des orages de grêle destructeurs (Etkin, 1996); et 2) de graves inondations ont dévasté la région du Saguenay au Québec

(Carpentier, 1996). Par ailleurs, on prévoit que les épisodes de sécheresse seront plus nombreux et dureront plus longtemps (Etkin, 1996).

Selon certains auteurs, l'augmentation de la fréquence et de la gravité des événements extrêmes devrait entraîner une hausse : 1) des taux de mortalité, de blessures, de maladies infectieuses et de troubles liés au stress (Alexander, 1993); et 2) de la fréquence de diverses autres conséquences néfastes pour la santé associées aux bouleversements de la société, aux migrations forcées par la modification de l'environnement et à la ghettoïsation des régions urbaines (McMichael *et al.,* 1996b). Le nombre de décès dus à la foudre, aux orages et aux inondations au Canada entre 1965 et 1992 est présenté au tableau 11.14.

Un épisode de précipitations extrêmement abondantes a été tenu en partie responsable de l'éclosion de cas de toxoplasmose qui s'est déclarée en 1995 dans le district régional de la capitale de la Colombie-Britannique. L'abondance des précipitations aurait entraîné la contamination des

**Tableau 11.14 Nombre de décès dus à la foudre, aux orages et aux inondations au Canada entre 1965 et 1992**

| Année | Foudre | Orages et inondations |
|---|---|---|
| 1965 | 7 | - |
| 1966 | 8 | - |
| 1967 | 8 | - |
| 1968 | 8 | - |
| 1969 | 9 | - |
| 1970 | 14 | - |
| 1971 | 9 | - |
| 1972 | 2 | - |
| 1973 | 3 | - |
| 1974 | 4 | - |
| 1975 | 11 | - |
| 1976 | 13 | - |
| 1977 | 8 | - |
| 1978 | 6 | - |
| 1979 | 6 | 2 |
| 1980 | 8 | 2 |
| 1981 | 10 | 1 |
| 1982 | 1 | - |
| 1983 | 4 | 2 |
| 1984 | 6 | 2 |
| 1985 | 3 | 13 |
| 1986 | 5 | 4 |
| 1987 | 6 | 28 |
| 1988 | 2 | 3 |
| 1989 | 5 | - |
| 1990 | 2 | - |
| 1991 | 5 | - |
| 1992 | 4 | 1 |
| Total | 177 | 58 |

eaux de ruissellement et du réservoir Humpback ou de ses tributaires par des déjections de félins contaminés (chats domestiques vivant en compagnie des humains ou à l'état sauvage, ou félins sauvages) et favorisé l'introduction d'oocystes dans le réseau d'approvisionnement en eau potable (British Columbia Centre for Disease Control, communication écrite, 1995).

### *Impacts indirects potentiels du changement climatique (réchauffement planétaire) sur la santé*

#### Introduction

Faute d'études analysant directement les impacts actuels ou potentiels du changement climatique sur l'incidence des maladies infectieuses, la santé nutritionnelle, la qualité et la quantité de l'approvisionnement en eau et l'infrastructure de santé publique au Canada, il faut pour l'instant se résoudre à faire des inférences à partir d'études réalisées à d'autres fins (c.-à-d. études indirectes des impacts indirects). Il s'agit là d'une lacune importante, et les autorités sanitaires canadiennes doivent prendre immédiatement les mesures qui s'imposent afin d'être en mesure de faire face aux nouveaux enjeux du XXI$^{e}$ siècle.

#### Maladies infectieuses

Au Canada, l'incidence de presque toutes les maladies infectieuses (pour ne pas dire la totalité) fluctue en fonction des saisons. Dans la mesure où elles reflètent des phénomènes strictement sociaux (p. ex., saisons scolaires), ces tendances saisonnières peuvent être considérées comme indépendantes du climat. Un tel raisonnement peut cependant être trompeur si les phénomènes sociaux eux-mêmes sont intimement liés aux fluctuations climatiques. Ainsi, la hausse de l'incidence de certaines intoxications alimentaires à la fin de l'été est parfois attribuée à l'utilisation accrue des barbecues extérieurs et à la manipulation de viandes crues par les consommateurs. Si l'allongement prévu de la saison chaude occasionné par le changement climatique se confirme au Canada, on peut s'attendre à ce que l'utilisation des barbecues à l'extérieur se prolonge à la fin de l'été. Ce changement comportemental devrait être corrélé de façon positive avec les concentrations bactériennes dans les viandes (lesquelles devraient augmenter par suite de la hausse des températures ambiantes). De telles boucles de rétroaction risquent également de se produire dans le cas des maladies à transmission vectorielle présentant un lien avec les activités de loisir à l'extérieur.

Certaines maladies dont l'incidence risque d'être modifiée par le réchauffement atmosphérique sont présentées ci-dessous. L'énumération qui suit se veut représentative, et non pas exhaustive.

#### Maladies à transmission vectorielle

##### Encéphalites

De façon générale, le réchauffement planétaire devrait modifier considérablement l'incidence des arboviroses, compte tenu du lien étroit qui existe entre ces infections et les conditions climatiques

(Sellers, 1983). L'aire d'endémicité de certaines encéphalites virales, à savoir l'encéphalite équine de l'Ouest (EEO), l'encéphalite équine de l'Est (EEE) et l'infection causée par le virus Snowshoe hare, s'étendra fort probablement au Canada. Des cas de ces trois maladies ont déjà été signalés au Canada ou dans certains États américains adjacents, quoique de façon sporadique (McLean *et al.*, 1985; Artsob, 1986; Tourangeau *et al.*, 1986; Keane et Little, 1987; Heath *et al.*, 1989; Carman *et al.*, 1995). Le cycle naturel de ces virus fait intervenir des moustiques et des oiseaux. Le mécanisme qui permet aux virus de survivre en hiver a longtemps fait l'objet de controverses (Sekla, 1976). La réévaluation de l'éclosion de cas d'EEE signalée en 1972 au Québec et au Connecticut (Sellers, 1989) et de l'éclosion de cas d'EEO qui a sévi de 1980 à 1983 au Manitoba, au Minnesota et dans le Dakota du Nord (Sellers et Maarouf, 1988) a montré que la série d'éclosions pourrait avoir été déclenchée par des moustiques infectés emportés par le vent vers le nord. La modification des courants atmosphériques et des microclimats locaux - deux conséquences éventuelles fort plausibles du réchauffement planétaire - exercerait de toute évidence une profonde influence sur l'épidémiologie de ces maladies, quelle que soit leur source originale.

Reeves *et al*. (1994), dans le cadre d'une analyse approfondie des problèmes posés par l'EEO et l'encéphalite de Saint-Louis, ont conclu qu'en présence des nouvelles conditions créées par le réchauffement planétaire, l'EEO pourrait disparaître de la majeure partie de son aire d'endémicité actuelle et devenir une infection plus fréquente dans les États du nord et au Canada. La propagation du virus de l'EEO est étroitement liée à la présence de certaines espèces de moustiques du genre *Culex* dont l'aire de répartition au Canada s'est accrue récemment. Ces espèces, trouvées encore tout récemment uniquement au Manitoba, se rencontrent maintenant jusqu'en Colombie-Britannique. Une éclosion de cas d'EEO a déjà été signalée dans la vallée de l'Okanagan. Le changement climatique laisse présager une prolifération du nombre d'éclosions de cas d'EEO dans les provinces de l'Ouest (Mathias, communication personnelle, 1996; Duncan, 1997).

### Malaria

De nombreuses études donnent à croire que le réchauffement climatique pourrait favoriser l'extension de la malaria vers le nord jusqu'au Canada (Direction de l'hygiène du milieu, 1991; Association canadienne de santé publique, 1992; Environnement Canada *et al.*, 1995b; Pearce, 1995; Duncan, 1996; Hancock et Davies, 1997). À cet égard, trois études empiriques examinant l'incidence éventuelle du réchauffement planétaire sur l'apparition de la malaria au Canada méritent d'être citées. Martens *et al.* (1995) estimaient qu'une hausse de plusieurs degrés de la température moyenne à l'échelle planétaire d'ici 2100 aurait pour effet d'accroître de cent fois le potentiel vecteur des moustiques dans les pays tempérés. Ces auteurs soulignaient toutefois que l'application soutenue et l'intensification des mesures de lutte et de surveillance et le traitement rapide des cas pourraient compenser cette augmentation du potentiel vecteur. Martin et Lefebvre (1995), sur la base d'estimations fournies par un modèle mathématique, prédisaient également une extension de la malaria à des latitudes plus élevées, et même jusqu'au Canada. Enfin, Duncan (1996) a montré que l'élévation de la température quotidienne moyenne, jumelée au doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique, pourrait favoriser la propagation de la maladie à Toronto. L'élévation de la température quotidienne moyenne pourrait favoriser : 1) le

développement du *Plasmodium vivax* et du *P. falciparum* à l'intérieur du moustique vecteur; 2) la transmission des deux formes de malaria associées à ces agents. L'hypothèse selon laquelle le réchauffement planétaire pourrait à lui seul favoriser la propagation de la malaria n'a cependant pas été formulée. Le climat est seulement l'un des nombreux facteurs qui interviennent dans l'étiologie de la malaria.

Il convient de rappeler que la malaria a déjà sévi dans le passé dans tout le sud du Canada (Bruce-Chwatt, 1988). La maladie y est devenue fréquente vers la fin du XVIII$^{e}$ siècle lorsque des réfugiés du sud des États-Unis sont venus s'établir en grand nombre aussi loin au nord que le lac Huron, au terme de la Guerre d'indépendance. La construction du canal Rideau (1826-1832) a également été marquée d'une nouvelle prolifération de cas de malaria (Carpenter, communication personnelle, 1995; Ghushalak, communication personnelle, 1995). Au milieu du XIX$^{e}$ siècle, la malaria sévissait jusqu'à 50$^{o}$ de latitude nord. En 1873, le district de l'ouest de l'Ontario constituait seulement une petite fraction de la vaste zone d'endémicité de la malaria, qui s'étendait de l'Ontario jusqu'au Michigan. Au Canada, la maladie est disparue à la fin du XIX$^{e}$ siècle (Bruce-Chwatt, 1988; Haworth, 1988; Duncan, 1996; Duncan, 1997).

Dengue et fièvre jaune

Le changement climatique pourrait également favoriser l'apparition de la dengue et de la fièvre jaune au Canada (Hancock et Davies, 1997; Artsob, communication personnelle, 1996). Au cours des dernières décennies, l'incidence de la dengue et de ses complications (dengue hémorragique et choc cardiogénique) a augmenté, et ces maladies se sont propagées jusqu'au Mexique et à des altitudes plus élevées (Herrera-Basto *et al.*, 1988).

Dirofilariose (ver du cœur)

Le *Dirofilaria immitis* est un parasite des chiens transmis par les moustiques. Chez l'humain, hôte occasionnel, l'infection se traduit par un syndrome de larva migrans pulmonaire avec thrombose des artères (Mandell *et al*., 1995). Le développement du parasite dans le corps du moustique est directement lié à la température. Par ailleurs, au cours des 20 dernières années, l'application de mesures de surveillance rigoureuses par les cabinets de médecine vétérinaire a permis de suivre chacun des cas signalés chez des chiens(Slocombe et MacMillan, 1978; Slocombe, 1990; Slocombe et Villeneuve, 1993; Anonyme, 1994). Ces rapports montrent clairement que le parasite a envahi plusieurs secteurs du Canada à partir de régions situées plus au sud au cours des vingt dernières années et qu'il y est maintenant présent à l'état endémique.

Maladie de Lyme et fièvre pourprée des montagnes Rocheuses

Le changement climatique pourrait également favoriser une extension de l'aire de répartition des maladies transmises par les tiques. Grant (1991) estimait que l'incidence de la fièvre pourprée des montagnes Rocheuses pourrait s'accroître dans certaines régions par suite du réchauffement. La maladie de Lyme pourrait également effectuer une percée au Canada (Grant, 1991; Programme canadien des changements à l'échelle du globe, 1995; Environnement Canada *et al*., 1995b;

Guidotti, 1996; Mathias, communication personnelle, 1997; Duncan, 1997; Hancock et Davies, 1997).

Depuis la fin des années 80, des cas de maladie de Lyme, maladie bactérienne propagée par des tiques, ont été signalés de façon sporadique au Canada chez des humains et divers animaux (Lycka, 1986; Bollegraaf, 1988; Barker *et al.*, 1989; Todd et Carter, 1989; Costero, 1990; MacKenzie, 1990; Sekla *et al.*, 1990; Galloway *et al.*, 1991; Barker *et al.*, 1992; Anand *et al.*, 1993; Banerjee, 1993). Bien que la présence de tiques vectrices ait été signalée dans diverses régions du Canada, l'existence de populations viables de tiques infectées n'est confirmée qu'à Long Point, en Ontario (Barker *et al.*, 1992). Néanmoins, il a été démontré que les oiseaux migrateurs introduisent chaque année des larves de tiques au Canada (Klich *et al.*, 1996). Comme les conditions deviendront de plus en plus favorables avec le réchauffement planétaire, ce n'est qu'une question de temps avant que la maladie de Lyme sévisse de façon endémique en divers endroits du Canada.

Espèces nuisibles

Hantavirus

Seulement seize cas de syndrome pulmonaire dû à un hantavirus ont été signalés à ce jour au Canada (Stephen *et al.*, 1994; Werker *et al.*, 1995). Tous ces cas ont été détectés en Colombie-Britannique, en Alberta et en Saskatchewan. Un virus encore non identifié a été associé à la souris sylvestre dans ces trois provinces, ainsi qu'au Yukon et au Manitoba. Le virus *Monongahela* a été trouvé chez cette même espèce de souris en Ontario, au Québec et au Nouveau-Brunswick (Artsob, communication personnelle, 1997; Duncan, 1997). Comme dans le cas de la peste (agent causal : *Yersinia pestis*), dont le réservoir est également un rongeur et dont la présence est très rarement signalée au Canada, l'incidence du syndrome pulmonaire dû à un hantavirus pourrait s'accroître par suite de l'accroissement de la fréquence des contacts entre les humains et les rongeurs. Le réchauffement planétaire influera donc sur l'incidence de cette maladie, compte tenu du fait que le virus est déjà présent chez les rongeurs au Canada et que les changements d'ordre climatique et écologique agissent sur les comportement du rongeur (et des humains).

Contamination de l'environnement et/ou de l'eau

Charbon

Des épidémies causées par le *Bacillus anthracis* ont été signalées chez les bovins, le bison et d'autres espèces de mammifères dans la région du parc national Wood Buffalo. Les spores du *B. anthracis* peuvent survivre pendant des décennies, voire des siècles, avant d'être réactivées par des modifications des conditions environnementales (en particulier la disponibilité des éléments nutritifs organiques et de l'eau). L'allongement de la saison chaude et la modification du régime des précipitations associés au réchauffement atmosphérique auront vraisemblablement des effets sur l'incidence et la répartition de la maladie (Gainer et Saunders, 1989; Dragon et Rennie, 1995).

Parasites aquatiques

Le parasite *Giardia* a apparemment déjà envahi un certain nombre de bassins hydrographiques du Canada et des États-Unis, exposant une part importante des populations des deux pays à la forme d'entérite qu'il détermine (Schantz, 1991; Chow, 1993; Moore *et al.*, 1993). Le *Cryptosporidium* est considéré comme l'un des agents entéropathogènes les plus communs du monde (Meinhardt *et al.*, 1996). La hausse des températures, l'allongement de la saison estivale, l'augmentation de la fréquence des précipitations abondantes ou des épisodes de ruissellement et l'utilisation intensive des bassins hydrographiques pour l'irrigation des terres agricoles et l'approvisionnement en eau potable des communautés urbaines laissent présager une prolifération et une aggravation des épidémies causées par ces deux parasites. Les graves épidémies signalées récemment aux États-Unis (Goldstein *et al*., 1996; Mackenzie *et al.*, 1994; Osewe *et al.*, 1996) et au Royaume-Uni (Bridgeman *et al.*, 1995) fournissent à cet égard de bonnes indications de ce que l'avenir nous réserve. Tant le G*iardia* que les diverses espèces de *Cryptosporidium* semblent capables de résister aux procédés municipaux d'épuration de l'eau, et aucune solution de rechange efficace n'a été proposée à ce jour. Qui plus est, aucun traitement vraiment efficace n'a encore été mis au point contre ces parasites (Meinhardt *et al.*, 1996).

Alors que de nombreux cas de contamination des réserves urbaines d'eau potable par le *Cryptosporidium* et des eaux de surface par le *Giardia* ont été signalés au cours des dernières années en Amérique du Nord, l'agent responsable de la toxoplasmose a rarement été associé à l'eau. Récemment, la contamination du système municipal d'approvisionnement en eau potable de la région métropolitaine de Victoria a été mise en cause dans la plus importante épidémie de toxoplasmose jamais rapportée (British Columbia Toxoplasmosis Team, 1995; den Hollander et Noteboom, 1996; Mullens, 1996). Cet événement doit être pris comme un avertissement. Autrefois considéré comme un facteur de risque principalement en cas de grossesse, la toxoplasmose est aujourd'hui reconnue comme une cause importante de mortalité parmi les sujets immunocompromis. Les données disponibles indiquent que l'exposition au parasite est répandue au Canada (Tizard *et al.*, 1977; Tizard *et al.*, 1978). Compte tenu de l'augmentation du nombre de chats vivant à l'état sauvage au Canada et de la persistance des oocystes sporulés dans divers types de milieux (Dubey et Beattie, 1988), on peut s'attendre à ce que la superficie des régions propices à la survie des oocystes au Canada s'accroisse par suite du réchauffement planétaire. Cette éventualité laisse présager des problèmes importants.

Leptospirose

Des cas de leptospirose ont été détectés dans diverses régions du Canada chez plusieurs espèces de mammifères sauvages (Kingscote, 1986), ainsi que chez des chevaux (Kitson-Piggot et Prescott, 1987), des chiens (Prescott *et al.*, 1991), des bovins (Kingscote et Proulx, 1986; Kingscote et Wilson, 1986; Prescott *et al*., 1987; Kingscote, 1988; Prescott *et al*., 1988), des porcs (Baker *et al.*, 1989) et des humains (Rivest *et al.*, 1989; Prescott *et al.*, 1992). En cas d'allongement de la saison chaude, la probabilité de contamination des eaux de surface par l'urine des animaux infectés risque d'augmenter (Acha et Szyfres, 1987).

Toxines synthétisées par les fruits de mer

Parmi les maladies d'origine marine, le choléra est sans contredit la plus importante à l'échelle planétaire (Huq et Colwell, 1996). Néanmoins, les toxines produites par les fruits de mer représentent une source de préoccupation de plus en plus importante au Canada, en particulier en raison de l'intérêt accru des consommateurs à l'égard des fruits de mer (Statistique Canada, 1996a et b). Ewen Todd, de Santé Canada, a étudié l'émergence des intoxications causées par les fruits de mer au Canada (1993) et à l'échelle mondiale (1994). Plusieurs auteurs ont tenté d'établir un lien entre diverses perturbations environnementales, dont le réchauffement planétaire, et l'émergence de nouvelles formes d'intoxication causées par les fruits de mer et les changements des formes déjà décrites (Tester, 1994; Todd, 1994; Epstein et Rapport, 1996).

Qualité de l'eau

L'altération de la qualité de l'eau induite par le réchauffement planétaire risque de causer une augmentation de l'incidence des maladies infectieuses - particulièrement les affections parasitaires, mais aussi les infections bactériennes. Bien qu'on n'ait jamais établi de relation directe entre les numérations bactériennes et la santé des nageurs, toute augmentation du taux de survie des bactéries dans les eaux chaudes contaminées ne présage rien de bon (Seyfried *et al.*, 1985).

Quantité des approvisionnements en eau

Les différents scénarios de réchauffement planétaire prévoient que les principales répercussions au Canada de la hausse du niveau de la mer seront ressenties dans les centres à forte densité de population situés sur les côtes des provinces de l'Atlantique et de la Colombie-Britannique. Le long des côtes, de nombreux grands immeubles et établissements ont été érigés à seulement quelques pieds au-dessus du niveau de la mer. La basse ville de Vancouver et les municipalités établies dans le delta du Fraser subissent déjà des inondations à l'occasion. Avec une élévation du niveau de la mer d'un mètre, la toute nouvelle façade portuaire de Charlottetown, sur la côte de l'Atlantique, serait submergée à marée haute, et les fortes marées de tempête, qui se produisent environ une fois tous les vingt ans, pourraient inonder une bonne part des quartiers résidentiels et des secteurs commerciaux du centre-ville. À Saint-Jean, au Nouveau-Brunswick, les routes et les voies ferrées, les réseaux d'égout et les immeubles du centre-ville seraient fréquemment inondés (Hengeveld, 1996). Parmi les nombreuses conséquences éventuelles d'une élévation du niveau de la mer, il convient de mentionner l'intrusion d'eau salée dans les réserves d'eau souterraine, l'inondation des réseaux d'aqueduc provoquée par l'élévation de la nappe phréatique, avec tous les risques de contamination par des produits chimiques ou des organismes pathogènes qu'une telle éventualité comporte, et l'inondation des usines d'épuration de l'eau par les eaux réceptrices contaminées (Grant, 1991).

Selon ces mêmes scénarios, le niveau d'eau des Grands Lacs devrait chuter d'au moins 0,5 à 1 m, et le débit du Saint-Laurent pourrait diminuer de 20 %. De très fortes baisses des niveaux d'eau, comme celles observées en 1963-1965, pourraient se produire quatre années sur cinq. Toutes ces perturbations pourraient entraîner une altération de la qualité de l'eau (Duncan, 1997).

Enfin, l'augmentation de la variabilité du régime de précipitations et le déplacement dans le temps des épisodes de ruissellement (tel que prévu dans l'ouest et le centre du Canada; voir Burn, 1994) devraient entraîner l'évacuation forcée d'un plus grand nombre de résidents de communautés riveraines.

Intoxications alimentaires (salmonellose, campylobactériose, yersiniose et diverses intoxications déterminées par des souches vérotoxigènes du *Escherichia coli*)

Les interactions socio-économiques et écologiques ont entraîné une augmentation des cas signalés d'intoxication alimentaire. Ces interactions complexes ont été analysées par Waltner-Toews (1996). Au Royaume-Uni, des chercheurs ont examiné les effets du réchauffement planétaire en se fondant sur les cas signalés d'intoxication alimentaire et les hausses de température observées au cours des années 80 (Bentham et Langford, 1995). Ces chercheurs prévoient une hausse de plus de 10 % de l'incidence des intoxications alimentaires au Royaume-Uni d'ici 2030. Les impacts les plus importants des températures ambiantes élevées sur les circuits alimentaires du Royaume-Uni s'observent avant que les aliments parviennent aux consommateurs. Aucune étude de ce type n'a été réalisée au Canada.

Santé nutritionnelle

L'allongement de la saison estivale et l'adoucissement des températures hivernales devraient être bien accueillis par les agriculteurs canadiens (Wittwer, 1990), mais ces nouvelles conditions risquent fort d'influer sur la répartition spatio-temporelle des ravageurs qui s'attaquent aux cultures canadiennes (Jahn *et al.*, 1996). L'effet de serre sur les lipides des grains de blé (Williams *et al.*, 1994) influera sur les valeurs meunière et boulangère du blé. Tout effet sur la nutrition résultant de l'action des facteurs ci-dessus sur les cultures sera déterminé par des changements de revenu des principaux intéressés plutôt que par des mécanismes directs.

Comme les Canadiens, de plus en plus préoccupés par leur santé, consomment des quantités de plus en plus importantes de fruits, de légumes et de poissons frais importés (Statistique Canada, 1996a et b), les effets du réchauffement planétaire sur l'alimentation des Canadiens devraient influer sur l'accessibilité des aliments importés (p. ex., effets de conditions météorologiques imprévisibles sur les cultures d'agrumes aux États-Unis).

Comme l'auteur de la présente analyse le soulignait il y a environ cinq ans, les denrées alimentaires importées risquent d'être mises en cause dans l'augmentation de la fréquence des épidémies de certaines maladies virales, parasitaires et bactériennes (p. ex., hépatite A). Cette situation tient moins aux conditions climatiques qu'à l'impression naïve que les commerçants de denrées alimentaires peuvent se soustraire aux règlements en vigueur s'appliquant à l'environnement, à la santé publique et au travail dans les pays exportateurs.

Troubles respiratoires

Le réchauffement planétaire pourrait avoir une incidence sur l'apparition saisonnière de certains troubles respiratoires (Emberlin, 1994). L'augmentation de la température de l'air pourrait

entraîner une aggravation de la pollution atmosphérique dans les secteurs urbains et ruraux et, dès lors, des troubles respiratoires (Shumway *et al.*, 1988; Schwartz et Dockery, 1992a et b; Dockery *et al.*, 1993; Katsouyanni *et al.*, 1993; Pope *et al.*, 1995; Phelps, 1996).

Au Canada, la présence de substances allergènes dans l'air peut déclencher des crises d'asthme et de fièvre des foins; ces deux troubles respiratoires sont très fréquents en certaines saisons. En cas de réchauffement, la gravité de ces allergies pourrait augmenter, étant donné le rôle de la chaleur et de l'humidité dans l'étiologie de ces troubles respiratoires (Environnement Canada, 1995b).

Deux observations tirées d'études empiriques méritent d'être signalées. Premièrement, un lien très étroit a été relevé dans le sud de l'Ontario entre le nombre d'hospitalisations pour cause de troubles respiratoires, d'une part, et les concentrations de $SO_2$, d'$O_3$ et la température en juillet et en août, d'autre part (Association canadienne de santé publique, 1992).

Deuxièmement, en cas de doublement des concentrations de $CO_2$ atmosphérique, le nombre de jours par année durant lesquels la température dépasse 30 ºC pourrait passer de 10 à presque 50. On pourrait alors assister à une augmentation du nombre de jours ponctués par des épisodes de smog en Ontario. Les concentrations de smog atteignent leur valeur maximale durant les journées chaudes et ensoleillées, lorsque les $NO_x$ et les COV réagissent avec les rayons solaires. Toute augmentation du nombre de jours de smog risque de se traduire par un accroissement du nombre d'admissions hospitalières (Environnement Canada, 1995b).

Migration

Le réchauffement planétaire laisse présager une augmentation du nombre de réfugiés de l'environnement, avec tout ce que cette éventualité comporte comme risque d'introduction d'agents pathogènes dans des environnements devenus plus hospitaliers. À l'intérieur même du Canada, la survenue de crues soudaines, l'inondation des basses régions côtières et la contamination des réserves d'eau potable pourraient forcer de nombreuses personnes à quitter leur communauté pour aller s'établir ailleurs.

Infrastructure de santé publique

À l'heure actuelle, l'infrastructure de santé publique n'est pas suffisamment bien organisée pour composer avec les relations complexes entre les politiques fiscales, énergétiques, agricoles ou liées au transport, l'incidence de ces politiques sur le climat et, en fin de compte, les impacts du changement climatique sur la santé.

## IMPACTS DU RAYONNEMENT UV SUR LA SANTÉ

### *Introduction*

On associe l'exposition au rayonnement solaire ultraviolet à un certain nombre d'effets pathogènes chez l'être humain : certains sont bien connus, d'autres doivent être étudiés davantage (le rayonnement UV, le comportement des personnes et les prédispositions). Le lien entre le

rayonnement UV et la santé humaine importe à plus d'un titre : il suffit de penser à l'universalité de l'exposition des personnes, aux possibilités de se prémunir contre ces effets et à l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, à l'origine de l'intensification du rayonnement UV.

Le spectre électromagnétique du rayonnement UV est divisé en un certain nombre de plages de longueurs d'onde croissantes, soient les UVA, les UVB et les UVC, dans l'ordre. Les UVC sont complètement absorbés par la couche d'ozone. Malgré leur absorption partielle dans cette couche atmosphérique, les UVB atteignent la surface terrestre; ils ont le pouvoir d'endommager l'ADN cellulaire. Il est bien établi que ce type de rayonnement est à l'origine des coups de soleil, et on l'a mis en cause dans de nombreux autres effets pathogènes attribuables aux UV. En s'exposant aux UVA, on risque moins de souffrir d'érythèmes et de brûlures, mais les chercheurs tournent leur attention vers la relation existant entre cette plage de longueurs d'onde et des effets possibles sur la santé.

Dans de nombreuses études épidémiologiques et en laboratoire, lorsqu'ils se sont penchés sur les effets pathogènes associés aux UV, les chercheurs ont examiné le lien entre les profils de comportement, les facteurs endogènes et l'exposition aux UV. On attribue à ce dernier des cancers de la peau, des cataractes lenticulaires et des effets sur le système immunitaire.

***Cancer de la peau***

Il existe trois types de cancer de la peau, les mélanomes, les épithéliomas basocellulaires (un cancer de la peau avec mélanome bénin) et les épithéliomas malpighiens spinocellulaires (un cancer de la peau avec mélanome bénin).

Mélanomes

L'incidence des mélanomes est en hausse marquée depuis quelques décennies (Elwood, 1992; Goldstein et Tucker, 1993; Balzi *et al.*, 1997). De récentes analyses des tendances, sur le territoire de la Communauté européenne, ont mis en évidence une augmentation de la mortalité par mélanome chez les hommes comme chez les femmes; elles ont montré l'existence de tendances statistiquement significatives dans tous les groupes d'âge (Balzi *et al.*, 1997). Même si, dans l'ensemble, les mélanomes sont moins fréquents que les cancers de la peau avec mélanome bénin, ils sont souvent plus envahissants; ils sont à l'origine d'un taux de mortalité supérieur. Il existe de nombreuses études examinant la relation entre l'exposition aux UV et le risque de souffrir d'un mélanome; on a découvert que cette relation est complexe.

Facteurs génétiques/sensibilité cutanée

Holman *et al.* (1986) ont réalisé l'étude intitulée *West Australian Lions Melanoma Research Project*, l'une des premières études démographiques cas-témoins, et ils ont examiné les risques de mélanome au regard de différents traits innés. Ils ont constaté que les personnes peu susceptibles de bronzer et ayant une constitution pigmentaire qui les protège mal contre le soleil souffrent plus souvent que les autres de mélanomes. Cette constatation pointe vers une relation de cause à effet

entre le rayonnement solaire et l'apparition de mélanomes. Dans le cadre de leur étude cas-témoins sur les mélanomes dans l'ouest du Canada, Gallagher *et al.* (1986) ont mis en évidence une forte corrélation entre la pigmentation, l'origine ethnique et la réaction de la peau au soleil, et le risque d'être atteint d'un mélanome. Lorsque le facteur constitué par la réaction de la peau au soleil était contrôlé, les chercheurs ont constaté que les antécédents décrivant les habitudes d'exposition au soleil et décrivant les cas de brûlure par le soleil constituaient des facteurs moins importants du risque de souffrir d'un mélanome. L'étude cas-témoins de White *et al.* (1994) confirme les résultats d'études antérieures indiquant que la sensibilité au soleil constituait le facteur génétique le plus étroitement associé au risque d'être atteint d'un mélanome, que ce facteur soit mesuré en fonction d'une réaction à une exposition chronique ou à une exposition aiguë au soleil.

Exposition au début de l'âge adulte

Osterlind *et al.* (1988) ont effectué une étude démographique cas-témoins dans l'est du Danemark: Étude démographique danoise du mélanome malin cutané. Ils ont trouvé que le risque de mélanome s'élevait significativement chez les personnes qui avaient souffert de brûlures graves avant d'avoir atteint 15 ans. Ces chercheurs ont aussi constaté que, chez les personnes âgées de 15 à 20 ans et ayant subi des brûlures par exposition au soleil, avec la formation de phlyctènes, à au moins cinq occasions, le risque d'être atteint d'un mélanome était accru, indépendamment des facteurs génétiques prédisposants. Dans une récente étude démographique portant sur des femmes de la région de la baie de San Francisco, Holly *et al.* (1995) ont eux aussi constaté une forte corrélation entre les mélanomes et le fait d'avoir souffert de graves brûlures par exposition au soleil avant l'âge de 12 ans. On associe le doublement du risque au fait d'avoir subi de multiples brûlures causées par le soleil entre l'entrée à l'école primaire et l'âge de 30 ans, ou d'avoir subi des brûlures causées par le soleil avec la formation de phlyctènes au cours des dix années précédant le diagnostic de mélanome. Weinstock *et al.* (1989) ont également étudié la relation entre le moment où s'est produite une exposition au soleil avec effets graves et l'incidence des mélanomes; ils ont constaté que les brûlures causées par le soleil avec la formation de phlyctènes, entre 15 et 20 ans, étaient associées à un risque accru de mélanome, même lorsque les antécédents de coups de soleil passé 30 ans étaient contrôlés (White *et al.*, 1994). La récente étude démographique de Washington, réalisée par ces derniers, a révélé que, chez les personnes prenant des bains de soleil, l'acquisition d'un bronzage léger ou prononcé, par suite d'une exposition chronique au soleil, semblait conférer une certaine protection jusqu'à l'arrivée de la vingtaine. Toutefois, ceux qui bronzent mal ne sont pas protégés. Ces chercheurs parviennent à la conclusion que le nombre de brûlures causées par le soleil au cours de l'enfance n'est peut-être pas un facteur de risque en soi, mais qu'il peut indiquer un manque de protection contre le soleil au cours de l'enfance.

Exposition cumulée professionnelle

Dans leur revue du milieu des années 80, Austin et Reynolds (1986), qui se sont penchés sur la question des mélanomes au regard de l'exposition cumulée professionnelle, ont signalé que de nombreuses études avaient établi un lien entre ces deux éléments; cependant, dans leur étude démographique sur le mélanome malin cutané, Osterlind *et al.* (1988) signalent que l'exposition

professionnelle est associée à un risque moindre de mélanome. Graham *et al.* (1985) ont indiqué que le risque de mélanome est moins élevé chez les personnes dont l'exposition pour l'ensemble de la durée de vie est la plus élevée. Ces chercheurs avaient émis l'hypothèse que cela pouvait être attribuable au fait que les personnes les plus vulnérables évitent de s'exposer au soleil (Austin et Reynolds, 1986). Il est difficile de documenter avec exactitude l'exposition totale au soleil au cours de la durée de vie, chez l'adulte, afin de déterminer le lien réel entre l'exposition cumulée et les cas de mélanome, parce que les gens ont de la difficulté à se remémorer leur passé lointain.

Exposition par intermittence

D'Arcy *et al*. (1986) sont les premiers à avoir formulé l'hypothèse qu'il existe un lien entre les mélanomes et des épisodes sporadiques d'intense exposition au soleil à des fins récréatives au cours d'une époque de la vie, tôt à l'âge adulte, où les personnes sont sensibles. Green *et al*. (1986) ont analysé les facteurs de risque dans le Queensland, en Australie; ils ont constaté que l'exposition cumulée au rayonnement solaire ultraviolet est associée à l'apparition des mélanomes. Toutefois, l'association mise en évidence comportait deux profils d'exposition : exposition cumulée et épisodes répétés d'exposition intense pendant de courtes durées. Nelemans *et al*. (1993) ont observé que les travailleurs occupant un emploi à l'intérieur et les personnes sensibles au soleil qui prenaient du soleil, pratiquaient des sports aquatiques et passaient leurs vacances dans des pays ensoleillés, toutes activités associées à l'exposition par intermittence, risquaient davantage de souffrir d'un mélanome.

Il semble donc que la tendance à souffrir de brûlures au soleil plutôt qu'à bronzer et l'exposition intermittente et par poussées à des époques de la vie où les personnes sont particulièrement vulnérables constituent d'importants facteurs de risque de souffrir d'un mélanome. En fait, des antécédents de brûlures au soleil peuvent constituer un marqueur du facteur de risque qu'est la sensibilité au soleil. Le bronzage peut conférer une protection dans le cas des personnes qui ne sont pas du tout sensibles au soleil.

Cancers avec mélanome bénin

Les cancers de la peau avec mélanome bénin, soit les épithéliomas basocellulaires et les épithéliomas malpighiens spinocellulaires, sont, de tous, les cancers le plus souvent diagnostiqués. Depuis quelques décennies, ils sont observés de plus en plus fréquemment (Gallagher, 1992; Kricker *et al.*, 1994; Marks, 1996). Entre 1973 et 1987, la fréquence de ces deux types de cancer avec mélanome bénin s'est accrue de 60 % en Colombie-Britannique (Gallagher, 1992). De ces deux types, l'épithélioma basocellulaire est le plus commun, mais l'épithélioma malpighien spinocellulaire tend davantage à être agressif.

Les cancers de la peau avec mélanome bénin apparaissent le plus souvent sur les parties du corps - tête, cou, bras et mains - fréquemment exposées au soleil. Au cours des dernières décennies, les épithéliomas basocellulaires et les épithéliomas malpighiens spinocellulaires de la tête et du cou sont devenus plus fréquents (Gallagher, 1992). Parmi les autres indices liant ces cancers au rayonnement ultraviolet, il faut compter le fait que l'incidence des cancers de la peau avec mélanome bénin est plus élevée dans les pays proches de l'équateur (Kricker *et al.*, 1994). Les

personnes migrant dans les pays où on observe une fréquence élevée de mélanome sont, toutes proportions gardées, moins souvent atteintes que les populations autochtones pourvu qu'elles aient migré après l'âge de 10 ans (Gallagher, 1992).

De récentes études ont soit confirmé, soit mis en doute la relation entre l'exposition cumulée au soleil et le risque de souffrir d'un cancer de la peau avec mélanome bénin. L'étude de South Wales sur la kératose solaire et le cancer de la peau avec mélanome bénin a considéré plusieurs facteurs associés à ce type de cancer et constaté qu'en Australie, les facteurs de risque correspondent à ceux observés dans le cadre d'autres études réalisées dans des pays plus ensoleillés - l'exposition cumulée au soleil et les facteurs héréditaires sont associés, indépendamment, aux formes répandues de cancer de la peau avec mélanome bénin (Harvey *et al.*, 1996). Toutefois, dans une étude démographique cas-témoins qui s'est déroulée en Alberta, Gallagher *et al.* (1995b) ont aussi examiné le rapport entre, d'une part, le moment de l'exposition au soleil et le caractère de celle-ci et, d'autre part, le risque de contracter un épithélioma malpighien spinocellulaire, tout en contrôlant le facteur phénotypique et le facteur pigmentaire. Une fois ces variables génétiques prises en compte dans les analyses, on ne voyait apparaître aucune association entre les épithéliomas malpighiens spinocellulaires et l'exposition cumulée pendant toute la durée de la vie. Cependant, il ressortait une forte tendance à la hausse du risque de ce type de cancer avec l'exposition chronique au soleil au cours des dix années précédant le diagnostic.

Gallagher *et al.* (1995a) ont observé que l'exposition par intermittence au rayonnement solaire, particulièrement au cours de l'enfance, influe sur le développement des cancers de la peau avec mélanome bénin, particulièrement des épithéliomas basocellulaires. On a observé que la couleur de la peau, le rousselage pendant l'enfance et des antécédents de coups de soleil graves dans l'enfance correspondent à un risque accru de souffrir d'un épithélioma basocellulaire. Même si aucun lien n'est ressorti entre la moyenne annuelle d'exposition cumulée estivale au soleil et le risque d'être atteint d'un épithélioma basocellulaire, les personnes qui ont été davantage exposées au soleil, dans un cadre récréatif, avant d'avoir atteint 19 ans, sont davantage à risque. Ce lien entre l'exposition par intermittence au soleil et ce type de cancer est le plus prononcé chez les personnes sensibles au soleil qui tendent à souffrir de brûlures au soleil, plutôt qu'à bronzer.

***Yeux***

Bon nombre d'études épidémiologiques ont considéré la question d'un accroissement possible du risque de cataracte avec l'exposition chronique à long terme aux UV solaires (Brilliant *et al.*, 1983; Taylor *et al.*, 1988; Italian-American Cataract Study Group, 1991). Une étude de Brilliant *et al.* remontant à 1983 examinait le rapport entre la cataracte et l'exposition au rayonnement solaire (en heures) à l'intérieur d'un vaste échantillon aléatoire de population au Népal. Ces chercheurs ont trouvé une corrélation positive entre la fréquence des cataractes et les heures d'ensoleillement. Dans les sites recevant une moyenne de 12 heures de soleil, on dénombrait quatre fois plus de cas de cataractes que dans un secteur où l'ensoleillement atteignait seulement 7 heures. Une étude italienne cas-témoins des facteurs liés au risque de cataracte a également fait ressortir une relation entre les UV et la cataracte, mais cette relation ne se vérifiait pas pour tous les types de cataracte. Il s'agissait d'une étude clinique cas-témoins qui s'est déroulée à Parme.

Les personnes qui travaillent au soleil et celles qui y passent une bonne partie de leur temps de loisir risquent davantage d'être atteintes de cataracte corticale et mixte, mais non pas de cataracte nucléaire (Italian-American Cataract Study Group, 1991). Le fait de porter un chapeau l'été est associé à un risque accru de souffrir d'une cataracte sous-capsulaire, corticale ou mixte; le type de chapeau porté n'offrait pas de protection adéquate contre les UV et les auteurs de l'étude sont parvenus à la conclusion que le fait de porter un chapeau constituait en réalité un marqueur de l'exposition, mais non pas de la protection.

Une étude de Taylor *et al.* (1988) a examiné la relation entre l'exposition professionnelle aux UV et la cataracte en étudiant le cas de 838 gens de mer travaillant dans la baie de Chesapeake. Les chercheurs ont calculé l'exposition oculaire annulaire de chacun d'eux à partir de 16 ans, en combinant les antécédents professionnels détaillés à des mesures au laboratoire et sur le terrain de l'exposition au soleil. Les chercheurs ont constaté que les personnes parvenant à des niveaux cumulatifs élevés d'exposition au rayonnement ultraviolet B étaient celles qui risquaient le plus de souffrir de cataracte corticale. Ces chercheurs ont en outre mis en évidence un effet de dose en ce qui concerne les risques de souffrir d'un mélanome.

Dans leur étude cas-témoins de 1989, Dolezal *et al.* n'ont observé aucun lien entre l'exposition cumulée au soleil et le risque de souffrir d'une cataracte. Toutefois, à comparer à des témoins du même âge et du même sexe, les personnes ayant une cataracte nucléaire ont signalé avoir des réactions cutanées aiguës au soleil plus intenses la première fois qu'elles y sont exposées à l'été. Cette constatation laisse supposer que la sensibilité au soleil peut influer sur la formation de cataractes. En outre, l'analyse de Dolezal *et al.* (1989) a montré qu'il existe un rapport entre la durée moyenne, la vie durant, du port d'un couvre-tête en été, qui sert donc à protéger les yeux, et un risque moindre de souffrir de cataractes.

### *Système immunitaire*

On considère que la peau est la première ligne de défense du système immunitaire. Or, on suspecte que la partie non ionisante du spectre de l'ultraviolet altère cette fonction de la peau. La preuve que le rayonnement ultraviolet exerce des effets sur le système immunitaire, et subséquemment sur la carcinogenèse, le développement des maladies infectieuses et les réactions auto-immunes, demeure incomplète, mais on dispose de résultats préliminaires.

#### Immunosuppression et carcinogenèse

Des chercheurs ont constaté que des masses cancéreuses dont la formation était induite par les UV étaient rapidement détruites après avoir été transplantées sur des sujets (souris) génétiquement similaires (McKenzie et Sauder, 1994). Cependant, lorsque les chercheurs irradiaient l'hôte avant de pratiquer la greffe de la tumeur cancéreuse, il arrivait que celle-ci poursuive son développement chez cet hôte. Ce phénomène porte à croire que les UV peuvent supprimer la réaction de rejet chez l'animal à qui on greffe une tumeur cancéreuse de la peau. Parallèlement au fait que les greffés recevant un traitement immunosuppresseur courent un risque beaucoup plus élevé de souffrir d'un cancer de la peau que la population normale, cette découverte a conduit à suggérer une participation du système immunitaire dans le développement

des cancers de la peau (Bouwes Bavinck *et al.*, 1996). Ces derniers (1996) ont effectué une étude rétrospective de longue durée concernant 1 098 greffés du rein, au Queensland, en Australie, afin d'évaluer leur risque d'être atteint d'un cancer de la peau. Ils ont constaté que la fréquence cumulée d'apparition de ce type de cancer passait de 7 % après un an d'immunosuppression à 45 % après onze ans et à 70 % après vingt ans. Ces chiffres ont fait conclure aux chercheurs que le risque de cancer de la peau était plus élevé que la normale tant que les greffés recevaient un traitement immunosuppresseur.

Suppression de la sensibilisation par contact

L'irradiation de la peau par les UV peut perturber la réponse immunitaire au niveau de ce tissu et être à l'origine d'une suppression locale ou systémique (McKenzie *et al., 19*94). La sensibilité de contact allergène est l'une des réactions immunitaires les plus étudiées. On a procédé à des expériences sur des animaux en leur appliquant des substances allergènes afin de provoquer chez eux la sensibilité aux produits chimiques. Les animaux irradiés par les UV qui étaient testés ne manifestaient pas de réaction. On a considéré que cela était attribuable à l'effet des UV sur les cellules de Langerhans, les cellules présentatrices de l'antigène les plus efficaces de la peau. Celles-ci stimulent les lymphocytes T, une autre classe de cellules qui participent à la défense immunitaire.

Alcalay *et al.* (1989) ont étudié le nombre et la morphologie des cellules de Langerhans dans la partie épidermique d'épithéliomas malpighiens spinocellulaires exposés au soleil chez dix patients, et ils ont comparé leurs observations à celles pratiquées sur des spécimens de peau non tumorale prélevés sur des parties du corps exposées ou non au soleil. Chez un patient atteint d'un cancer de la peau, ils ont observé un nombre normal de cellules de Langerhans, mais d'une morphologie profondément transformée; chez six autres, ils ont observé un nombre réduit de ces cellules en plus de changements morphologiques. Dans aucun cas il n'y avait davantage de ces cellules. Les chercheurs sont parvenus à la conclusion qu'une réduction du nombre et une altération de la morphologie de ces cellules s'observent chez certains patients atteints d'épithéliomas malpighiens spinocellulaires, mais non pas chez tous. De mêmes personnes comptaient autant de cellules de Langerhans dans les spécimens de la peau non cancéreuse exposés au soleil ou non.

Maladies infectieuses et maladies auto-immunes

Comme on croit que le rayonnement affecte les défenses immunitaires de la peau et puisque celle-ci est la première défense de l'organisme contre les agents extérieurs, on a formulé l'hypothèse que l'exposition aux UV peut nuire à la capacité systémique ou locale de défense de l'hôte contre des agents infectieux. À ce jour, aucune donnée épidémiologique ne le confirme. Morison (1989) a trouvé des rapports faisant état de la sensibilité à différentes mycoses et infections bactériennes chez des souris qui avaient été exposées aux UV.

En outre, on considère depuis longtemps que les patients souffrant de certaines maladies auto-immunes comme le lupus érythémateux disséminé sont sensibles à la lumière et que leur exposition à la lumière du soleil peut induire ou aggraver des maladies cutanées ou systémiques. Le mécanisme en jeu est mal connu, mais on pense à une interaction entre le rayonnement et le

système immunitaire. Des résultats obtenus en laboratoire, montrant l'effet des UV sur la suppression de la réponse immunitaire normale chez des animaux d'expérience, viennent renforcer cette théorie. Un complément d'information est nécessaire dans ces importants domaines.

## IMPACTS SUR LA SANTÉ DES SUBSTANCES TOXIQUES ATMOSPHÉRIQUES

On se préoccupe de plus en plus des répercussions sur la santé de l'exposition à des composés toxiques trouvés à l'état de traces dans l'air ambiant, ainsi que de l'apport de ces composés à la charge corporelle de substances toxiques en provenance de multiples voies d'exposition (aliments, sol/poussière, eau potable, air des locaux et cadre professionnel, par exemple) (City of Toronto, Department of Public Health, 1993).

Dans l'air de Toronto, on trouve notamment, comme composés toxiques à l'état de traces, le benzène, le chrome, le nickel, le 1,3-butadiène, le 1,1,2,2-tétrachloroéthane, le 1,2-dichloroéthane, le dichlorométhane, le trichloroéthène et le 1,1,2-trichloroéthane, le formaldéhyde, le manganèse et des HAP. Ces carcinogènes ont été décelés à plusieurs stations d'échantillonnage; ils atteignaient des concentrations auxquelles le risque de cancer associé à l'exposition pour toute la durée de la vie à celles-ci se chiffre à un sur un million (Carey, 1987; Chan *et al.*, 1991; Campbell *et al.*, 1995). À Toronto, les incinérateurs, les entreprises publiques de production de l'électricité et des entreprises commerciales comme les opérations de nettoyage à sec, les imprimeries et les stations-service, constituent d'autres sources importantes de toxiques dans l'air (City of Toronto, Department of Public Health, 1993).

En s'appuyant sur les désignations du Centre international de la recherche sur le cancer et de l'U.S. EPA, Campbell *et al.* (1995) ont constaté, dans le cadre d'une étude, que 31 des 160 composés détectés dans l'atmosphère torontoise sont des substances cancérigènes reconnues comme telles chez l'humain ou soupçonnées de l'être. Quatre substances (benzène, nickel, strontium et chrome(VI)) sont des substances ayant un effet cancérigène chez l'humain; vingt-sept autres sont soupçonnées de l'être puisque ce pouvoir a été établi sur des animaux d'expérience (Campbell *et al.*, 1995).

### *Monoxyde de carbone (CO)*

À des concentrations élevées, le monoxyde de carbone peut constituer une menace aiguë pour la santé puisque, lorsqu'il est inhalé, il se fixe dans les globules rouges qui ne peuvent plus assurer le transport de l'oxygène. Il peut causer la mort à une concentration aussi faible que 0,1 %; à des concentrations moins élevées, mais mesurées couramment dans les grands axes routiers des villes aux heures de pointe, il peut altérer les perceptions et ralentir les réflexes. En outre, il contribue indirectement à l'effet de serre, car il entrave la décomposition naturelle du méthane, un GES (Environmental Protection, Province of British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks, 1995).

Même si l'exposition professionnelle intense aux gaz d'échappement (particulièrement ceux produits par la combustion du carburant diesel) et au benzène accroît le risque d'être atteint de

certaines formes de cancer, il demeure qu'il n'existe pas de preuve directe fiable d'un risque accru de cancer, dans l'ensemble de la population, aux faibles niveaux auxquels elle est exposée.

Informée par les travaux de la Commission mixte internationale, qui a fait figure de pionnière, la communauté scientifique est aujourd'hui beaucoup plus sensible à l'existence d'autres classes de contaminants atmosphériques transportés régionalement et dispersés planétairement; on pense, par exemple, aux polluants organiques persistants (POP), qui comprennent notamment de nombreux pesticides, des BPC, des dioxines et autres. Ces POP sont d'un intérêt particulier au Canada puisqu'ils tendent à s'accumuler dans le Nord et à se concentrer à cause des conditions particulières de la vie dans l'Arctique. Nous commençons à peine à percer ce problème (Guidotti, 1996).

La contribution des retombées de composés synthétiques à la pollution de l'eau est étonnamment importante : la majeure partie des BPC et d'autres substances toxiques trouvés dans les Grands Lacs ainsi qu'une part considérable des hydrocarbures trouvés en mer y sont parvenus par dépôt atmosphérique (Nadakavukaren, 1995).
Au cours des dernières années, des inquiétudes relatives à la contamination progressive des aliments d'origine locale par des biphényles polychlorés (BPC) ont mis un frein au mouvement prônant le retour aux régimes alimentaires traditionnels (Shephard et McMillan, 1996).

Le monoxyde de carbone est produit principalement par la combustion imparfaite des combustibles fossiles, comme dans les moteurs d'automobiles et autres véhicules alimentés à l'essence, par les grils à charbon de bois ou les chaudières à l'huile. Il est inodore et incolore, et, puisqu'il est légèrement plus lourd que l'air, il se concentre dans les espaces confinés; il affecte les personnes sans qu'elles puissent s'en rendre compte. À mesure que la concentration du CO s'élève, la concentration sanguine de l'oxygène s'abaisse; les molécules d'oxygène sont littéralement délogées par les molécules de CO, qui se fixent plus solidement que l'oxygène à l'hémoglobine. L'exposition au monoxyde de carbone à des concentrations élevées pendant de courtes périodes est aussi dommageable que l'exposition à de faibles concentrations pendant de longues périodes. La concentration sanguine normale de ce composé est de 1 %. Elle peut s'élever dans le cas des fumeurs et, chez une personne faisant de l'exercice au milieu d'un intense trafic de l'heure de pointe, elle pourrait atteindre 3 ou 4 %. Les personnes éprouvant des problèmes cardiaques et pulmonaires sont les personnes le plus à risque. À de faibles concentrations, les symptômes de l'exposition au monoxyde de carbone sont un état de fatigue, des maux de tête et des étourdissements; des concentrations plus élevées provoquent des troubles de la vision, une perte de coordination, des nausées et, ultimement, le décès.

***Composés organiques volatils (COV)***

Les composés organiques volatils comprennent notamment le benzène, le chloroforme, le méthanol, le tétrachlorure de carbone et le formaldéhyde; il en existe des centaines d'autres. L'essence est un mélange d'un grand nombre de ces composés. Depuis 20 ans, on a dénombré 261 COV dans l'atmosphère. La majorité est trouvée dans l'environnement à de très faibles concentrations, mais certains de ces composés sont très réactifs. Comme les composés azotés, ils exercent des effets indirects (contribuant, par exemple, à la production d'ozone) ainsi que des

effets directs sur la physiologie humaine. Ils émanent de produits utilisés au foyer, comme les produits de peinture, et ils proviennent des opérations de nettoyage à sec, des raffineries, des stations-service et de beaucoup d'autres sources. Ils peuvent irriter les voies respiratoires (intensification des rhinites allant jusqu'à l'asthme), causer des maux de tête et d'autres malaises non spécifiés. À des concentrations élevées, ils sont très toxiques, de façon variable selon les composés, mais ils ont tous des effets neurologiques. La toxicité directe attribuable aux COV est principalement un problème de pollution de l'air dans les locaux et un danger professionnel, puisque la concentration à l'intérieur des locaux ou au travail peut être plusieurs fois supérieure à ce qu'elle est à l'extérieur.

### *Biphényles polychlorés (BPC)*

Après l'avoir atteint, les BPC persistent pendant des décennies dans l'environnement puisqu'ils résistent à la dégradation. La contamination des organismes vivants par les BPC s'opère généralement par la remontrée du réseau trophique et la concentration progressive de ces composés dans les niveaux supérieurs (bioamplification). Les BPC s'accumulent dans les tissus adipeux du foie, des reins, du cœur, des poumons et du cerveau, ainsi que dans le lait maternel; la concentration s'élève avec le temps (la bioaccumulation) (Nadakavukaren, 1995). Shephard et McMillan (1996) ont trouvé des quantités appréciables de BPC dans les aliments traditionnels des Inuits de l'île de Baffin.

On a effectué une analyse des avantages et des risques de la consommation d'aliments autochtones traditionnels chez les Dénés et les Métis du Sahtu à Fort Good Hope (T.N.-O.), incluant l'analyse des risques issus de la contamination des ressources en eau. Les biphényles polychlorés constituent une source majeure de préoccupation dans cette collectivité. Le gouvernement du Canada a fixé la limite maximale de résidus de BPC à 2 000 ng/g dans la chair de poisson frais, et à 200 ng/g dans la viande des oiseaux et des mammifères. Le caribou cuit est le seul aliment des Dénés dont la teneur en BPC dépasse les normes actuellement en vigueur. L'étude a montré que la grande majorité des résidents dénés consommait moins de 5 % de la dose quotidienne maximale admissible de BPC telle que calculée à partir des résidus mesurés dans les aliments et compte tenu des habitudes alimentaires signalées. Les valeurs plafond publiées sont fondées sur l'hypothèse que les personnes consomment en moyenne 20 g de poisson et 48 g de viande d'autres origines seulement par jour. Mais, les populations de l'Arctique comme les Inuits et les Dénés traditionnels consommant beaucoup plus de ces viandes, il se peut que les limites établies, probablement acceptables pour les citadins d'origine caucasienne, soient trop élevées pour protéger la santé des populations autochtones. Le risque d'ingérer une dose trop forte de BPC est peut-être même supérieur dans le cas des populations côtières comme les Inuits, puisque les BPC sont bioconcentrés dans des sources d'aliments traditionnelles comme l'huile de poisson, le gras et la moelle des os de caribou, et le muktuk du narval (Shephard et McMillan, 1996).

## IMPACTS DES PRÉCIPITATIONS ACIDES SUR LA QUALITÉ DE L'AIR ET LA SANTÉ

Le sulfate est une importante composante des précipitations acides et des matières sous forme de particules. Chez ceux ayant des réactions respiratoires, il peut nuire à la santé en provoquant une

bronchoconstriction (un resserrement des voies respiratoires qui accroît la résistance au passage de l'air). Il existe d'autres fractions acides à l'origine de la pollution atmosphérique, p. ex., l'acide nitrique; cependant, ces substances et leurs effets sur la santé humaine sont peu connus.

Les aérosols acides comme le dioxyde de soufre, le sulfate et le dioxyde d'azote ont une affinité pour les colloïdes formés de particules fines, qui leur servent de vecteurs pour la pénétration en profondeur dans le poumon distal et dans les voies respiratoires. En général, on constate que le $NO_2$ et le $SO_2$ ont des effets nocifs aigus sur le système respiratoire (Campbell *et al.*, 1995).

***Effets directs de l'exposition à des composés chimiques acidogènes***

En 1953, une étude visant à déterminer les effets du $SO_2$ sur les humains a mené à la constatation que, du moins en cas d'exposition aiguë, les concentrations jusqu'à 8 ppm étaient à l'origine de changements d'ordre respiratoire proportionnels à la dose. Des études subséquentes ont montré que la bronchoconstriction était le principal effet de ce composé; cette réaction est fonction de la dose, elle est rapide et tend à atteindre son maximum au bout de 10 minutes (Folinsbee, 1992). À noter cependant que ces concentrations d'exposition sont bien supérieures à celles normalement associées à la pollution atmosphérique.

Les asthmatiques sont particulièrement vulnérables et peuvent manifester une réactivité bronchique plus intense au dioxyde de soufre que l'ensemble de la population. Ordinairement, les asthmatiques qui font de l'exercice éprouvent des symptômes à partir de 0,5 ppm (OMS, 1987). Les effets déclencheurs de crises d'asthme du sulfate, chez les enfants qui manifestent une réponse respiratoire, ont été documentés dans plusieurs études, particulièrement certaines appliquées au sud de l'Ontario. Toutefois, il existe un fort degré de confusion entre cet effet et ceux attribuables à l'ozone; sur le plan épidémiologique, il a été difficile d'opérer une distinction entre les deux.

Même si la recherche se poursuit depuis des décennies, nous ne connaissons pas tous les effets du $NO_2$. L'incidence et la gravité accrues des infections respiratoires, différents symptômes respiratoires, une perte de la fonction pulmonaire, l'aggravation de la condition clinique des asthmatiques, des maladies chroniques causant un dysfonctionnement pulmonaire obstructif ou d'autres états respiratoires chroniques figurent parmi les effets reconnus sur la santé attribuables à cette substance.

Les effets directs du $NO_2$ comprennent des infections des voies respiratoires inférieures chez les enfants et l'intensification des problèmes associés à l'asthme. Des études approfondies sur les oxydes d'azote ont montré qu'ils altèrent les défenses de l'hôte au niveau des voies respiratoires; l'incidence et la gravité des infections bactériennes virulentes subséquentes à l'exposition se trouvent accrues. Ces oxydes réduisent de façon marquée la capacité des poumons d'expulser les particules et les bactéries (OMS, 1987). En outre, le $NO_2$ provoque la bronchoconstriction et l'asthme d'une manière étroitement apparentée à celle de l'ozone, mais il est un agent déclencheur de l'asthme moins puissant que l'ozone.

Beaucoup d'études signalent les effets des précipitations acides sur la santé humaine. On en trouvera ci-après un résumé succinct.

### *Hospitalisations*

Nombre d'études (Bates et Sizto, 1987; Bates et Sizto, 1989; Thurston *et al.*, 1990; Tseng *et al.*, 1992; Burnett *et al.*, 1994; Delfino *et al.*, 1994; Schwartz, 1994) ont montré que les admissions à l'hôpital pour des maladies respiratoires s'élèvent durant les périodes contemporaines d'intense pollution atmosphérique, soit au moment où la concentration de l'ozone, des aérosols acides ou des particules dans l'air est élevée (Campbell *et al.*, 1995).

D'autres études indiquent que la pollution atmosphérique peut effectivement être à l'origine d'une hausse de la morbidité au sein de la population. Des chercheurs se sont penchés sur la relation qui existe entre la pollution atmosphérique, la température et le nombre de cas de personnes hospitalisées pour insuffisance respiratoire. Dans le cadre d'une enquête, qui s'est déroulée au cours des étés 1974 à 1984 dans le sud de l'Ontario, des chercheurs ont trouvé qu'un nombre nettement supérieur de personnes étaient hospitalisées, à cause de problèmes respiratoires, les jours où la pollution, particulièrement par le $SO_2$, était importante (Bates et Sitzo, 1989).

### *Hospitalisations et asthme*

Le dioxyde d'azote comme le dioxyde de soufre peuvent accroître la vulnérabilité aux infections respiratoires et à la constriction des voies respiratoires chez les asthmatiques. Des études effectuées à Vancouver ont montré que davantage de personnes se rendent aux services d'urgence des hôpitaux lorsque la concentration du $SO_2$ augmente. De la même manière, le nombre de personnes âgées qui se présentent pour des soins d'urgence s'élève lorsque la concentration du $NO_2$ augmente. Ces deux gaz peuvent se transformer dans l'atmosphère en de fines particules de sulfate et de nitrate ou former les précipitations acides lorsqu'ils se combinent à l'eau. Les contaminants acides peuvent nuire à la santé de façon directe lorsqu'ils sont inhalés, et de façon indirecte lorsqu'ils se déposent sur l'eau, sur le sol et sur les plantes. Des quantités élevées de particules et de précipitations acides se sont abattues sur le sud-ouest de la Colombie-Britannique ces dernières années. On s'inquiète de ce que l'entraînement des éléments à l'état de traces dans le sol, en fonction de la variation du pH, puisse conduire à leur bioaccumulation et constituer un problème sur la plan de la toxicité; toutefois, cela n'est pas établi.

### *Fonction ventilatoire*

Santé et Bien-être social Canada a réalisé deux études épidémiologiques sur les effets des polluants acides transportés dans l'atmosphère. Il y comparait la fonction ventilatoire chez des enfants vivant dans des régions assez peu polluées du Manitoba et de la Saskatchewan à celle d'enfants vivant dans le sud-ouest de l'Ontario, région où la pollution atmosphérique par des substances acides est assez élevée. En moyenne, l'efficacité de la fonction ventilatoire des Ontariens était inférieure de 2 % à celle des autres enfants. En outre, chez les Ontariens, la fréquence des rhumes, des allergies respiratoires, de l'enchifrènement et des toux accompagnées de mucosités était plus élevée (Environnement Canada, 1990). De semblables études américaines confirment nettement la constatation que les enfants vivant dans les villes davantage polluées souffrent plus de rhumes et d'infections des voies respiratoires supérieures que ceux des villes moins polluées (Dockery *et al.*, 1989).

On pense que les effets des précipitations acides, sur le plan de la santé comme sur celui du bien-être des populations, sont avant tout d'ordre écologique et indirects plutôt que directs et d'ordre toxicologique (Franklin *et al.*, 1985; Benarde, 1987; Spengler *et al.*, 1989). Il demeure cependant que des effets locaux attribués au sulfate et au nitrate sont étroitement associés à la pollution atmosphérique liée aux particules et sont mis en cause dans la hausse du nombre de crises d'asthme et dans la mortalité. Ces expositions ne sont normalement pas considérées dans le contexte des précipitations acides et elles sont beaucoup plus intenses que celles associées au transport sur de grandes distances des substances acides. Des résultats préliminaires, obtenus à partir d'expériences sur des animaux, laissent penser que des agents acidifiants à des concentrations qui peuvent être trouvées dans le milieu produisent des lésions pulmonaires (Last, 1991). Bien que l'existence de certains effets nocifs sur la santé humaine ait été établie (Acid rain and human health, 1985; Franklin *et al.*, 1985; Goyer *et al.*, 1985; Benarde, 1987; Spengler *et al.*, 1989; Goldstein et Reed, 1991; Last, 1991), les associations observées sont peu marquées et sont incohérentes, exception faite des rapports entre la brume sèche acide ainsi que la pollution atmosphérique attribuable à des particules, et des personnes ayant des réactions respiratoires (Bates et Sizto, 1987; Balmes *et al.*, 1989; Hackney *et al.*, 1989; Raizenne *et al.*, 1989; Speizer, 1989), et entre la brume sèche acide et certains types de cancer - une association improbable (Gorham *et al.*, 1989). Les travaux de chercheurs canadiens, américains et italiens suggèrent l'existence possible d'effets directs de l'exposition industrielle à des agents acidifiants qui pourraient trouver leur pendant dans des expositions environnementales à des produits de précipitations acides (Soskolne *et al.*, 1989).

À des concentrations mesurées dans le milieu, le dioxyde de soufre peut nuire à la santé humaine. On a pris note d'effets sur les poumons et du déclenchement d'affections pulmonaires chroniques dans le cadre d'études épidémiologiques et d'études sur la santé contrôlées au laboratoire. Aucun seuil n'est clairement apparu, mais les expositions à court terme au dioxyde de soufre à des concentrations pouvant s'élever à 1 ppm n'ont pas provoqué d'effet grave ou irréversible. Cependant, on a observé une importante réduction de la fonction ventilatoire chez des adultes en santé qui faisaient de l'exercice, exposés à cette concentration du composé (Kirkpatrick *et al.*, 1982; Stacy *et al.*, 1983). On a également observé de légers symptômes respiratoires, associés au dysfonctionnement des voies respiratoires et à une bronchoconstriction passagère, chez des asthmatiques à l'exercice (Witek et Shacter, 1985).

Les effets sur la santé les plus préoccupants sont l'asthme, la bronchite et des affections pulmonaires similaires; certains indices permettent d'établir une corrélation entre le risque accru d'apparition des symptômes de ces maladies et la hausse progressive de la concentration du dioxyde de soufre, de l'ozone et d'autres polluants. Il est toutefois moins certain que ce type de pollution atmosphérique puisse provoquer de tels troubles aux concentrations auxquelles se font les expositions dans le contexte canadien. La plupart des chercheurs sont d'avis que la pollution atmosphérique ambiante à ces concentrations ne suffit pas pour endommager les voies respiratoires au point de provoquer de l'asthme ou une bronchite, mais peu doutent que ces mêmes concentrations puissent suffire à déclencher des effets chez un sujet souffrant d'une affection pulmonaire.

On sait qu'il se produit des effets sur la fonction ventilatoire et que se manifestent des symptômes d'irritation à des concentrations d'aussi peu que $100X10^{-9}$, particulièrement chez les asthmatiques et les bronchitiques. Des études épidémiologiques montrent que les enfants sont particulièrement vulnérables aux effets, tels que la bronchite et des modifications de la fonction ventilatoire, induits par l'exposition chronique au dioxyde d'azote à la concentration d'environ $100X10^{-9}$ (Shy *et al.*, 1973).

Le dioxyde d'azote est un irritant des voies respiratoires. À de très fortes concentrations, il peut provoquer des œdèmes pulmonaires (EPA, 1982; Kolomeychuk *et al.*, 1983). L'accroissement de la résistance des voies respiratoires attribuable à une exposition au $NO_2$ est amplement documenté (EPA, 1982; Kolomeychuk *et al.*, 1983). On rapporte avoir observé, chez des humains en santé, une augmentation de la résistance au passage de l'air après une à quinze minutes d'exposition au $NO_2$ à des concentrations variant entre 1,6 et 2,5 ppm (Neiding Von G. *et al.*, 1989). L'exposition à court et à long terme au $NO_2$ à des concentrations élevées peut accentuer la vulnérabilité aux infections respiratoires (EPA, 1982; Kolomeychuk *et al.*, 1983). Toutefois, la concentration du $NO_2$ dans les villes du Canada se situe généralement bien en dessous des niveaux auxquels des effets sur la santé sont réputés se manifester. Malgré tout, il est très important de réduire les émissions des $NO_x$, à cause de leur rôle dans la formation de l'ozone (Yassi et Friesen, 1990). Il est en effet possible de freiner considérablement la production de l'ozone, car les $NO_x$ sont cinétiquement limitants dans les réactions de formation de celui-ci.

### *Mortalité*

L'hypothèse de l'existence d'un lien entre la pollution atmosphérique et des cas réels de mortalité est la plus convaincante lorsqu'il est question des particules fines; elle est peu convaincante lorsqu'il est question des polluants acidogènes. Dans le cadre d'études épidémiologiques, on a établi une corrélation entre les expositions à court terme, d'environ une journée, au dioxyde de soufre, et des décès, bien qu'il y ait eu simultanément exposition à des particules de dioxyde de soufre à des concentrations élevées (jusqu'à $50X10^{-9}$), qui ont produit des symptômes et une maladie respiratoire (toux et bronchite), particulièrement chez les jeunes enfants et les fumeurs. Cela pourrait signifier que le $SO_2$ a moins d'effet seul que lorsque des fibres en concentration élevée servent de vecteurs jusqu'aux voies respiratoires inférieures, ce qui correspond au comportement connu du $SO_2$ à des concentrations supérieures.

### *Études sur l'exposition à l'extérieur*

Les concentrations de polluants produits par les véhicules (NO, $NO_2$ et CO) sont particulièrement préoccupantes sur le plan de la santé; elles atteignent ordinairement des valeurs de pointe aux moments de la journée où la population est le plus susceptible d'y être exposée, par exemple durant les déplacements entre la maison et l'école ou le travail et au retour, et pendant d'autres activités à caractère routinier. À mesure que l'urbanisation se renforce et que la densité des populations s'accroît, particulièrement dans la région de Toronto, davantage de personnes peuvent être exposées à la pollution dans les secteurs où la circulation est dense. Et, avec l'engouement de la population pour la marche, la course et le vélo, le nombre de personnes

exposées et le degré d'exposition aux polluants atmosphériques pourraient s'élever (Campbell *et al.*, 1995).

Le degré individuel d'exposition varie d'une personne à l'autre, mais les données disponibles montrent que, pour de nombreux polluants atmosphériques détectés à Toronto, les concentrations mesurées sont périodiquement assez élevées pour susciter des craintes pour la population de cette ville. Les concentrations sérielles de pointe de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules chevauchent en partie les concentrations qu'on peut croire à l'origine d'effets nocifs sur la santé. Les personnes atteintes de troubles respiratoires comme l'asthme, la bronchite chronique et l'emphysème, ainsi que les personnes en bonne santé qui s'exercent intensément à l'extérieur semblent être celles qui sont le plus à risque. Il est estimé que le nombre de personnes souffrant des troubles que nous venons de mentionner correspond à 7,5 % de la population du Canada (Ontario Lung Association, 1991) soit, par projection, 165 000 personnes sur un total d'environ 2,2 millions de personnes dans le Grand Toronto. Les personnes dont la fonction ventilatoire est compromise et qui passent, tous les jours, plusieurs heures à l'extérieur dans des secteurs très pollués peuvent fort bien être sujettes à des troubles tels qu'une respiration sifflante, la toux, des douleurs thoraciques, l'inflammation des voies respiratoires et une perte de la fonction ventilatoire (Campbell *et al.*, 1995).

Tandis que les concentrations de CO et de $NO_x$ tendent à passer par des valeurs maximales, matin et soir, pendant environ deux heures, soit aux heures de pointe, la concentration de l'ozone tend à rester élevée pendant 6 à 8 heures tous les jours. Bien que les véhicules n'émettent pas d'ozone, ils émettent du NO. Ce composé s'oxyde facilement pour donner du $NO_2$, avec l'oxygène et sous la lumière du soleil, et il contribue de la sorte à la formation de l'ozone. Ordinairement, la concentration de l'ozone est la moins élevée dans les secteurs où le trafic est intense, parce que le NO émis par les véhicules piège l'$O_3$ et le convertit en oxygène (Campbell *et al.*, 1995). Le transport de l'ozone sur de grandes distances, en provenance des États-Unis, contribue beaucoup à la teneur en ozone mesurée à Toronto, mais des sources locales de précurseurs de l'ozone peuvent contribuer à des concentrations élevées d'ozone dans les quartiers résidentiels qui sont éloignés des zones de circulation (City of Toronto, Department of Public Health, 1993).

## IMPACTS DES PRÉCIPITATIONS ACIDES SUR LA QUALITÉ DE L'EAU ET LA SANTÉ

Le mercure est un polluant particulièrement préoccupant car, une fois biotransformé en méthyl-mercure par les organismes vivant dans les sédiments aquatiques d'eau douce ou des sédiments marins, il est facilement récupéré dans le réseau trophique et s'accumule dans les tissus des prédateurs. Ce composé, facilement absorbé, est distribué dans l'organisme; sa concentration est six fois supérieure dans le cerveau humain à ce qu'elle est dans le sang. Il franchit la barrière placentaire sans encombre et semble s'accumuler dans les tissus du foetus. La concentration du mercure est élevée dans les tissus des femmes qui se nourrissent de grandes quantités de poisson.

Nombre d'études épidémiologiques ont été effectuées auprès de populations exposées au mercure par l'ingestion d'aliments contaminés à la suite de cas de pollution par le mercure ou par l'ingestion de poisson ou d'animaux se nourrissant de poisson. Dans le cadre d'une étude de 1985

portant sur des communautés cries du nord du Québec fortement exposées au méthylmercure par leur alimentation, des chercheurs ont soumis plus de 200 enfants nés en 1975 et 1976 à des tests neurologiques et de mesure du développement. Six pour cent seulement de ces jeunes étaient exposés à des concentrations supérieures à 20 ppm. Les chercheurs ont mis en évidence une corrélation positive entre l'exposition au méthylmercure et une anomalie au niveau des réflexes tendineux chez les garçons seulement (Health Effects Review, 1996).

Les précipitations acides constituent une forme de pollution atmosphérique à l'origine de problèmes de qualité de l'eau. Au cours des dernières années, des relevés de l'acidité des sols et de l'eau dans l'hémisphère Nord ont indiqué qu'il se produit une acidification de ces milieux (plus exactement, une perte de la capacité-tampon), et présumément un déplacement du pH et une mobilisation des métaux dans les sols, irréversibles (Berden *et al.*, 1987). La raison en est la production accrue et le transport dans l'atmosphère de substances acidifiantes émises par des sources industrielles; il s'agit principalement de sulfates et de nitrates (Larson, 1989; Lioy et Waldman, 1989). De profonds changements de la végétation et des biotes des lacs de faible dimension s'ensuivent (Berden *et al.*, 1987; Scott, 1989; The State of Canada's Environment, 1991; Nadakavukaren, 1995; Proceedings from the Acidifying Emissions Symposium, 1996). Au cours des cinq dernières années, les effets du dépôt acide sur les écosystèmes vulnérables de l'Est du Canada ont été considérablement atténués - d'au moins 30 % (Proceedings from the Acidifying Emissions Symposium, 1996).

Les précipitations acides perturbent beaucoup les écosystèmes aquatiques à l'équilibre fragile, les biotes marins ainsi que certaines espèces terrestres de plantes et d'arbres (Scott, 1989). À tout le moins, les effets des composés chimiques acidifiants (des oxydes de soufre et d'azote) sont additifs et, pour les combattre, on doit tenir compte de toutes les sources d'émission susceptibles de donner lieu à un transport à distance des polluants (Albert, 1989). L'acide sulfurique abaisse le pH de l'eau, ce qui conduit à l'élimination de nombreuses espèces aquatiques, comme les poissons, les grenouilles, les salamandres, les invertébrés et les insectes aquatiques (Nadakavukaren, 1995). L'abaissement du pH des rivières ou des lacs provoque aussi la mobilisation de métaux toxiques (aluminium, manganèse, plomb, zinc, mercure et cadmium) fermement fixés aux sédiments ou aux sols, qui sont entraînés dans le milieu aquatique. Ces métaux, particulièrement l'aluminium, peuvent endommager les branchies des poissons, qui meurent par asphyxie. La mobilisation de l'aluminium par acidification a causé des mortalités massives de poissons à un pH de l'eau qui n'aurait pas été meurtrier si ce n'avait été de la présence de l'aluminium (Nadakavukaren, 1995).

Les précipitations acides peuvent indirectement nuire à la santé humaine lorsque des chaînes alimentaires essentielles sont perturbées; les conséquences économiques de ce phénomène sont importantes. Certains auteurs se sont demandé si les métaux qui sont mobilisés et transportés dans l'eau souterraine en trop grande concentration (Acid rain and human health, 1985; Goyer *et al.*, 1985) n'auraient pas d'incidences toxicologiques (Goldstein *et al.*, 1991). La migration sur de grandes distances des constituants des précipitations acides est un phénomène bien documenté au Canada (Stolarsky *et al.*, 1991).

Les métaux toxiques de l'eau peuvent s'accumuler dans les tissus des poissons et les rendre dangereux à la consommation. Leur mobilisation menace directement la santé humaine, par la contamination des réserves d'eau potable et des aliments (Nadakavukaren, 1995).

Depuis quelques années, certaines sources d'aliments traditionnels de nombreuses communautés autochtones vivant dans le Nord ont été fortement contaminées par des polluants trouvés dans l'environnement. L'achat inconsidéré d'aliments de sources commerciales a contribué à aggraver les problèmes de nutrition apparus dans la foulée de l'acculturation de ces communautés. Une enquête auprès des Hare (Dénés) et des Métis vivant dans le Sahtu, dans la partie subarctique centrale du Canada, a permis de constater que les sources d'aliments traditionnels contribuent encore substantiellement à plusieurs des besoins sur le plan nutritionnel, notamment en protéines (corégonidés, caribou et viande d'orignal), en fer (caribou, lièvre, viande et sang d'orignal) et en zinc (orignal, viande de caribou et de lièvre, corégonidés). Cependant, le fait de passer de la consommation des aliments traditionnels aux aliments du commerce a eu pour effet d'élever la quantité totale de matières grasses dans le régime alimentaire, en particulier la proportion des graisses saturées aux graisses polyinsaturées. De nombreuses autres études sur les communautés de l'Arctique et de la zone subarctique ont fait ressortir des changements similaires dans les habitudes alimentaires parallèlement à l'acculturation (Shephard et McMillan, 1996).

Les aliments traditionnels constituent une partie importante du régime alimentaire des Autochtones; ils sont un apport intéressant au budget familial réel. Ce sont des aliments d'une grande qualité nutritive et, pour de nombreuses personnes, les aliments de prédilection. Les aliments importés qui sont offerts dans les commerces locaux sont limités quant à la variété, de mauvaise qualité et coûteux. Bref, les produits qu'achètent les résidents de ces régions sont tout probablement riches en glucides et en matières grasses et pauvres en protéines, en vitamines et en d'autres nutriments essentiels. De plus, les aliments traditionnels ne sont pas seulement nutritifs; ils sont, par leur production et leur distribution, à la base d'activités sociales et du maintien de rapports sociaux. On a associé la diminution de la consommation de ces aliments, chez les peuples autochtones du Nord, et la baisse des activités physiques à l'obésité, aux caries dentaires, à l'anémie, à une perte de résistance aux infections et au diabète.

De nombreuses communautés autochtones tentent de renouer avec leur ancien mode d'alimentation; beaucoup de leurs membres étaient passés, pendant des décennies, des aliments traditionnels aux aliments préparés et emballés. Cependant, on tient maintenant ces aliments pour responsables de la détérioration de la santé dans ces communautés, ce qui, en retour, a conduit à demander qu'on revienne aux aliments dont dépendait la survie de ces communautés pendant des millénaires. Toutefois, beaucoup d'Autochtones commencent à prendre conscience du fait que la consommation des aliments de sources traditionnelles, gibier et poisson, comporte aussi des risques pour la santé, à cause de la pollution. Cette menace n'est pas attribuable uniquement aux polluants laissés derrière eux par les militaires ou par les exploitations minières, mais elle provient aussi des polluants dans l'air et dans l'eau transportés sur de grandes distances et qui s'accumulent dans l'Arctique.

***Mercure (un exemple)***

Des études ont révélé une préoccupation à l'endroit des concentrations du méthylmercure en hausse depuis deux décennies, potentiellement jusqu'à des niveaux dangereux, auxquelles sont exposés les Cris du Nord, par suite de la mise en valeur du potentiel hydroélectrique de la baie James. De petites quantités de mercure minéral, qui se trouvait dans la roche, se dissolvent dans l'eau du réservoir; lorsque les végétaux, les bactéries et les débris submergés par la construction du barrage agissent sur cette solution, le mercure est converti en méthylmercure. Ce mercure organique pénètre dans le réseau trophique et s'accumule dans le poisson, qui a constitué une partie très importante du régime alimentaire des Amérindiens (*idem*). La concentration sanguine du mercure est maintenant beaucoup plus élevée chez ceux qui ont poursuivi leur pratique du piégeage à l'intérieur du territoire que chez ceux qui ont adopté d'autres modes de vie. Cette concentration varie avec les saisons, la pointe se situant en automne (*idem*).

Une étude signale le taux élevé de mercure chez des femmes inuites enceintes vivant dans les régions éloignées du Groenland, là où il n'y a pas d'exposition directe aux usines, aux véhicules automobiles ou à d'autres sources immédiates de mercure anthropique. Les chercheurs ont attribué ce phénomène à la concentration élevée de méthylmercure mesurée dans les mammifères marins. Comme chez les habitants de la région de la baie James, la concentration de mercure dans le sang des Inuits du Groenland s'est abaissée progressivement au cours de la période d'observation, soit de 1984 à 1988; une fois encore, cette baisse a été attribuée à la diminution progressive, avec l'acculturation, de la consommation d'aliments inuits traditionnels. Les auteurs signalent que les jeunes Inuits du Groenland ont fait part de leur préférence pour des aliments « occidentaux » et que seulement 23 % des besoins énergétiques de la population sont comblés par des sources traditionnelles. On signale également des concentrations élevées de mercure dans le sang des peuples autochtones de l'Alaska (*idem*).

## IMPACTS DU SMOG SUR LA SANTÉ

L'ozone troposphérique, le principal constituant du smog, endommage les feuilles des plantes et des arbres. Certains végétaux, comme le tabac, l'épinard, la tomate et le haricot pinto, y sont particulièrement sensibles. L'ozone provoque des dommages se chiffrant annuellement à des millions de dollars en pertes de récoltes. Il provoque aussi la défeuillaison et ralentit la vitesse de croissance des végétaux.

L'ozone est un composé très réactif qui irrite les muqueuses des voies respiratoires, provoque des toux, donne la nausée, cause l'essoufflement, congestionne les poumons et mène à une détérioration de la fonction ventilatoire. Il exerce également un effet inhabituel sur le rythme respiratoire en faussant la ventilation réflexe. En outre, il aggrave les maladies respiratoires chroniques comme l'asthme et la bronchite, et il peut être à l'origine de graves problèmes de santé chez les personnes fragiles (les personnes âgées). L'ozone s'attaque avant tout aux poumons. Des études sur des animaux montrent que ce composé endommage les cellules qui tapissent les voies respiratoires, causant de l'inflammation et une tuméfaction. De plus, il abaisse le potentiel de lutte contre l'infection et d'expulsion des corps étrangers dans les voies respiratoires.

À des concentrations élevées, l'ozone modifie à court terme la respiration et il amplifie les symptômes respiratoires (Kolomeychuk *et al.*, 1983). Des études signalent l'existence d'une vaste plage de sensibilité à ses effets. Il est établi que les personnes en santé et faisant de l'exercice éprouvent une perte d'efficacité de leur fonction ventilatoire et une hausse des symptômes respiratoires lorsqu'elles sont exposées longtemps à l'ozone à des concentrations de seulement 0,12 ppm. Des enfants et des adultes ont éprouvé une baisse temporaire de la fonction ventilatoire après avoir été exposés pendant une heure ou deux à l'ozone à des concentrations comprises entre 0,12 et 0,16 ppm. On observe de profonds symptômes tels que la toux ou des douleurs au moment d'inspirer profondément chez certains adultes soumis à un exercice intensif dans une atmosphère où la concentration de l'ozone dépasse 0,18 ppm. Plus récemment, on a constaté que des concentrations d'ozone à seulement 0,08 ppm stimulaient la production des cellules qui participent aux réactions inflammatoires chez des sujets exposés pendant 6 heures; on signale en outre que l'ozone irrite les yeux, le nez et la gorge à seulement 0,01 ppm de concentration. On s'inquiète de plus en plus de ses effets à long terme. On sait qu'il endommage les tissus qui tapissent les voies respiratoires et on le suspecte d'avoir un rôle dans le développement à long terme de maladies pulmonaires chroniques. En 1983, Bates et Sitzo établissaient, pour les mois d'été de 1974 et ceux de 1976 à 1978, un lien significatif entre le nombre supplémentaire d'admissions hospitalières pour troubles respiratoires et l'ozone, le $SO_2$ et la température, avec un décalage de 24 à 48 heures. Dans un article de 1989, ces mêmes chercheurs se sont penchés sur les admissions hospitalières pour troubles respiratoires aigus en juin 1983, au regard des admissions durant les années mentionnées ci-dessus. Ils parviennent à la conclusion que probablement ni l'ozone ni le $SO_4$ seuls ne peuvent expliquer l'association observée avec les admissions hospitalières pour troubles respiratoires aigus, mais certains composés chimiques non mesurés, le $H_2SO_4$, sans doute, en tête de liste, ou un profil d'exposition cumulée ou séquentielle ou un autre, sont responsables de la morbidité observée (Yassi et Friesen, 1990).

L'ozone provoque une réponse au niveau du réflexe dans les poumons en altérant le rythme respiratoire. Après avoir été exposées à l'ozone, les personnes ne souffrant pas d'asthme ne parviennent pas à prendre des inspirations aussi profondes qu'à l'habitude et leur débit respiratoire est légèrement modifié. Kleinman *et al.* (1989) ont tracé une courbe de la réponse en fonction de la dose montrant que les résultats de tests respiratoires varient avec la concentration de l'ozone. Sur de courtes périodes, les effets de l'ozone sont cumulatifs. Toutefois, sur plusieurs jours, les personnes y développent une tolérance et présentent moins de symptômes. Leur respiration se normalise; cependant, les asthmatiques peuvent toujours souffrir d'obstruction des voies respiratoires.

Il est clair que les asthmatiques sont plus affectés que les autres par l'ozone. En peu de temps, l'inflammation causée par l'effet irritant de ce composé induit une réduction du débit respiratoire et une aggravation de l'asthme. En outre, l'ozone semble rendre plus susceptibles aux allergènes les personnes dont l'asthme est de type allergique. Cela pourrait indiquer que l'ozone peut modifier le traitement des allergènes au niveau pulmonaire; il peut provoquer des crises d'asthme chez des personnes souffrant de ce trouble, mais il est improbable que l'exposition à l'ozone aux concentrations normalement mesurées au Canada puisse être à l'origine de la maladie. Les épisodes se produisent ordinairement un ou deux jours après que la concentration maximale ait été atteinte.

En cas de pollution atmosphérique, des sous-populations particulières, comme les femmes enceintes et les personnes souffrant de troubles chroniques (d'emphysème, par exemple), sont davantage à risque, comme elles le sont face à d'autres dangers de caractère environnemental. Malgré l'existence d'un mécanisme d'adaptation à l'ozone (Folinsbee, 1992), l'ozone peut, à des concentrations élevées, être à l'origine de changements biochimiques persistants dans les poumons. Son mode d'action est complexe et dépend notamment du degré d'activité des sujets et de la concentration en polluants. Ce composé s'attaque aux cellules épithéliales de l'arbre bronchique, ce qui peut donner lieu à une inflammation des voies respiratoires et à une réaction d'hyperréactivité. Toutefois, il peut être difficile d'établir ce mécanisme en laboratoire, en partie parce qu'il n'existe pas de modèle animal adéquat.

Les résultats les plus récents suggèrent que l'ozone est associé à une réponse inflammatoire qui se manifeste par une perméabilité membranaire accrue des voies respiratoires et une réaction d'hyperréactivité bronchique (Devlin *et al.*, 1991; Crapo *et al.*, 1992). La mesure de la fonction ventilatoire chez des enfants qui s'étaient rendus à des camps de vacances dans le sud de l'Ontario a enregistré une baisse moyenne de 3,5 à 7 % lorsque la moyenne horaire de la concentration d'ozone au niveau du sol atteignait $140X10^{-9}$ (Raizenne *et al.*, 1989); environ 5 % des admissions hospitalières de l'Ontario pour troubles respiratoires, et jusqu'à 15 % dans le cas des moins de 2 ans, peut être attribuable à des concentrations élevées d'ozone au niveau du sol (Bates et Sizto, 1987; Burnett *et al.*, 1994). À Los Angeles, l'ozone troposphérique, le dioxyde d'azote et la température, pris en combinaison, expliquaient 4 % de la variabilité quotidienne de la mortalité (exception faite des accidents et des suicides) (Kinney et Ozkaynak, 1991).

L'ozone peut constituer une menace particulière pour la santé des personnes souffrant de troubles respiratoires comme l'asthme, l'emphysème et la bronchite chronique. Environ 10 % de la population du bassin des Grands Lacs, de l'ordre de 14 millions de personnes, se classerait dans cette catégorie médicale. Ce composé peut aussi être un danger pour les jeunes, pour les personnes âgées et pour les personnes souffrant de troubles cardiovasculaires.

Deux comités d'experts qui se sont penchés sur le dossier des effets de la pollution atmosphérique sur la santé, pour le compte du Programme canadien d'avis de smog, sont parvenus à la conclusion que les effets sur la santé de l'ozone troposphérique, à des concentrations qu'il serait plausible de mesurer au Canada, incluent l'inflammation pulmonaire, la perte par décréments de la fonction ventilatoire, l'hyperréactivité des voies respiratoires, des symptômes respiratoires, la possibilité d'une intensification de la consommation de médicaments ainsi que des consultations médicales et l'augmentation des admissions en salle d'urgence chez les personnes souffrant de troubles respiratoires ou cardiaques, une perte de la capacité de faire de l'exercice, la hausse du nombre d'admissions hospitalières et peut-être une hausse de la mortalité (Stieb *et al.*, 1995). Certains de ces effets doivent être attribuables aux particules fines, pour lesquelles il ne semble pas exister de seuil d'effets pathogènes. Cependant, bon nombre d'entre eux sont sans doute attribuables à l'ozone.

Les comités ont classé ces effets de la pollution atmosphérique dans un ordre logique «séquentiel» ou «pyramidal», allant des événements rares et graves (p. ex., décès) aux effets communs et bénins (p. ex., irritation des yeux, du nez et de la gorge) et aux changements asymptomatiques

dont la signification clinique est incertaine (p. ex., perte de la fonction ventilatoire par petits décréments et inflammation pulmonaire) (American Thoracic Society, 1985; Bates, 1992). Bref, même si, selon ce modèle, il serait rare que la pollution atmosphérique précipite des effets graves, celle-ci exerce peut-être un grand effet d'ensemble sur la santé et sur le bien-être des gens (Stieb *et al.*, 1995).

Des dizaines de milliers de morts ont résulté, sans l'ombre d'un doute, des épisodes de pollution aiguë (comme le smog dans les grandes villes au début des années 50). Présentement, certaines personnes, notamment les asthmatiques, peuvent souffrir des pointes de pollution atmosphérique urbaine (notamment de l'ozone) dans certaines grandes villes. On ne sait pas avec certitude si la pollution atmosphérique, dans la majorité des villes qui se conforment aux directives en vigueur sur la qualité de l'air, contribue à une baisse de la santé. On ne sait pas plus si les directives sur la qualité de l'air en vigueur au Canada suffisent toujours pour protéger l'ensemble de la population.

Certains constituants du smog peuvent endommager les poumons des jeunes et des personnes âgées. Chez les asthmatiques, le smog peut aggraver les crises. Il peut faire croître le risque de maladies respiratoires comme la bronchite, et celui d'être atteint de certains types de cancer. En outre, le smog endommage les cultures, la végétation indigène et même les immeubles.

Le nombre des admissions hospitalières pour des maladies respiratoires en phase aiguë, dont l'asthme, augmente lorsque la concentration de l'ozone dépasse $80X10^{-9}$ dans l'air. Des chercheurs croient que l'ozone est la seconde cause, en importance, des maladies pulmonaires, après les particules fines de la fumée du tabac, la fumée secondaire, les émissions des véhicules automobiles et la combustion du bois (Environmental Protection, Province of British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks, 1995).

De récentes études (Bates et Sizto, 1987; Bates et Sizto, 1989; Thurston *et al.*, 1990; Tseng *et al.*, 1992; Burnett *et al.*, 1994; Delfino *et al.*, 1994; Schwartz, 1994) ont montré que le nombre des admissions hospitalières pour des troubles respiratoires augmente pendant les épisodes de pollution atmosphérique multiple lorsque les concentrations de l'ozone, des aérosols acides ou des particules sont élevées (Campbell *et al.*, 1995).

S'appuyant sur des tests plus perfectionnés (comme les tests sur la fonction pulmonaire), des études subséquentes ont montré que des personnes en bonne santé peuvent éprouver des effets à l'exposition à l'ozone. Cela se vérifie particulièrement lorsque leur fréquence respiratoire est élevée, par exemple lorsque ces personnes pratiquent une activité à l'extérieur qui exige un effort physique. Des symptômes de troubles des voies respiratoires supérieures (sécrétions nasales, irritation de la gorge) et des voies respiratoires inférieures (toux, respiration sifflante, douleur thoracique) ainsi que des symptômes non respiratoires (maux de tête, fatigue) sont autant de manifestations associées à l'exposition à l'ozone.

Les nitrates de peroxyacétyle (PAN) et d'autres oxydants associés à l'ozone sont de puissants irritants pour les yeux. Une exposition de 6 à 7 heures ou plus réduit la fonction ventilatoire de manière significative chez des personnes en santé soumises à un exercice même modéré.

## IMPACTS DES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'AIR SUR LA SANTÉ

La relation entre la pollution atmosphérique et la santé est une question fort complexe que viennent aggraver les conditions météorologiques. En général, les changements de température ont un effet plus apparent sur la mortalité et la morbidité que les changements de concentration des polluants atmosphériques (Seaton, 1996). Au cours des dernières années, nous avons beaucoup appris sur les effets des particules sur la santé. On s'est particulièrement soucié de l'effet des fines particules. La recherche moderne indique que ces dernières constituent la forme de pollution atmosphérique présentant les plus grands effets immédiats sur la santé (Environmental Protection, Province of British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks, 1995).

Les effets pathogènes de l'exposition par inhalation à des particules sont fonction de la profondeur de pénétration, du dépôt et de la rétention des matières dans les poumons. Les particules qui se déposent dans la région thoracique des poumons exercent les effets les plus marqués. Il est connu que seules les particules d'un diamètre d'au plus 10 microns pénètrent dans la région thoracique; par conséquent, ce sont elles qui ont le plus d'effet (Environnement Canada, 1990).

On associe les particules fines à des symptômes respiratoires, à l'hyperréactivité des voies respiratoires, à une perturbation de la fonction ventilatoire, à une perte de la capacité de faire de l'exercice, à l'inflammation pulmonaire, à une perte par décréments de la fonction ventilatoire, à l'augmentation du nombre d'admissions en salle d'urgence pour les cas d'asthme, à une hospitalisation accrue, à une hausse des absences (du travail, de l'école) et à l'accroissement de la mortalité par maladie cardiopulmonaire ou par cancer du poumon. Les enfants, les personnes âgées, les fumeurs, les asthmatiques et autres personnes souffrant de troubles respiratoires sont particulièrement vulnérables à ce type de polluants atmosphériques (Environmental Protection, Province of British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks, 1995; Stieb *et al.*, 1995; Seaton, 1996; Choudhury *et al.*, 1997).

Il est maintenant généralement reconnu que les particules fines sont associées à une augmentation de la mortalité dans les régions urbaines, notamment chez les asthmatiques et les personnes âgées. Ces particules proviennent des foyers, des poêles à bois et à charbon, de la fumée du tabac, des gaz d'échappement des moteurs diesel et des automobiles ainsi que d'autres sources de combustion. On ne sais pas encore pourquoi les particules fines sont associées à des effets aussi importants sur la santé humaine, mais des études toxicologiques confirment que ces particules sont beaucoup plus toxiques que leur taille en masse ne le laisserait penser.

Un certain nombre d'études confirment ces incidences sur la santé. Plusieurs auteurs ont signalé une relation entre les particules et les admissions hospitalières pour des troubles respiratoires, que ce soit en été (Bates et Sizto, 1987; Thurston *et al.*, 1992; Burnett *et al.*, 1994) ou sur l'année entière (Pope, 1991). On a également associé les particules à la fréquentation accrue des salles d'urgence pour des troubles respiratoires, à Vancouver (Bates *et al.*, 1990) et à Seattle (Schwartz *et al.*, 1993). L'incidence des particules sur la mortalité cardiorespiratoire est également bien documentée (Schwartz, 1994).

Schwartz et Morris (1995) se sont penchés sur la relation, de 1986 à 1989, entre les admissions hospitalières pour des troubles cardiaques chez les personnes âgées (de plus de 65 ans) à Détroit, Michigan, et les particules de moins de <10 microns de diamètre (PM10). Une augmentation de 32 $g/m^3$ de la densité des PM10 se traduit par un risque relatif de troubles au niveau des artères coronariennes, ainsi que de défaillances et de dysrythmies cardiaques. Cette variation de la concentration des PM10 correspond à une augmentation d'environ $13g/m^3$ de la concentration de sulfate en Ontario (Burnett *et al.*, 1995).

Hatch *et al.* (1985) ont montré que des suspensions de particules accroissaient l'infectiosité de bactéries injectées dans les poumons; il existe une corrélation entre cet effet et la toxicité *in vitro* de ces suspensions pour les macrophages alvéolaires (idem). Une augmentation du nombre d'admissions hospitalières pour troubles respiratoires, à la suite d'épisodes de pollution par des particules, n'entre pas en contradiction avec ces résultats expérimentaux (Burnett *et al.*, 1995).

Les principaux effets sur la santé qui sont associés à l'exposition à des particules en suspension dans l'air sont ceux sur la fonction ventilatoire, l'aggravation des maladies pulmonaires et cardio-vasculaires existantes, les effets sur l'épuration mucociliaire et sur d'autres mécanismes de défense de l'organisme, des altérations morphologiques et la mort (Holland *et al.*, 1979). On a observé des taux élevés de mortalité après l'exposition de personnes à de fortes concentrations atmosphériques de particules combinée à l'exposition à des oxydes de soufre, à la suite d'épisodes de pollution à Londres, en Angleterre, et à New York dans les années 50 et au début des années 60. Les jeunes (d'âge préscolaire et scolaire), les personnes âgées, celles souffrant de maladies chroniques obstructives du système cardiovasculaire (cardiaques et personnes souffrant d'artériosclérose), les asthmatiques, les personnes atteintes d'influenza ou de bronchite, les fumeurs et les personnes qui respirent par le nez et la bouche ou par la bouche sont le plus à risque pendant les épisodes de pollution par des particules (Environnement Canada, 1990).

Il est difficile de départager les PM2,5, le sulfate et l'ozone parce qu'ils apparaissent très souvent ensemble dans les cas de pollution urbaine. Selon les quelques études où ces produits sont séparés (p. ex., dans la vallée de l'Utah), il semble que les PM2,5 aient, de loin, la plus grande incidence sur la mortalité (Pope, 1991). De récents travaux de recherche paraissent indiquer que ces particules, et à un moindre degré le sulfate et sans doute l'ozone, sont à l'origine d'une hausse de la mortalité dans les villes qui en sont affectées. Plus les concentrations de ces contaminants sont élevées, plus il semble y avoir un excédent de décès, pour une journée donnée, par rapport à la mortalité prévue pour la saison et les conditions météorologiques observées.

Burnett *et al.* (1995) ont constaté que la concentration de sulfate est maximale dans le sud-ouest de l'Ontario et qu'elle s'abaisse à mesure qu'on se dirige vers le nord et l'est. Dans le cadre de leur étude, ces chercheurs ont observé une relation significative entre les admissions pour des troubles cardiorespiratoires dans des hôpitaux de soins intensifs de l'Ontario et la concentration des particules de sulfate. Les liens établis montrent clairement l'existence d'une relation dose-réponse (*idem*).

Les effets du sulfate sur les admissions hospitalières pour des troubles cardiaques et respiratoires semblaient toucher toutes les strates de la population. Ils ont été observés dans les six groupes de

malades étudiés, hommes comme femmes, et dans tous les groupes d'âge examinés. Les chercheurs ont observé une corrélation positive entre la concentration ambiante du sulfate et les admissions hospitalières durant cette étude de six ans. Ils ont fait ressortir un lien entre les effets du sulfate et les admissions hospitalières au sein d'une vaste population diversifiée, soit des personnes vivant dans des grandes villes, des petites communautés et dans des régions rurales, occupant 1 000 km de diamètre (Burnett *et al., 19*95).

De récentes études (Bates et Sizto, 1987; Bates et Sizto, 1989; Thurston *et al.*, 1990; Tseng *et al.*, 1992; Burnett *et al., 19*94; Delfino *et al.*, 1994; Schwartz, 1994) ont montré que le nombre des admissions hospitalières pour des troubles respiratoires augmente pendant les épisodes de pollution atmosphérique multiple lorsque les concentrations de l'ozone, des aérosols acides ou des particules sont élevées (Campbell *et al.*, 1995).

## STRATÉGIES ET OPTIONS D'ADAPTATION

### *Changement climatique (Réchauffement planétaire)*

Extrêmes de température

Contrairement à d'autres problèmes de santé, celui de la chaleur ne peut être maîtrisé par des prescriptions précises, sinon la réduction des émissions de GES, visant à ralentir tout réchauffement planétaire possible. Il y a donc lieu de procéder par anticipation face à ce problème. La mise en place d'un réseau de veille/avertissement météorologique et sanitaire est une possibilité. La population ignore souvent qu'il existe des conditions météorologiques susceptibles de contribuer à la hausse de la mortalité. Il serait avisé de mettre en place un réseau de veille et d'avertissement (semblable aux réseaux existants d'avertissement de l'imminence de tornades ou de tempêtes de neige) afin de prévenir la population de l'apparition prochaine de conditions météorologiques stressantes. Philadelphie s'est dotée d'un tel réseau (Kalkstein *et al.*, 1996), que l'on crédite d'avoir sauvé plus de 300 vies humaines à l'été de 1995. Certaines autres villes des États-Unis, notamment Phoenix, Saint-Louis et Washington, se préparent à installer des réseaux similaires. Il serait possible de construire des algorithmes sur mesure pour des centres tels que Montréal et Toronto.

Des services d'aide à l'acclimatation pourraient également contribuer à combattre le problème. Par exemple, est-il envisageable de modifier les logements à peu de frais de manière à réduire la charge thermique dans les espaces habités? Y aurait-il lieu d'offrir des incitatifs pour l'achat individuel de ventilateurs ou de climatiseurs? Mettra-t-on des abris à la disposition des personnes privées d'air climatisé pendant les canicules? L'*U.S. Environmental Protection Agency* explore certaines de ces avenues, qui pourraient être applicables au Canada, où le pourcentage de foyers et de lieux de travail climatisés est bien inférieur à ce qu'il est aux États-Unis.

Il suffit de prendre connaissance des incertitudes entourant la question du changement climatique et de la mortalité humaine pour se convaincre de la nécessité de poursuivre la recherche sur certains aspects précis du problème. On peut penser ici, relativement aux décès où la chaleur a joué un rôle, à notre grande méconnaissance des relations entre la pollution et les conditions

météorologiques. Il se peut que la synergie entre un degré de pollution élevé et une chaleur extrême accentue l'incidence du changement climatique sur la mortalité. Dans l'état actuel des connaissances, l'examen des incidences de la pollution sur la mortalité totale quotidienne conduit à des résultats contradictoires. Notre recherche, qui portait sur 10 villes des États-Unis, indique que les conditions météorologiques ont beaucoup plus de poids que le degré de pollution (ozone, oxydes d'azote et matières en suspension) quant à la mortalité quotidienne (Kalkstein *et al.*, 1991a). Lorsqu'on a appliqué une approche climatologique à l'échelle synoptique pour générer des masses d'air estivales, on s'est aperçu de l'existence d'une relation entre la mortalité moyenne la plus élevée et la présence de masses d'air « dangereuses » dans sept villes sur dix. En outre, une bonne partie des journées ayant la mortalité la plus élevée coïncidait avec la présence de ces masses d'air. Il semble que celles-ci n'étaient pas très polluantes. Cependant, Schwartz et Dockery (1992a et b) présentent des éléments tendant à prouver que la pollution pourrait être plus néfaste que les conditions météorologiques. Ces chercheurs ont également observé de fortes corrélations entre la concentration des particules et la mortalité quotidienne. La divergence des interprétations cautionne la poursuite de la recherche pour déterminer si la pollution est un facteur qui contribue aux variations quotidiennes de la hausse du taux de mortalité.

Effets indirects sur la santé

Sachant que la biosphère s'est structurée et s'est organisée principalement sous l'impulsion donnée par les microorganismes et que, par échange de matériel génétique, ceux-ci coévoluent avec l'environnement beaucoup plus rapidement que les humains, on ne s'étonnera pas si les principales incidences sur la population humaine de la modification planétaire de notre environnement se manifestent sur le plan des maladies infectieuses. Fait un peu plus surprenant, il n'existe cependant pas, malgré l'énoncé de quelques vœux pieux, d'effort concerté en vue d'employer les maladies infectieuses émergentes comme des indicateurs des changements écosystémiques.

Le milieu de la recherche, les gouvernements et les professionnels ont un vif intérêt direct à considérer que les questions de santé sont synonymes de traitement de la maladie, ainsi qu'à considérer que les problèmes écologiques, sanitaires, agricoles et nutritionnels se développent dans des univers parallèles, avec quelques rares recoupements. Il faut plutôt, et de toute urgence, adopter des approches transdisciplinaires plus vastes, qui sont tournées vers des systèmes complexes et fondées sur des activités scientifiques interactives (postnormales) (Funtowicz et Ravetz, 1993). Avec l'effondrement du Programme de recherche écologique des trois Conseils et le repli des universités, sous le coup du resserrement de leurs budgets, il est de plus en plus difficile d'entreprendre ce genre de recherche.

La difficulté tient à ce que la détection et la réponse s'opèrent à un certain échelon (local) et que l'interprétation ne peut se faire qu'à un autre échelon beaucoup plus grand (national au moins). On peut dire qu'à l'heure actuelle, on éteint les feux (les poussées infectieuses, les événements extrêmes) sans prêter attention à l'incendiaire (le réchauffement planétaire) ou à l'école des incendiaires (politiques publiques en matière d'agriculture, de transport, etc.). On enquête sur les poussées de maladies de manière à pouvoir découvrir les déterminants locaux (p. ex., contamination de l'eau par un égout ou une opération agricole), mais nous ne sommes pas

convaincus que quelqu'un étudie les profils épidémiques pour trouver ce qu'ils pourraient nous apprendre sur le fonctionnement holistique des écosystèmes. Ainsi, la poussée de cas d'hépatite, associée à des fraises, qui s'est produite aux États-Unis était tout à la fois prévisible et évitable. Il importe de disposer de moyens locaux efficaces pour détecter et étudier différents événements, et qu'ils soient reliés à des structures centrales assez développées pour être en mesure d'interpréter ces événements. Pour l'instant, les organisations à ces deux paliers sont peu développées et sous-financées.
Les trois Conseils de subventions (CRSH, CRSNG, CRM) et les autorités politiques chargées de l'application (dans tous les secteurs, notamment ceux de la santé, de l'agriculture, de l'environnement, des ressources humaines, de la culture et de l'économie) devraient mettre leurs ressources en commun pour établir un centre ou un institut de recherche en mesure de se pencher sur des problèmes transdisciplinaires qui ont des incidences sur le plan des politiques.

Quant aux travaux appliqués, 1) cet institut souhaité considérerait l'information sur les poussées de maladies et sur les catastrophes provenant de tout le pays et en tirerait des leçons systémiques qui pourraient être intégrées à des politiques nationales et régionales; 2) il formerait des employés de bureaux municipaux, provinciaux et nationaux qui s'occupent de santé, d'agriculture et d'environnement, à déceler les signes de détresse écologique à partir de symptômes pathologiques et environnementaux.

Quant à la recherche, on demanderait la tenue de projets précis dans des domaines essentiels pour savoir quels indicateurs conviennent et quels types de leçons systémiques se manifestent dans les profils des poussées épidémiques. Ainsi pourrait-on se demander quelles sont les leçons à tirer, sur le plan des politiques en matière d'agriculture, d'environnement, d'hygiène publique et d'économie, du profil pancanadien de contamination bactérienne et parasitique des bassins hydrographiques? Quelles sont les incidences du profil changeant des maladies hydriques sur les politiques commerciales internationales et l'inverse? Quelles sont les répercussions à long terme sur la santé publique, se manifestant par des changements environnementaux planétaires, des politiques commerciales et économiques?

### *Appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (et accroissement des UV)*

Tout le monde, enfants compris, doit se protéger du soleil de manière à ne pas trop s'exposer au rayonnement ultraviolet et à prévenir les effets nocifs pour la santé. On devrait y voir été comme hiver, particulièrement au moment de passer des vacances dans des pays subtropicaux ou tropicaux, où le rayonnement UV est plus intense, puisqu'on a constaté que l'exposition sporadique au soleil constitue un facteur de risque de souffrir de mélanomes et de cancers de la peau avec des mélanomes bénins.

En 1994, Santé Canada a tenu un colloque pour formuler des recommandations, à l'intention de la population, sur la façon de moins s'exposer aux UV (Mills et Jackson, 1995). Certaines stratégies ont été recommandées à ce propos :

1. S'exposer le moins possible au soleil. Éviter de s'y exposer pendant les périodes de la journée où le rayonnement solaire est le plus intense, en prévoyant de se livrer à ses activités à

l'extérieur avant onze heures et après seize heures. S'il faut être exposé au soleil pendant les heures les plus critiques, on doit se protéger du soleil (p. ex., ombrage, vêtements, filtre solaire).

2. Chercher l'ombre. Les arbres, auvents et abris procurent de l'ombre.

3. Couvrir les bras et les jambes, et porter un chapeau à large bord pour protéger le visage et le cou. Porter des lunettes solaires qui absorbent l'ultraviolet.

4. S'enduire d'un filtre solaire. Les filtres solaires sont importants, mais ils ne se substituent pas aux moyens pris pour se protéger du soleil et ne sont pas destinés à prolonger la période d'exposition. On doit les utiliser avec les autres moyens, comme se tenir à l'ombre et porter des vêtements, un chapeau et des lunettes solaires. Les filtres solaires doivent servir de protection pour les personnes qui ne peuvent éviter d'aller au soleil. Il est recommandé d'employer un filtre solaire ayant un facteur SPF (facteur de protection solaire) d'au moins 15, qui protège à la fois contre les UVA et les UVB.

***Substances toxiques dans l'air***

Il existe assez peu de données sur les substances toxiques dans l'air. Il ne fait pas de doute que l'application de mesures de réduction de la concentration des particules et des composés organiques volatils contribuera à une baisse de leur concentration. Cette pollution est nouvelle en ce sens que nous connaissons encore mal la portée du problème ainsi que les options ou initiatives dont nous pouvons disposer. Le Ministère y accorde cependant un grand intérêt, compte tenu des préoccupations et des attentes de la population, des mesures internationales qu'on peut envisager et de son caractère pluridisciplinaire ($NO_x$, COV, précipitations acides). On prévoit que l'examen de la liste des substances d'intérêt prioritaire permettra la désignation de 25 autres substances toxiques, aux termes de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE), dont 15 sont transportées principalement par voie aérienne (Environnement Canada, 1996b).

*Solutions à court terme :*

1) Maintien en vigueur des activités liées à l'application de la LCPE dans le cas de l'amiante, du plomb et du mercure.
2) Maintien de la surveillance spéciale des PM10, des aérosols acides et des COV, au sein du Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique, région de l'Atlantique.
3) Maintien de la sensibilisation et surveillance du développement du Plan d'action national contre les polluants atmosphériques dangereux, par l'entremise de l'AC de la DQA et du Comité de coordination national sur les problèmes atmosphériques.
4) Appui et participation à des études, avec la collaboration des gouvernements provinciaux, sur la charge de mercure transporté par voie aérienne sur de courtes et de grandes distances (*idem*).

*Solutions à moyen ou à long terme :*

1) Suivi du Plan d'action national contre les polluants atmosphériques dangereux et vérification que le programme est appliqué dans les diverses régions.

2) Promotion de la prévention de la pollution auprès des secteurs industriels concernés et, avec la collaboration des gouvernements provinciaux, vérification que des liens sont établis avec les initiatives portant sur les $NO_x$ et les COV (*idem*).

***Précipitations acides***

Un plan de lutte est déjà en application dans l'est du Canada; les prévisions relatives aux émissions indiquent que le Canada respectera ses engagements internationaux. Toutefois, la recherche sur l'acidification résiduelle et sur les incidences sur les écosystèmes pourrait se traduire par un nouvel abaissement des charges critiques en vue de protéger les écosystèmes vulnérables; cela pourrait signifier de nouvelles réductions des émissions au-delà de l'an 2000 (*idem*).

*Solutions à court terme :*

1) Vérification et confirmation que les gouvernements provinciaux atteignent leurs objectifs, par l'intermédiaire d'inventaires des émissions et de consultations avec les gouvernements provinciaux.
2) Assistance permanente pour des études scientifiques sur les écosystèmes et surveillance permanente des précipitations et des brouillards dans différentes régions du pays.
3) Réalisation d'études scientifiques sur une base régulière, en mettant l'accent sur l'acidification résiduelle et sur la nitrification (*idem*).

*Solutions à moyen terme :*

1) En 1997-1998, renégociation, avec les quatre provinces de l'Atlantique, des ententes relatives à la réduction des précipitations acides pour les prolonger au-delà de l'an 2000.
2) Suivi des émissions de $SO_2$ par province pour déterminer si les objectifs sont atteints.
3) Surveillance permanente des précipitations et mise en marche d'une analyse des tendances afin de déterminer l'efficacité des programmes de lutte contre la pollution.
4) Réalisation d'études sur les écosystèmes afin de confirmer l'efficacité du choix des niveaux-cibles de charge et de mesurer les effets du dépôt de $NO_3$ (*idem*).

*Solutions à long terme :*

1) Suivi des émissions par province et vérification que les objectifs soient atteints.
2) Surveillance permanente des précipitations, analyse des tendances et réalisation d'études sur les écosystèmes afin de confirmer l'efficacité des programmes de lutte contre la pollution et du choix des niveaux-cibles de charge, et mesure des effets du dépôt de $NO_3$ (*idem*).

***Smog***

La réduction des niveaux d'ozone troposphérique est un problème complexe qui nécessite la collaboration des gouvernements, des entreprises et des particuliers. Les émissions de l'industrie et des véhicules automobiles peuvent être réduites grâce à l'application de mesures de conservation comme le transport en commun, le covoiturage, le vélo, la marche et d'autres mesures d'économie d'énergie; le passage à des carburants de remplacement; et la mise au point de nouvelles technologies comme l'utilisation de l'énergie solaire pour chauffer les maisons,

propulser les véhicules ou faire la cuisson. La solution peut-être la plus intéressante est une combinaison de changements technologiques, sociaux et économiques.

Le *Clean Air Act* de 1990 des États-Unis comporte des dispositions pour la réduction et l'élimination de la production et de l'emploi de substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Les directives de l'OMS pour l'exposition à l'ozone ont été fixées à 0,076-0,1 ppm pour une exposition d'une heure, et à 0,05-0,06 ppm pour une exposition de huit heures (OMS, 1987).

En 1990, le Plan vert du gouvernement fédéral faisait du smog un problème canadien de pollution; en 1993, Environnement Canada introduisait le Programme des avis de smog pour traiter des problèmes reliés au smog (Stieb *et al.*, 1995).

*Solutions à court terme :*

1) Réalisation d'une étude de suivi sur la mise en oeuvre d'un programme d'inspection et d'entretien des véhicules pour réduire les émissions de COV et de $NO_x$.
2) Sensibilisation de la population et promotion du sens civique et de la prévention de la pollution par différents moyens éducatifs, notamment la tenue de cliniques d'analyse des émissions des véhicules et la distribution de matériel didactique comme des brochures faisant le point sur les émissions d'ozone au Canada et sur leur réduction.
3) Examen des moyens existants de surveillance de la concentration d'ozone troposphérique et détermination d'options pour le maintien, la réduction ou l'expansion de cette surveillance de concert avec les provinces.

*Solutions à moyen ou à long terme :*

1) Examen de l'élargissement possible du Programme des avis de smog à d'autres polluants comme les particules.
2) Suivi des progrès d'initiatives régionales réalisées dans le cadre du plan de gestion des $NO_x$ et des COV et présentation de rapports.
3) Promotion des activités de prévention de la pollution dans le cadre du plan national.
4) Appui à la recherche sur la qualité de l'air à titre de problème canadien.

***Particules***

Il semble qu'à long terme la qualité de l'air se soit améliorée dans les régions urbaines, en ce qui concerne les particules, grâce au développement économique et social; cela a conduit à l'emploi de sources énergétiques moins polluantes (p. ex., le gaz naturel au lieu du charbon et du bois), à la modernisation des centres-villes, à une plus grande propreté des rues, à une plus grande couverture gazonnée et asphaltée et à l'amélioration des installations industrielles et commerciales, notamment par l'installation de matériel de dépollution (Environnement Canada, 1990).

## LACUNES ET BESOINS

### *Introduction*

Cette analyse porte sur les lacunes et les besoins sur le plan de la recherche en matière de santé au Canada; certaines des conclusions et des recommandations peuvent convenir pour d'autres pays.

### *Politique sur la recherche et financement*

Il est probable que la politique fédérale d'encouragement des entreprises pharmaceutiques à appuyer la recherche biomédicale (en retour d'une meilleure protection des brevets sur les médicaments) a notamment eu pour conséquence que ces entreprises influencent l'établissement des priorités en matière de recherche. On accorde maintenant un meilleur soutien aux études aléatoires sur les traitements pharmaceutiques, au contraire de la recherche fondamentale et d'autres types de recherche appliquée. Le « climat de recherche » n'est pas propice à la mise en place de stratégies novatrices fondées sur les approches transdisciplinaires au Canada.

Plusieurs groupes d'experts ont recommandé l'application d'approches transdisciplinaires aux problèmes de recherche, notamment la réalisation de travaux de recherche, et leur soutien, qui rompent avec la tradition réductionniste et compartimentée qui a caractérisé la recherche biomédicale pendant des décennies. Le comité sur les enjeux de la santé du Programme canadien des changements à l'échelle du globe (1995) et les membres des comités d'experts (McMichael *et al.*, 1996c) du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) ont proposé la mise sur pied de nouvelles coalitions de recherche entre les chercheurs biomédicaux et les spécialistes du comportement et des sciences sociales. Il faut des stratégies novatrices de recherche pour étudier certains des problèmes ci-après mentionnés. Cependant, nous voyons peu de signes de la réalisation de telles études au Canada, et les conseils de recherche et autres agences de financement ne semblent pas en favoriser l'émergence.

### *Surveillance des phénomènes ayant des incidences sur la santé*

Il devient urgent de disposer de renseignements fondamentaux sur les répercussions du changement climatique sur la santé. Il est essentiel de réunir l'information manquante, même si cette étape n'est souvent pas jugée comme un travail scientifique, avant que les travaux de recherche formelle puissent être entrepris. Nous n'avons que peu, voire pas, de données fiables sur l'évolution géographique et dans le temps (séculaire) de la répartition et de l'abondance des vecteurs de maladies au Canada et des organismes pathogènes qu'ils peuvent transporter.

Au début des années 80, un maringouin très résistant, *Aedes albopictus*, a été introduit dans le sud des États-Unis avec une livraison de pneus destinés au recyclage. Ce moustique est un vecteur très efficace de la dengue hémorragique et de plusieurs types d'encéphalites virales. *A. albopictus* a occupé une niche écologique laissée libre et s'est répandu dans tous les états du Sud, dans ceux de la côte de l'Atlantique et dans le Midwest au moins jusqu'à la frontière avec le Canada. Sa répartition et son abondance, ses cycles de reproduction et son aptitude à résister au froid, ainsi que la capacité des organismes pathogènes viraux de survivre aux périodes d'hibernation, sont autant de raisons pour qu'on exerce une surveillance permanente au Canada.

La surveillance permanente de la répartition et de l'abondance des anophèles, vecteurs de la malaria, obtient aussi une priorité élevée. Il y a eu des cas de malaria dans la région d'Ottawa, lors de l'arpentage et du creusement du canal Rideau; cette maladie pourrait de nouveau se manifester maintenant que les voyages par air sont rapides. Il y a eu des cas de malaria au sein de la population locale à proximité de l'aéroport Kennedy, à New York, en 1995. Les parasites ont sans doute été introduits dans ce pays par des voyageurs et transmis par des anophèles domestiques à des résidents du quartier de Far Rockaway, situé près de l'aéroport.

Il nous faut aussi suivre la migration de la souris sylvestre. Celle-ci peut être porteuse de l'hantavirus responsable du syndrome pulmonaire.

Il est tout aussi important d'exercer la surveillance permanente de nombreux autres organismes pathogènes. Depuis dix à vingt ans, les organismes résistants aux antibiotiques ont proliféré. Ce phénomène a été produit par l'homme, qui, pendant de nombreuses années, a utilisé des antibiotiques à large spectre de manière abusive, tant dans la pratique médicale qu'en zootechnie. La prolifération des organismes résistants aux antibiotiques trouve sa place sous la rubrique des changements planétaires même si le lien entre les deux est ténu.

La maladie du légionnaire est une des infections en développement qui sont liées au changement climatique. Cette maladie se propage dans l'air humide par les réseaux de climatisation mal entretenus. Il faut donc exercer une nouvelle forme de surveillance, c.-à-d. la surveillance par les organisations sanitaires des réseaux de climatisation, notamment dans les endroits publics comme les hôpitaux.

Il faut une forme de surveillance qui se confond à la recherche épidémiologique (cas-témoins, études de cohortes et études sur échantillon aléatoire et contrôlé) pour faire ressortir les relations entre l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, le rayonnement ultraviolet au sol, les effets nocifs sur la santé humaine de l'exposition accrue aux UV (coups de soleil aigus, cancer de la peau, cataracte, dysfonctionnement du système immunitaire, etc.) et les changements de comportement au rayonnement solaire accru (le fait d'éviter le soleil, l'emploi de filtres solaires, le port de vêtements de protection, de lunettes solaires, etc.).

Ces exemples de surveillance et de recherche ciblée sur des menaces pour la santé nécessitent presque tous la mobilisation de médecins, d'épidémiologistes, de microbiologistes, d'entomologistes, d'ingénieurs sanitaires, etc., ainsi que de météorologistes, de climatologues, de physiciens spécialistes de l'atmosphère, de personnel de services d'information sur le cancer, etc.; bref, on doit appliquer une approche transdisciplinaire.

### *Approches transdisciplinaires à la recherche*

Comportement humain et changement climatique

Le changement climatique est avant tout un phénomène anthropique et son atténuation passe par une intervention humaine... de chacun de nous. Par conséquent, nous devons modifier notre vision des choses et notre ordre de valeurs. C'est une condition essentielle à l'amorce de tout

changement de notre comportement. Pour contrôler un problème de santé, il faut que les cinq éléments suivants au moins soient en place :

1) Perception de l'existence du problème.
2) Compréhension des causes du problème.
3) Capacité de contrôler les causes.
4) Système de valeurs permettant de déterminer que le problème est important.
5) Volonté politique de régler le problème.

Modification de l'ordre des valeurs, motivation et comportement

Notre consommation abusive des ressources non renouvelables, notamment des combustibles fossiles, occupe une grande place parmi les défis que nous avons à relever. La consommation de combustibles fossiles par habitant au Canada est la plus élevée du monde. Il est donc hautement prioritaire de se doter de moyens pour modifier nos valeurs et notre comportement dans le sens du développement durable et s'éloigner de nos habitudes de consommation effrénée. Faute de réussir ce virage, des effets sur la santé feront manifestement partie des conséquences. Et nous avons tous des comportements qui contribuent à des changements climatiques nocifs.

On doit étudier les déterminants des comportements humains, ce qui implique de la recherche sur les relations existant entre les valeurs, la motivation et les comportements qui concernent la santé, sur le plan de ceux de ces comportements qui ont ou pourraient avoir des incidences nuisibles sur la durabilité.

La guerre aux pathogènes et aux autres organismes nuisibles

Il faut exécuter de la recherche pour trouver des façons de mettre un terme à la « course aux armements » entre l'être humain et les microorganismes pathogènes. Il est impensable que nous puissions gagner cette guerre : ces organismes se déploient dans tous les sens et ils ont de nombreuses générations pour l'une des nôtres; par conséquent, ils produisent très rapidement et très efficacement des souches résistantes aux antibiotiques. La situation est similaire chez les moustiques et autres insectes qui sont exposés depuis des générations aux pesticides; ils acquièrent une résistance à ces produits et nous sommes perpétuellement condamnés à en mettre au point de nouveaux, dont bon nombre sont nocifs pour d'autres espèces, dont les humains. Devant le défi que constituent ces inexorables mécanismes biologiques et le fait qu'il n'existe pas encore de vaccin contre la malaria, on oriente de plus en plus les programmes de lutte contre la malaria vers le recours à des méthodes « écologiques » de lutte et vers des efforts plus marqués pour isoler la population humaine des moustiques (p. ex., l'utilisation de moustiquaires) (Litsios, 1996). On peut aussi dire que ces programmes commencent à appliquer des méthodes qui tiennent compte de la capacité des humains de cohabiter avec des organismes nuisibles et des organismes pathogènes.

L'application d'approches similaires constituerait peut-être la meilleure stratégie de recherche en ce qui concerne le problème des organismes pathogènes infectieux résistants aux antibiotiques. Pour cela, il faudra établir de nouvelles coalitions entre plusieurs genres de scientifiques

biomédicaux (cliniciens, immunologistes, épidémiologistes, microbiologistes, spécialistes de la zootechnie), spécialistes du comportement et des science sociales et économistes; tous ces groupes doivent collaborer, par exemple, avec des entreprises pharmaceutiques, qui ont un intérêt direct à ce que la consommation d'antibiotiques ne diminue pas. Cette question a beaucoup d'importance car les conséquences de la prolifération d'organismes pathogènes résistants aux antibiotiques s'aggravent sans cesse. Il existe un lien avec le changement climatique, à savoir que de nombreux microorganismes pathogènes sont plus dangereux sous les climats chauds. Nous l'avons mentionné plus tôt, *Legionella*, responsable de la maladie du légionnaire, constitue un risque plus grand sous les climats chauds parce qu'on y installe davantage de systèmes de climatisation, qui sont la principale méthode de transmission de cet organisme.

Effets sur la santé d'une exposition accrue aux UV

En plus de la surveillance et des études épidémiologiques déjà décrites, d'autres enjeux en matière de recherche fondamentale sur les effets des UV demandent la tenue de travaux de recherche, en bonne partie de nature transdisciplinaire (McKenzie *et al.*, 1994). Nous n'avons pas de preuve décrivant sans doute possible la séquence d'événements conduisant de la production de composés qui détruisent l'ozone à l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, à la hausse du rayonnement UV au niveau du sol et aux effets à court, à moyen et à long terme sur les organismes vivants et la santé humaine. Les idées que nous entretenons sur cette séquence reposent sur une combinaison d'intrapolations et d'extrapolations. L'accroissement des UV à la surface du sol se classe peut-être parmi les facteurs les plus pernicieux, associés au changement climatique à l'échelle de la planète; c'est pourquoi il importe tant de combler toutes les lacunes dans nos connaissances. À cette fin, il faudra une opération réunissant les efforts de spécialistes provenant de nombreux domaines, de la physique théorique et atmosphérique à la biologie moléculaire. En partie du moins, la nature précise des changements biologiques au niveau de la peau et d'autres tissus chez l'humain, de la pathogenèse du cancer de la peau, de la cataracte et de la perturbation des défenses immunitaires demeure conjecturale. C'est pourquoi les dermatologues et les immunologistes, entre autres, devront collaborer à la recherche avec des scientifiques du Service de l'environnement atmosphérique, de manière à lever certaines des incertitudes qui demeurent.

Effets sur la santé du dépôt acide

Le carbone, l'azote et le soufre émis par des procédés industriels et surtout par les véhicules automobiles se combinent à la vapeur d'eau, à la pluie, au brouillard, à la bruine et à la neige pour charger l'atmosphère d'acide carbonique, d'acide nitrique et d'acide sulfurique. Les effets nocifs des brouillards et des précipitations acides sur les écosystèmes d'eau douce et sur certains végétaux sont établis depuis longtemps. Mais la preuve que le dépôt acide ait des effets pernicieux sur la santé humaine est plus imprécise. Tant sur le plan intuitif que sur le plan empirique, il peut exister suffisamment d'indices pour justifier l'application de mesures contre le dépôt acide, mais les conséquences économiques d'une telle intervention pour l'industrie et pour le secteur du transport automobile en ont freiné la mise en oeuvre dans de nombreux pays, y compris le Canada. C'est ainsi que nous nous condamnons à l'inaction face à ce problème des brouillards et des bruines acides, ainsi que d'autres formes courantes de pollution urbaine et péri-urbaine qui

constituent de graves irritants du système respiratoire, particulièrement chez les personnes souffrant déjà de troubles de cet ordre. Le nombre excédentaire de décès attribuables au smog de 1952 à Londres - plusieurs milliers de décès en quelques semaines, concentrés surtout dans la sous-population des personnes souffrant de troubles respiratoires chroniques - est un exemple remarquable. Au Canada, Bates et Sizto (1987) ont mis en évidence la même séquence. Mais, avant de pouvoir agir, il faut réunir davantage de preuves. On a émis l'hypothèse que les dépôts acides pouvaient lixivier du sol certains composés chimiques qui pénètrent ensuite dans l'eau de ruissellement et les aquifères, et s'accumulent possiblement dans les aliments et l'eau potable. Dans ce contexte, le plomb et l'aluminium ont été mentionnés; même s'il paraît improbable que le plomb puisse atteindre des concentrations toxiques ou que l'aluminium ainsi mobilisé puisse constituer un facteur étiologique de la maladie d'Alzheimer, les indices actuels ne permettent pas d'exclure la possibilité d'une telle accumulation, donc d'effets délétères. Par conséquent, l'étude attentive des relations entre le dépôt acide, la chimie du sol, la botanique, l'agronomie et la santé humaine doit constituer une autre priorité en matière de recherche transdisciplinaire.

### *Études prospectives*

L'examen prospectif, dans une perspective canadienne, du travail, de la santé, des tendances socio-démographiques et de l'urbanisation, de la sécurité alimentaire, de la disponibilité et de l'utilisation des ressources, de la technologie, etc. au Canada comme à l'étranger, doit constituer une autre priorité. C'est un autre cas de recherche transdisciplinaire réalisable de différentes manières. On peut, par exemple, appliquer des modèles mathématiques ou créer des scénarios reposant sur des hypothèses plausibles et sur des extrapolations; on peut aussi procéder par « visualisation », c.-à-d. par l'examen de réalités futures probables, possibles, souhaitables et non souhaitables (Health Futures Research, 1994). Chacune de ces approches doit s'accompagner d'une planification à long terme destinée à maximiser la probabilité qu'un futur souhaitable se réalise.

### *Sommaire*

Nous n'avons apporté ici que des exemples des lacunes et des besoins en matière de recherche. Sans doute le lecteur est-il en mesure de compléter cette énumération partielle. Afin de relever les nombreux défis, sur le plan de la santé, attribuables au changement climatique, il importe de poursuivre la recherche et, pour cela, de mettre en place des politiques, des stratégies et des tactiques de recherche.

## CONCLUSION

Ce rapport décrit les incidences nocives et généralisées, sur la santé humaine, des six problèmes atmosphériques : le changement climatique (réchauffement planétaire), l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (et l'intensification du rayonnement ultraviolet), les substances toxiques dans l'air, les précipitations acides, le smog et les particules. Les incidences de ces problèmes sur la santé sont une question d'hygiène publique d'importance majeure.

À l'examen de ces problèmes de santé, il est évident que nous devons intensifier nos efforts de recherche, particulièrement à caractère transdisciplinaire, et que nous devons assurer une surveillance continue des indicateurs des risques pour la santé associés aux stress d'origine atmosphérique. Les trois conseils de recherche (CRSH, CRSNG et CRM) devraient donc reconnaître que l'examen des problèmes atmosphériques et leurs incidences sur la santé constituent une priorité.

## RÉFÉRENCES

Acha, P. et Szyfres, B. (1987). *Zoonoses and Communicable Diseases Common to Man and Animals*, 2e éd, Pan American Health Organization, Washington (D.C.), 963 p.

Acid rain and human health (1985), *Lancet*, 1, p. 616-618.

Albert, R. (1989). Risk assessment for acid aerosols, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 201-202.

Alcalay, J., Goldberg, L.H., Wolf, J.E. et Kripke, M.L. (1989). Variations in the number and morphology of Langerhan cells in the epidermal component of squamous cell carcinomas, *Archives of Dermatology*, 125, p. 917-920.

Alexander, D. (1993). *Natural Disasters*, Chapman and Hall, New York (N.Y.), 632 p.

American Thoracic Society (1985). Guidelines as to what constitutes an adverse respiratory health effect, with special reference to epidemiologic studies of air pollution, *American Review of Respiratory Diseases*, 131, p. 666-668.

Anand, C.M., Fonseca, K., Stowe, T., Olson, M. et Wallis, P. (1993). Lyme disease: seroprevalence and vector survey in southern Alberta, *Canada Communicable Disease Report*, 19-24, p. 205-209.

Anonyme (1994). Heartworm infection a risk in four Canadian sites, *Canadian Veterinary Journal*, 35, p. 145.

APAC (1997a). *Acidifying Emissions*, document personnel, Downsview (Ont.), 1 p.

APAC (1997b). *NOx/VOC*, document personnel, Downsview (Ont.), 1 p.

Applegate, W., Runyan, J., Brasfield, L., Williams, M.L., Konigsberg, C. et Fouche, C. (1981). Analysis of the 1980 heat wave in Memphis, *Journal of the American Geriatrics Society*, 29(8), p. 337-342.

Armstrong, B. (1994). Stratospheric ozone and health, *International Journal of Epidemiology*, 23, p. 873-885.

Artsob, H. (1986). Arbovirus activity in Canada 1985, *Canada Diseases Weekly Report*, 12, p. 109-110.

Artsob, H. (1996). Communication personnelle.

Association canadienne de santé publique (1992). *Human and Ecosystem Health: Canadian Perspectives, Canadian Action*, Association canadienne de santé publique, Ottawa (Ont.).

Audy, J. (1971). « Measurement and diagnosis of health », dans P. Shepard et D. McKinley (dir.), *Environmental: Essays on the Planet as a Home*, Houghton-Mifflin, Boston (Mass.), p. 140-162.

Austin, D. et Reynolds, P. (1986). Occupational and malignant melanoma of the skin, *Recent Results in Cancer Research*, 102, p. 98-107.

Baker T., McEwen, S., Prescott, J. et Meek, A. H. (1989). The prevalence of leptospirosis and its association with multifocal intestinal nephritis in swine at slaughter, *Canadian Journal of Veterinary Research*, 53, p. 290-293.

Balmes, J., Fine, J., Gordon, T. et Sheppard, D. (1989). Potential bronchoconstrictor stimuli in acid fog, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 163-166.

Balzi, D., Carli, P. et Geddes, M. (1997). Malignant melanoma in Europe: changes in mortality rates in European community countries, *Cancer Causes and Control*, 8, p. 85-92.

Banerjee, S. (1993). Isolation of *Borrelia Burgdorferi* in British Columbia, *Canada Communicable Disease Report*, 19-24, p. 204-211.

Barker I., Surgeoner, G., Artsob, H., McEwen, S.A., Elliott, L.A., Campbell, D.G. et Robinson, J.T. (1992). Distribution of the Lyme Disease Vector, *Ixodes dammini* (Acari: Ixodae) and Isolation of *Borrelia burgdorferi* in Ontario, Canada, *Journal of Medical Entomology*, 78, p. 171-176.

Barker, I., McEwen, S. et Artsob, H. (1989). Distribution of the Lyme Disease agent in wildlife in Ontario, *Canada Diseases Weekly Report*, 15-27, p. 141-142.

Bates, D. (1992). Health indices of the adverse effects of air pollution. The question of coherence, *Environmental Research*, 59, p. 336-349.

Bates, D. et Sizto, R. (1983). Relationships between air pollutant levels and hospital admissions in Southern Ontario, *Canadian Journal of Public Health*, 74, p. 117-122.

Bates, D. et Sitzo, R. (1987). Air pollution and hospital admissions in southern Ontario: the acid summer haze effect, *Environmental Research*, 43, p. 317-331.

Bates, D. et Sizto, R. (1989). The Ontario Air Pollution Study: identification of the causative agent, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 69-72.

Bates, D., Baker-Anderson, M. et Sitzo, R. (1990). Asthma attack periodicity: a study of hospital emergency visits in Vancouver, *Environmental Research*, 45, p. 51-70.

Benarde, M. (1987). Health effects of acid rain. Are there any?, *Journal of the Royal Society of Health*, 107, p. 139-145.

Bentham, G. et Langford, I. (1995). Climate change and the incidence of food poisoning in England and Wales, *International Journal of Biometeorology*, 39, p. 81-86.

Berden, M., Nilsson, S. et Rosen, K. (1987). *Soil Acidification: Extent, Causes, and Consequences*, Report 3292, National Swedish Environment Protection Board, Solna (Suède), 164 p.

Bollegraaf, E. (1988). Lyme disease in Canada, *Canada Diseases Weekly Report*, 14-22, p. 95-98.

Born, W., Happ, M., Dallas, A., Reardon, C., Kubo, R., Shinnick, T., Brennan, P. et O'Brien, R. (1990). Recognition of heat shock proteins and cell functions, *Immunology Today*, 11, p. 40-43.

Bouwes Bavinck, J., Hardie, D., Green, A., Cutmore, S., MacNaught, A., O'Sullivan, B., Siskind, V., Van Der Woude, E.J. et Hardie F.K. (1996). The risk of skin cancer in renal transplant recipients in Queensland, Australia: a follow-up study, *Transplantation*, 61(5), p. 715-721.

Box, G. et Wetz, J. (1973). *Criteria for Judging Adequacy of Estimation by an Approximating Response Function*, University of Wisconsin Statistics Department.

Bridgeman, S., Robertson, R., Syed, Q., Speed, N., Andrews, N. et Hunter, P.R. (1995). Outbreak of cryptosporidiosis associated with a disinfected groundwater supply, *Epidemiology and Infection*, 115, p. 555-566.

Brilliant, L., Grasset, N., Pokhrel, R., Kolstad, A., Lepowski, J. M., Brilliant, G.E., Hawks, W.N. et Parajasegaram, R. (1983). Associations among cataract prevalence, sunlight hours, and altitude in the Himalayas, *American Journal of Epidemiology*, 118, p. 250-264.

British Columbia Centre for Disease Control (1995). Communication écrite.

British Columbia Toxoplasmosis Team (1995). Outbreak of toxoplasmosis associated with municipal drinking water - British Columbia, *Canada Communicable Disease Report*, 21, p. 161-164.

Bruce-Chwatt, L. (1988). « History of malaria from prehistory to eradication », dans W. Wernsdorfer (dir.), *Malaria: Principles and Practice of Malariology*, Churchill Livingstone, Edinburgh (G.-B.), p. 913-999.

Bunce, N.J. (1994). *Environmental Chemistry*, 2e éd., Wuerz Publishing Ltd., Winnipeg (Man.), 376 p.

Burn, D. (1994). Hydrologic effects of climate change in West-central Canada, *Journal of Hydrology*, 160, p. 53-70.

Burnett, R., Dales, R., Raizenne, M., Krewski, D., Summers, P.W., Roberts, G.R., Raad-Young, M., Dann, T. et Brook, J. (1994). Effects of low ambient levels of ozone and sulfates on the frequency of respiratory admissions to Ontario hospitals, *Environmental Research*, 65(2), p. 172-94.

Burnett, R., Dales, R., Krewski, D., Vincent, R., Dann, T. et Brook, J.R. (1995). Associations between ambient particulate sulfate and admissions to Ontario hospitals for cardiac and respiratory diseases, *American Journal of Epidemiology*, 142(1), p. 15-22.

Campbell, M., Benson, B. et Muir, M. (1995). Urban air quality and human health: a Toronto perspective, *Canadian Journal of Public Health*, sept.-oct., p. 351-57.

Canadian Institute for Health Information (1997). Communication écrite.

Carey, P. (1987). *Air Toxics Emissions from Motor Vehicles*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington (D.C.).

Carman, S., Artsob, H., Emery, S., Maxie, M.G., Pooley, D., Barker, I.K., Surgeoner, G.A. et Mahdym M.S. (1995). Eastern equine encephalitis in a horse from Southwestern Ontario, *Canadian Veterinary Journal*, 36, p. 170-171.

Carpenter, D. (1995). Communication personnelle.

Carpentier, A. (1996). Flood of July 19-20-21, 1996: northern region of St. Lawrence River, Quebec, *Water News*, 15, p. 1-5.

CCME (1996). *Smog in Canada*, document personnel, Downsview (Ont.), 1 p.

CDC (1989). Heat-related deaths--Missouri, 1979-1989, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 38, p. 437-439.

CDC (1993). Heat-related deaths--United States, 1993, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 42, p. 558-560.

CDC (1994). Heat-related deaths--Philadelphia and United States, 1993-1994, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 43, p. 453-455.

CDC (1995). Heat-related illnesses and deaths--United States, 1994-1995, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 44, p. 465-468.

Chan, C., Ozkaynak, M., Spengler, J. et Lefkopoulou, M. (1991). Driver exposure to volatile organic compounds, CO, ozone and $NO_2$ under different driving conditions, *Environmental Science and Technology*, 25, p. 964-972.

Chivian, E., McCally, M. et Hu, M. (dir.) (1993). *Critical Condition: Human Health and the Environment*, MIT Press, Cambridge (Mass.), 296 p.

Choudry, A., Gordian, M. et Morris, S. (1997). Associations between respiratory illness and PM10 air pollution, *Archives of Environmental Health*, 52, p. 113-117.

Chow, M. (1993, inédit). *A Case-control Study of Endemic Giardiasis in Waterloo Region*, projet de maîtrise ès sciences, Department of Population Medicine, Université de Guelph, Guelph (Ont.).

City of Toronto, Department of Public Health (1993). *Outdoor Air Quality in Toronto: Issues and Concerns*, Department of Public Health, Toronto (Ont.), 172 p.

Costero, A. (1990). Identification of the Lyme disease vector in Canada, *Canada Diseases Weekly Report*, 16-30, p. 142-147.

Crapo, J., Miller, F. et Mossman, B. (1992). Relationship between acute inflammatory responses to air pollutants and chronic lung disease, *American Review of Respiratory Diseases*, 145, p. 506-1512.

D'Arcy, C., Armstrong, B. et Keenan, P. (1986). Relationship of cutaneous malignant melanoma to individual sunlight exposure habits, *Journal of the National Cancer Institute*, 76, p. 403-413.

Delfino, R., Becklake, M., Hanley, J. et Singh, B. (1994). Estimation of unmeasured particulate air pollution data for epidemiological study of daily respiratory morbidity, *Environmental Research*, 67(1), p. 20-38.

Den Hollander, N. et Noteboom, R. (1996). *Toxoplasma gondii* in Ontario and water-borne toxoplasmosis in Victoria, BC, *Public Health and Epidemiology Report Ontario*, 7, p. 28-31.

Devlin, R., McDonnell, W., Mann, R., Becker, S., House, D.E., Schreinemachers, D. et Koren, H.S. (1991). Exposure of humans to ambient levels of ozone for 6.6 hours causes cellular and biochemical changes in the lung, *American Journal of Respiratory Cell and Mollecular Biology*, 4(1), p. 72-81.

Dockery, D., Speizer, F., Stram, D., Ware, J.H., Spengler, J.D. et Ferris, B.G. Jr. (1989). Effects of inhalable particles on respiratory health of children, *American Review of Respiratory Diseases*, 139(3), p. 587-594.

Dockery, D.W., Pope, A.C. III, Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G. Jr. et Speizer, F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities, *New England Journal of Medicine*, 329(24), p. 1753-1759.

Dolezal, J., Perkins, E. et Walker, R. (1989). Sunlight, skin sensitivity and senile cataract, *American Journal of Epidemiology*, 129, p. 559-568.

Dragon, D. et Rennie, R. (1995). The ecology of anthrax spores: tough but not invincible, *Canadian Veterinary Journal*, 36, p. 295-301.

Draper, N. et Smith, H. (1981). *Applied Regression Analysis*, John Wiley, New York (N.Y.), 709 p.

Dubey, J. et Beattie, C. (1988). *Toxoplasmosis of Animals and Man*, CRC Press, Boca Raton (Fla.), 220 p.

Dubos, R. (1965). *Man Adapting*, Yale University Press, New Haven (Conn.), 576 p.

Duncan, K. (1996). « Anthropogenic greenhouse gas-induced warming: suitability of temperatures for the development of vivax and falciparum malaria in the Toronto region of Ontario », dans L. Mortsch et B. Mills (dir.), *Great Lakes-St. Lawrence Basin Project Progress Report #1: Adapting to the Impacts of Climate Change and Variability*, Burlington (Ont.), p. 112-118.

Duncan, K. (1997, présentation). Human health--North America, GIEC Regional Impact Assessment.

EEO (1992). *Acid Rain*, document personnel, Downsview (Ont.), 2 p.

Elwood, J. (1992). Primary prevention and early diagnosis of melanoma in Canada: some options for development, *Chronic Diseases in Canada*, 13, p. 102-110.

Emberlin, J. (1994). The effects of patterns in climate and pollen abundance on allergy, *Allergy*, 49, p. 15-20.

Environnement Canada (1990). *Canadian Emissions Inventory of Common Air Contaminants (1985)*, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 51 p.

Environnement Canada (1995a). Air Quality Trends in Canadian Cities 1979-1992, Internet: ftp://alternatives.com/library/envcan/airqual.txt.

Environnement Canada, Smith et Lavendar Environmental Consultants, Sustainable Futures (1995b). *Climate Change Impacts: an Ontario Perspective*, Environnement Canada, Burlington (Ont.), 76 p.

Environnement Canada (1996a). *Acid Rain* (SOE Bulletin n° 96-2). Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 8 p.

Environnement Canada (1996b). Atlantic Region Air Issues Strategy, Internet: http://www.ec.gc.ca/reports/soe.html.

Environmental Health Directorate, Health and Welfare Canada (1991). *Global Climate Change--Health Issues and Priorities*, Environmental Health Directorate, Ottawa (Ont.), 160 p.

EPA (1982). *Air Quality Criteria for Oxides of Nitrogen* (*Final Draft)*. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park (N.C.), pages div.

Epstein P. et Rapport, D. (1996). Changing coastal marine environments and human health, *Ecosystem Health*, 2, p. 166-176.

Etkin, D. (1996). « The economic impact of weather-related disasters in Canada », dans *Clean Air, Clean Water, Proceedings of the Climate Variability, Atmospheric Change and Human Health Conference held November 4-5, 1996 in Toronto, Ontario,* K.B. Ogilvie, R. White, D.V.J. Bell et Q. Chiotti (dir.), Pollution Probe, Toronto (Ont.), p. 37-40.

Evans, R., Barer, M. et Marmor, T. (1994). *Why Are Some People Healthy and Others Not?* Aldine de Gruyter, New York (N.Y.), 378 p.

Fergusson, A. (1997). Communication écrite.

Folinsbee, L. (1992). Human health effects of air pollution, *Environmental Health Perspectives*, 100, p. 45-56.

Franklin, C.A., Burnett, R.T., Paolini, R.J. et Raizenne, M.E. (1985). Health risks from acid rain. A Canadian perspective, *Environmental Health Perspectives*, 63, p. 155-168.

Funtowicz, S. et Ravetz, J. (1993). Science for the post-normal age, *Futures*, 25, p. 1-17.

Gainer, R. et Saunders, R. (1989). Aspects of the epidemiology of anthrax in Wood Buffalo National Park and environs, *Canadian Veterinary Journal*, 30, p. 953-955.

Gallagher, R. (1992). Solar UVR and non-melanocytic skin cancer, *Chronic Diseases in Canada*, 13, p. S21-S22.

Gallagher, R., Elwood, J. et Hill, G. (1986). Risk factors for cutaneous malignant melanoma: the Western Canada Melanoma Study, *Recent Results in Cancer Research*, 102, p. 38-55.

Gallagher, R., Hill, G., Bajdik, C., Fincham, S., Coldman, A.J., McLean, D.I. et Threlfell, W.J. (1995a). Sunlight exposure, pigmentary factors and risk of non-melanocytic skin cancer I. Basal cell carcinoma, *Archives of Dermatology*, 131(2), p. 157-163.

Gallagher, R., Hill, G., Bajdik, C. , Fincham, S., Coldman, A.J., McLean, D.I. et Threlfell, W.J. (1995b). Sunlight exposure, pigmentary factors and risk of non-melanocytic skin cancer II. Sqamous cell carcinoma, *Archives of Dermatology*, 131(2), p. 164-169.

Galloway, T., Cristie J., Sekla, L. et Stackiw, W. (1991). Current status of the Lyme Borreliosis vector, *Ixodes dammini*, dans Manitoba, *Canada Diseases Weekly Report*, 17-47, p. 259-264.

Ghushalak, B. (1995). Communication personnelle.

Goldstein, A. et Tucker, M. (1993). Etiology, epidemiology, risk factors and public health issues of melanoma, *Current Opinions in Oncology*, 5, p. 358-363.

Goldstein, B. et Reed, D. (1991). Global atmospheric changes and research needs in environmental health science, *Environmental Health Perspectives*, 96, p. 193-196.

Goldstein S., Juranek, D., Ravenholdt, O., Hightower, A.W., Martin, D.G., Mesnik, J.L., Griffiths, S.D., Bryant, A.J., Reich, R.R. et Herwaldt, B.L. (1996). Cryptosporidiosis: an outbreak associated with drinking water despite state-of-the-art water treatment, *Annals of Internal Medicine*, 124, p. 459-468.

Gorham, E., Garland, C. et Garland, F. (1989). Acid haze air pollution and breast and colon cancer mortality in 20 Canadian cities, *Canadian Journal of Public Health*, 80, p. 96-100.

Goyer, R., Bachmann, J., Clarkson, T., Ferris, B.G. Jr., Graham, J., Mushak, P., Perl, D.P., Rall, D.P., Schlesinger, R. et Sharpe, W. (1985). Potential human health effects of acid rain: report of a workshop, *Environmental Health Perspectives*, 60, p. 355-368.

Graham, S., Marshall, J., Haughey, B., Stoll, H., Zielezny, M., Brasure, J. et West, D. (1985). An inquiry into the epidemiology of melanoma, *American Journal of Epidemiology*, 122(4), p. 606-619.

Grant, L. (1991). « Human health effects of climate change and stratospheric ozone depletion », dans Environmental Health Directorate (dir.), *Global Climate Change--Health Issues and Priorities*, Santé Canada, Ottawa (Ont.), p. 72-77.

Green, A., Bain, C., McLennan, R. et Siskind, V. (1986). Risk factors for cutaneous melanoma in Queensland, *Recent Results in Cancer Research*, 102, p. 76-97.

Guidotti, T. (1994). « The environment and health », dans R. McCunney (dir.) *A Practical Approach to Occupational and Environmental Medicine*, Little, Brown and Co., Boston (Mass.).

Guidotti, T. (1996). *Implications for Human Health of Global Ecological Change*. Canadian Association of Physicians for the Environment, Edmonton (Alb.).

Guidotti, T. et Last, J. (1993). Implications for human health of global atmospheric change, *Transactions of the Royal Society of Canada*, 6, p. 223-229.

Gurinder, S., Barry, L. et Louis, G. (1997). « The Environment-Development-Health Interface », dans S. Gurinder, L. Barry et T. Kjellstrom (dir.). *International Perspectives on Environment, Development and Health: Toward a Sustainable World*, p. 1-20.

Hackney, J., Linn, W. et Avol, E. (1989). Acid fog: effects on respiratory function and symptoms in healthy and asthmatic volunteers, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 159-162.

Hancock, T. et Davies, K. (1997). *An Overview of the Health Implications of Global Environmental Change: a Canadian Perspective*, unpublished report, Programme canadien des changements à l'échelle du globe, Royal Society of Canada, Ottawa (Ont.), 27 p.

Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S., Ruedy, R., Russell, G. et Stone, P. (1988). Global climate changes as forecast by the GISS 3-D model, *Journal of Geophysical Research*, 93(D8), p. 9341-9364.

Harvey, I., Frankel, S., Marks, R., Shalom, D. et Nolan-Farrell, M. (1996). Non-melanotic skin cancer and solar keratoses ll: analytical results of the South Wales Skin Cancer Study, *British Journal of Cancer*, 74(8), p. 1308-1312.

Hatch, G., Boykin, E., Graham, J.A., Lewtas, J., Pott, F., Laid, K. et Mumford, J.L. (1985). Inhalable particles and pulmonary host defense: in vivo and in vitro effects of ambient air and combustion particles, *Environmental Research*, 36, p. 67-80.

Haworth, J. (1988). « The global distribution of malaria and the present control effort », dans W. Wernsdorfer (dir.), *Malaria: Principles and Practice of Malariology*, p. 1379-1420.

Health Effects Review (1996). Methyl mercury, 1, p. 1-2.

Health Futures Research (1994). *World Health Statistics Quarterly*, 47(3), p. 98-188.

Heath, S., Artsob, H., Bell, R. et Harland, R. J. (1989). Equine encephalitis caused by snowshoe hare (California serogroup) virus, *Canadian Veterinary Journal*, 30, p. 669-672.

Hengeveld, H. (1995). *Understanding Atmsopheric Change: A Survey of the Background Science and Implications of Climate Change and Ozone Depletion, 2nd edition*, SOER Report 95-2, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 68 p.

Herrera-Basto, E., Prevots, D., Zarate, M., Silva, L. et Sepulveda-Amor, J. (1988). First reported outbreak of classical dengue fever at 1,700 meters above sea level in Guerrero State, Mexico, June 1988, *American Journal of Tropical Medicine*, 46, p. 649-653.

Hilborn, J. et Still, M. (1990). *Canadian Perspectives on Air Pollution*, ministère d'Approvisionnements et Services Canada, Ottawa (Ont.).

Holland, W.W., Bennett, A.E., Cameron, I.R., Florey, C.V., Leeder, S.R., Schilling R.S., Swan, A.V. et Waller, R.E. (1979). Health effects of particulate pollution: reappraising the evidence, *American Journal of Epidemiology*, 110(5), p. 527-659.

Holly, E., Aston, D., Cress, R., Ahn, D. K. et Kristiansen, J.J. (1995). Cutaneous melanoma in women I. Exposure to sunlight, ability to tan, and other risk factors related to ultraviolet light, *American Journal of Epidemiology*, 141, p. 923-933.

Holman, C.D., Armstrong, B.K., Heenan, P.J., Blackwell, J.B., Cumming, F.J., English, D.R., Holland, S., Kelsall, G.R., Matz, L.R. et Rouse, I.L. (1986). The causes of malignant melanoma: results from the West Australia Lions Melanoma Research Project, *Recent Results in Cancer Research*, 102, p. 18-37.

Huq, A. et Colwell, R. (1996). Vibrios in the marine and estuarine environment: tracking *Vibrio cholerae*, *Ecosystem Health*, 2, p. 198-209.

IARC (1992). *Solar and Ultraviolet Radiation. IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, IARC 55, Lyon (France), 316 p.

GIEC (1996). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harrism H., Kattenberg, A. et Maskell, K. (dir.), Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), 572 p.

Jahn, M., Kluge, E. et Enzian, S. (1996). Influence of climate diversity on fungal diseases of field crops-evaluation of long-term monitoring data, *Aspects of Applied Biology*, 45, p. 247-252.

Jones, T.S., Liang, A.P., Kilbourne, E.M., Griffin, M.R., Patriarca, P.A., Nassilak, S.G., Mullan, R.J., Herrick, R.F., Donnell, H.D. Jr., Choi, K. et Thacker, S.B. (1982). Morbidity and mortality associated with the July 1980 heat wave in St. Louis and Kansas City, *Journal of the American Medical Association*, 247, p. 3327-3331.

Kalkstein, L. (1988). The impacts of predicted climate change on human mortality, *Publications in Climatology*, 41, p. 1-127.

Kalkstein, L. (1991a). A new approach to evaluate the impact of climate upon human mortality, *Environmental Health Perspectives*, 96, p. 145-150.

Kalkstein, L. (1991b). « The potential impact of global warming: climate change and human mortality », dans R. Wyman (dir.), *Global Climate Change and Life on Earth*, Routledge, Chapman and Hall, New York (N.Y.), p. 216-223.

Kalkstein, L. (1993). Health and climate change - direct impacts in cities, *The Lancet*, 342, p. 1397-1399.

Kalkstein, L. (1995). Lessons from a very hot summer, *The Lancet*, 346, p. 857-859.

Kalkstein, L., Tan, G. et Skindlov, J. (1987). An evaluation of objective clustering procedures for use in synoptic climatological classification, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, p. 717-730.

Kalkstein, L. et Davis, R. (1989). Weather and human mortality: an evaluation of demographic and inter-regional responses in the United States, *Annals of the Association of American Geographers*,79, p. 44-64.

Kalkstein, L. et Smoyer, K. (1993a). *The Impact of Climate on Canadian Mortality: Present Relationships and Future Scenarios*, CCC Report 93-07, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ont.), 50 p.

Kalkstein, L. et Smoyer, K. (1993b). The impact of climate change on human health: some international implications, *Experientia*, 49, p. 969-979.

Kalkstein, L., Maunder, W. et Jendritzky, G. (1996). *Climate and Human Health*, OMM, OSM, PNUE, Genève (Suisse), 24 p.

Kalkstein, L., Jamason, P., Greene, J., Libby, J. et Robinson, L. (1996). The Philadelphia Hot Weather-Health Watch/Warning System: development and application, summer 1995, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, p. 1519-1528.

Katsouyanni, K., Pantazopoulu, A. et Touloumi, G. (1993). Evidence for interaction between air pollution and high temperature in the causation of excess mortality, *Archives of Environmental Health*, 48, p. 235-242.

Kay, D., Fleisher, J., Salmon, R., Jones, F., Wyer, M.D., Godfree, A.F., Zelenauch-Jacquotte, Z. et Shore, R. (1994). Predicting likelihood of gastroenteritis from sea bathing: results from randomized exposure, *The Lancet*, 344, p. 905-909.

Keane, D. et Little, P.(1987). Equine viral encephalomyelitis in Canada: a review of known and potential causes, *Canadian Veterinary Journal*, 28, p. 497-503.

Kerr, J. et McElroy, C. (1993). Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion, *Science*, 262, p. 523-524.

Kingscote, B.(1986). Leptospirosis in red foxes in Ontario, *Journal of Wildlife Diseases*, 22, p. 475-478.

Kingscote, B. (1988). Leptospiral antibodies in cattle in Alberta and evidence of an emerging serovar, *Canadian Veterinary Journal*, 29, p. 647-654.

Kingscote, B. et Proulx, J. (1986). The successful management of *Leptospira hardjo* infection in a beef herd in northern Ontario, *Canadian Veterinary Journal*, 27, p. 435-439.

Kingscote, B. et Wilson, D. (1986). *Leptospira pomona* abortion storm in a cattle herd in Saskatchewan, *Canadian Veterinary Journal*, 27, p. 440-442.

Kinney, P. et Ozkaynak, H. (1991). Associations of daily mortality and air pollution in Los Angeles County, *Environmental Research*, 54, p. 99-120.

Kirkpatrick, M., Sheppard, D., Nadel, J. et Boushey, H.A. (1982). Effects of the oronasal breathing route on sulphur dioxide-induced bronchoconstriction in exercising asthmatic subjects, *American Review of Respiratory Diseases*, 125(6), p. 627-631.

Kitson-Piggot, A. et Prescott, J. (1987). Leptospirosis in horses in Ontario, *Canadian Journal of Veterinary Research*, 51, p. 448-451.

Kleinman, M.T., Davidson, D.M., Vandagriff, R.B., Caiozzo, V.J. et Whittenberger, J.L. (1989). Effects of short-term exposure to carbon monoxide in subjects with coronary artery disease, *Archives of Environmental Health*, 44, p. 361-369.

Klich, M., Lankester, M. et Wu, K. (1996). Spring migratory birds extend the northern occurrence of Blacklegged Tick, *Journal of Medical Entomology*, 33, p. 581-585.

Kolomeychuk, R., Yeager, K., Speigel, J. *et al.* (1983). Effects of Automotive Emissions. Task I Final Report for the Socio-Economic Impact Analysis on the Proposed Revision of Automotive Emission Standards, prepared for Air Pollution Control Directorate, Environnement Canada, octobre 1983, Ottawa (Ont.), pages div.

Kricker, A., Armstrong, B. et Dallas, R. (1994). Sun exposure and non-melanocytic skin cancer, *Cancer Causes and Control*, 5, p. 367-392.

Larson T. (1989). The influence of chemical and physical forms of ambient air acids on airway doses, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 7-13.

Last, J. (1983). *A Dictionary of Epidemiology*, Oxford University Press, New York (N.Y.), 141 p.

Last, J. (1987). *Maxcy-Rosenau-Last Public Health and Preventive Medicine, 13th edition*, Appleton and Lange, Stanford (Conn.), 1257 p.

Last, J. (1989). A vision of health in the twenty-first century: medical response to the greenhouse effect, *Canadian Medical Association Journal*, 140, p. 1277-1279.

Last, J. (1991). Global atmospheric change: potential health effects of acid aerosol and oxidant gas mixtures, *Environmental Health Perspectives*, 96, p. 151-157.

Last, J. (1993a). A challenge for the medical profession, *Annals of the Royal College of Physicians and Surgeons of Canada*, 26, p. 13-16.

Last, J. (1993b). Global change; ozone depletion, greenhouse warming, and public health, *Annual Review of Public Health*, 14, p. 115-136.

Last, J. (1995). Redefining the unacceptable, *Lancet*, 346, p. 1642-1643.

Last, J. et Guidotti, T. (1990/1991). Implications for human health of global ecological changes, *Public Health Review*, 18, p. 49-67.

Lioy, P. et Waldman, J. (1989). Acidic sulfate aerosols: characterization and exposure, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 15-34.

Litsios, S. (1996). *The Tomorrow of Malaria*, Pacific Press, Wellington (Nouvelle-Zélande), 181 p.

Lycka, B. (1986). Lyme disease in Canada?, *Canadian Medical Association Journal*, 134, p. 48-49.

MacKenzie, S.G. (1990). Lyme disease in Canada, *Canada Diseases Weekly Report*, 16-30, p. 141-142.

MacKenzie, W., Hoxie, N., Proctor, M., Gradus, M.S., Blair, K.A., Peterson, D.E., Kazmierczak, J.J., Addiss, D.G., Fox, K.R., Rose, J.B. et Davis, J.P. (1994). A massive outbreak in Milwaukee of *Cryptosporidium* infection transmitted through the public water supply, *New England Journal of Medicine*, 331, p. 161-167.

Madronich, S., McKenzie, M., Caldwell, M. et Björn, L.O. (1995). Changes in ultraviolet radiation reaching the Earth's surface, *Ambio*, 24(3), p. 143-152.

Mandell, G., Bennett, J. et Dolin, R. (1995). *Principles and Practice of Infectious Diseases*, Churchill Livingstone, New York (N.Y.), 2 803 p.

Marks, R. (1996). Squamous cell carcinoma, *The Lancet*, 347, p. 735-738.

Martens, W.J.M., Jetten, T.H., Rotmans, J. et Niessen, L.W. (1995). Climate change and vector-borne diseases: a global modelling perspective, *Global Environmental Change*, 5(3), p. 195-209.

Martin, P. et Lefebvre, M. (1995). Malaria and climate: sensitivity of malaria potential transmission to climate, *Ambio*, 24, p. 200-207.

Mathias, R. (1996). Communication personnelle.

May, J. (1961). *Studies in Disease Ecology*, Hafner Publishing Company, New York (N.Y.), 613 p.

McKenzie, R.C. et Sauder, D.N. (1994). Ultraviolet radiation: effects on the immune system, *Annals of the Royal College of Physicians and Surgeons of Canada*, 27(1), p. 20-26.

McLean, R., Frier, G., Parham, G., Francy, D.B., Monath, T.P., Campos, E.G., Therrien, A., Kerschner, J. et Calisher, C.H. (1985). Investigations of the vertebrate hosts of Eastern equine encephalitis during an epizootic in Michigan, 1980, *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 34, p. 1190-1202.

McMichael, A. (1993). *Planetary Overload*, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), 352 p.

McMichael, A.J., Ando, M., Carcavallo, R., Epstein, P., Haines, A., Jendritzky, G., Kalkstein, L., Odongo, R., Patz, J., Piver, W., Anderson, R., Curto de Casas, S., Galindex Giron, I., Kovats, S., Martens, W.J.M., Mills, D., Moreno, A.R., Reisen, W., Slooff, R., Waltner-Toews, D. et Woodward, A. (1996a). Human population health, dans R. Watson, M. Zinwoyera et R. Moss (dir.), *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, Contribution of Working Group 2 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (G.-B.), p. 561-584.

McMichael, A., Haines, A., Slooff, R. et Kovats, S. (1996b). *Climate Change and Human Health*, OMS, Genève (Suisse), 297 p.

McMichael, A., Bolin, B., Costanza, R. et Daily G.C. (1996c). *Sustainable health in a globalized world*, Discussion Paper No. 87, International Institute of Ecological Economics, Royal Swedish Academy of Science, Stockholm (Suède), 87 p.

Meade, M., Florin, J. et Gesler, M. (1988). *Medical Geography*, The Guildford Press, New York (N.Y.), 340 p.

Meinhardt, P., Casemore, D. et Miller, K. (1996). Epidemiological aspects of human cryptosporidiosis and the role of waterborne transmission, *Epidemiological Review*, 18, p. 118-136.

Moore, A., Helwaldt, B., Craun, G., Calderon, R.L., Highsmith, A.K. et Junarek, D.D. (1993). Surveillance for waterborne disease outbreaks - United States, 1991-1992, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 42, p. 1-22.

Mills, C. et Jackson, S. (1995). Public education messages for reducing health risks from ultraviolet radiation, *Chronic Diseases in Canada*, 16, p. 33-36.

Morison, W. (1989). Effects of ultraviolet radiation on the immune system in humans, *Photochemistry and Photobiology*, 50, p. 515-524.

Mullens, A. (1996). I think we have a problem in Victoria: MDs respond quickly to toxoplasmosis outbreak in BC, *Canadian Medical Association Journal*, 154, p. 1721-1724.

Nadakavukaren, A. (1995). « Our Global Environment: A Health Perspective », Eaveland Press, p. 492-502.

Neiding von, G., Krakeler, H., Fuhs, R. *et al*. Int. Arch. Arbeitsmed. 1973; 31, 61, tel que cité par le Federal/ Provincial Research and Monitoring Co-ordinating Committee (RMCC) for the Development of the National Nitrogen Oxides (NOx) and Volatile Organic Compounds (VOC) Management Plan for Canada, printemps 1989.

Nelemans, P., Groenendal, H., Kiemeney, L., Rampen, F.H., Ruiter, D.J. et Verbeek, A.L. (1993). Effect of intermittent exposure to sunlight on melanoma risk among indoor workers an sun-sensitive individuals, *Environmental Health Perspectives,* 101, p. 252-255.

Olivotto, C. (1997). Communication écrite.

OMM (1987). *Climate and Human Health. Proceedings of the WMO/WHO/UNEP Symposium, Leningrad, September 1986. Vol.1/2*, WMO World Climate Programme Applications, Genève (Suisse), 16 p.

OMM (1992). *WMO and the Ozone Issue*, OMS, Genève (Suisse), 16 p.

OMM/PNUEP (1995). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 37*, OMS, Genève (Suisse) (paginations div.).

Ontario Lung Association (1991). *Lung Facts*, Toronto (Ont).

Osewe, P., Addiss, D., Blair, K., Hightower, A., Kamb, M.L. et Davis, J.P. (1996). Cryptosporidiosis in Wisconsin: a case-control study of post-outbreak transmission, *Epidemiology and Infection*, 117, p. 297-304.

Osterlind, A., Tucker, M., Stone, B. et Jensen, O.M. (1988). The Danish Case-Control Study of Cutaneous Malignant Melanoma ll: importance of UV light exposure, *International Journal of Cancer*, 42, p. 319-324.

Pearce, F. (1995). Global alert over malaria, *New Scientist*, 146, p. 5.

Phelps, P. (1996). *Conference on Human Health and Global Climate Change: Summary of the Proceedings*, National Academy Press, Washington (D.C.).

PNUE (1994). *Environmental Effects of Ozone Depletion: 1994 Assessment*, PNUE, Nairobi (Kenya), pages div.

Pope, C. (1991). Respiratory hospital admissions associated with PM10 in Utah, Salt Lake, and Cahe Valleys, *Archives of Environmental Health*, 46, p. 7-9.

Pope, C., Bates, D. et Raizenne, M. (1995). Health effects of particulate air pollution: time for reassessment?, *Environmental Health Perspectives*, 103, p. 472-480.

Prescott, J. (1986). Leptospirosis in farm animals: the hidden disease, *Canadian Veterinary Journal*, 27, p. 424-445.

Prescott, J., Ferrier, R., Nicholson, V., Johnston, K.M. et Hoff, B. (1991). Is canine leptospirosis underdiagnosed in southern Ontario? A case report and serological survey, *Canadian Veterinary Journal*, 32, p. 481-485.

Prescott, J., Gignac, A., Nicholson, V. et Marrie, T. (1992). Prevalence of antibody to leptospiral serovars in veterinarians and slaughterhouse workers in Nova Scotia, *Canadian Veterinary Journal*, 33, p. 276.

Prescott, J., Miller, R. et Nicholson, V. (1987). Isolation of *Leptospira hardjo* from kidneys of Ontario cattle at slaughter, *Canadian Journal of Veterinary Research*, 51, p. 229.

Prescott, J., Miller, R., Nicholson, V., Martin, S.W. et Lesnick, T. (1988). Seroprevalence and association with abortion of leptospirosis in cattle in Ontario, *Canadian Journal of Veterinary Research*, 52, p. 210-215.

*Proceedings of the Acidifying Emissions Symposium* (1996). Held at Red Deer Lodge, Red Deer, Alberta, April 15-17, 1996, Clean Air Strategic Alliance, Edmonton (Alb.), pages div.

Programme canadien des changements à l'échelle du globe (1995). *Implications of Global Change for Human Health: Final Report of the Health Issues Panel of the Canadian Global Change Program*, La Société royale du Canada, Ottawa (Ont.), 29 p.

Raizenne, M., Burnett, R., Stern, B., Franklin, C.A. et Spender, J.D. (1989). Acute lung function responses to ambient acid aerosols in children, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 179-185.

Reeves, W., Hardy, J., Reisen, W. et Milby, M.M. (1994). Potential effect of global warming on mosquito-borne arboviruses, *Entomological Society of America*, 31, p. 323-332.

Rivest, N., Jobin, J. et Gaudreau, C. (1989). Leptospirosis: a diagnosis to be kept in mind, *Canada Diseases Weekly Report*, 15, p. 13-16.

Rotton, J. (1983). Angry, sad, happy? Blame the weather, *U.S. News and World Report*, 95, p. 52-53.

Schantz, P. (1991). Parasitic zoonoses in perspective, *International Journal for Parasitology*, 21, p. 161-170.

Schwartz, J. (1994). Air pollution and daily mortality: a review and meta-analysis, *Environmental Research*, 64, p. 36-52.

Schwartz, J., Hasselblad, V. et Pitcher, H. (1988). Air pollution and morbidity: a further analysis of the Los Angeles student nurses data, *Journal of the Air Pollution Association*, 38, p. 158-162.

Schwartz, J. et Dockery, D. (1992a). Increased mortality in Philadelphia associated with daily air pollution concentrations, *American Review of Respiratory Diseases*, 154, p. 600-604.

Schwartz, J. et Dockery, D. (1992b). Particulate air pollution and daily mortality in Steubenville, Ohio, *American Journal of Epidemiology*, 135, p. 12-19.

Schwartz, J., Slater, D., Larson, T.V., Pierson, W.E. et Koenig, J.Q. (1993). Particulate air pollution and hospital emergency room visits for asthma in Seattle, *American Review of Respiratory Diseases*, 147, p. 826-831.

Schwartz, J. et Morris, R. (1995). Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Detroit, Michigan, *American Journal of Epidemiology*, 142, p. 23-35.

Scott, W. (1989). Acid rain: What we know, what we did, what we will do, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 18, p. 75-82.

Seaton, A. (1996). Particles in the air: the enigma of urban air pollution, *Journal of the Royal Society of Medicine*, 89, p. 604-607.

Sekla, L. (1976). Analysis of Western encephalomyelitis surveillance and control programs in Manitoba, 1975, *Canadian Journal of Public Health*, 67, p. 72-73.

Sekla L. (1988). Serologic study of Lyme Disease prevalence in Manitoba, *Canada Diseases Weekly Report*, 15-27, p. 137-140.

Sekla, L., Stackiw, W., Poffenroth, L. et Roberts, A. (1990). Lyme Disease in Manitoba?, *Canada Diseases Weekly Report*, 16-30, p. 147-152.

Sellers, R. (1983). Seasonal variations in spread of arthropod-borne disease agents of man and animals: implications for control, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 302, p. 485-495.

Sellers, R. (1989). Eastern equine encephalitis in Quebec and Connecticut, 1972: introduction by infected mosquitoes on the wind?, *Canadian Journal of Veterinary Research*, 53, p. 76-79.

Sellers, R. et Maarouf, A. (1988). Impact of climate on Western equine encephalitis in Manitoba, Minnesota and North Dakota, 1980-1983, *Epidemiology and Infection*, 101, p. 511-535.

Seyfried, P., Tobin, R., Brown, N. et Ness, P.F. (1985). A prospective study of swimming related illness II. Morbidity and the microbial quality of water, *American Journal of Public Health*, 75, p. 1071-1075.

Shepherd, M. et McMillan, A. (1996). *Atmospheric Particulate Matter: Science Briefing Note*, document personnel, Downsview (Ont.), 2 p.

Shumway, R., Azari, A. et Pawitan, Y. (1988). Modelling mortality fluctuations in Los Angeles as functions of pollution and weather effects, *Environmental Research*, 45, p. 224-241.

Shy, C.M., Hassalblad, V., Burton, R.M., Nelson, C.J. et Cohen, A.A. (1973). Air pollution effects on ventilatory function of U.S. school children. Results of studies in Cincinnati, Chattanooga, and New York, *Archives of Environmental Health*, 27(3), p. 124-128.

Slocombe, J.(1990). Heartworm in dogs in Canada in 1989, *Canadian Veterinary Journal*, 31, p. 449-505.

Slocombe, J. et McMillan, I. (1978). « The geographic distribution of heartworm in Canada », dans H. Morgan, (dir.), *Proceedings of the Heartworm Symposium - 1977*, VM Publishing Inc., Bonner Springs (Kans.), p. 5-7.

Slocombe, J. et Villeneuve, A. (1993). Heartworm in dogs in Canada in 1991, *Canadian Veterinary Journal*, 34, p. 630-633.

Smith, J. et Tirpak, D. (1989). *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States*, Report to Congress, Washington, D.C., U.S. Environmental Protection Agency, Office of Policy, Planning, and Evaluation, EPA 230-05-89-050, 413 p.

Soskolne, C., Pagano, G., Cipollaro, M., Beaumont, J.J. et Giordano, G.G. (1989). Epidemiologic and toxicologic evidence for chronic health effects and the underlying biologic mechanisms involved in sublethal exposures to acidic pollutants, *Archives of Environmental Health*, 44(3), p. 180-191.

Speizer, F. (1989). Studies of acid aerosols in six cities and in a new multi-city investigation: design issues, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 61-67.

Spengler, J., Keeler, G., Koutrakis, P., Ryan, P.B., Raizenne, M. et Franklin, C.A. (1989). Exposure to acidic aerosols, *Environmental Health Perspectives*, 79, p. 43-51.

Stacy, R.W., Seal, E. Jr., House, D.E., Green, J., Roger, L.J. et Raggio, L. (1983). A survey of effects of gaseous and aerosol pollutants on pulmonary function of normal males, *Archives of Environmental Health*, 38(2), p. 104-115.

Statistique Canada (1996a). *Apparent per Capita Food Consumption in Canada-1995*, Statistics Canada, Part I, Catalogue # 32-229-XPB, Ottawa (Ont.), 35 p.

Statistique Canada (1996b). *Apparent per Capita Food Consumption in Canada-1995*, Statistics Canada, Part II, Catalogue # 32-230-XPB, Ottawa (Ont.), 55 p.

Stephen, C., Johnson, M. et Bell, A. (1994). First reported cases of Hantavirus Pulmonary Syndrome in Canada, *Canada Communicable Disease Report*, 20, p. 121-125.

Stieb, D., Pengelly, L. et Arron, N. (1995). Health effects of air pollution in Canada: Expert panel findings for The Canadian Smog Advisory Program, *Canadian Respiratory Journal*, 2, p. 155-160.

Stokes, J., Noren, J. et Shindell, S. (1982). Definition of terms and concepts applicable to clinical preventive medicine, *Journal of Community Health*, 8, p. 33-41.

Stolarsky, R., Bloomfield, P., McPeters, R. *et al.* (plus de 100 co-auteurs) (1991). Total ozone trends reduced from Nimbus 7 TOMS data, *Geophysical Research Letters*, 18, p. 1015-1018.

Task Force Report (1976). *Theory, Practice and Application of Prevention in Environmental Health Services--Social Determinants of Human Health*, Prodist, New York (N.Y.), 146 p.

Tavares, D. (1996). « Weather and heat-related morbidity relationships in Toronto (1979-1989) », dans L. Mortsch et B. Mills (dir.), *Great Lakes-St. Lawrence Basin Project Progress Report #1: Adapting to the Impacts of Climate Change and Variability*, Environnement Canada, p. 110-112.

Taylor, H., West, S., Rosenthal, F., Munoz, B., Newland, H.S., Abbey, H. et Emmett, E.A. (1988). Effects of UVR on cataract formation, *New England Journal of Medicine*, 319, p. 1429.

Tester, P. (1994). « Harmful marine phytoplankton and shellfish toxicity », dans M. Wilson, R. Levins et A. Spielman (dir.), *Disease in Evolution*, The New York Academy of Sciences, New York (N.Y.), p. 69-76.

The Italian-American Cataract Study Group (1991). Risk factors for age-related cortical, nuclear, and posterior subcapsular cataracts, *American Journal of Epidemiology*, 133, p. 541-543.

The State of Canada's Environment (1991). Government of Canada, Ottawa (paginations div.).

Thurston, G., Ito, K., Hayes, C., Bates, D.V. et Lippmann, M. (1994). Respiratory hospital admissions and summertime haze air pollution in Toronto, Ontario: consideration of the role of acid aerosols, *Environmental Research*, 65, p. 271-290.

Tizard, I., Chauhan, S. et Lai, C. (1977). The prevalence and epidemiology of toxoplasmosis in Ontario, *Journal of Hygiene Cambridge*, 78, p. 275-289.

Tizard, I., Harmeson, J. et Lai, C.(1978). The prevalence of serum antibodies to *Toxoplasma gondii* in Ontario Mammals, *Canadian Journal of Community Medicine*, 42, p. 177-183.

Todd, E.(1993). Domoic acid and amnesic shellfish poisoning - a review, *Journal of Food Protection*, 56, p. 69-83.

Todd, E. (1994). Emerging diseases associated with seafood toxins and other water-borne agents, dans M. Wilson, R. Levins et A. Spielman (dir.), *Disease in Evolution*, New York Academy of Sciences, New York (N.Y.), p. 77-94.

Todd, M. et Carter, A. (1989). Lyme Disease in Canada - 1989 update, *Canada Diseases Weekly Report*, 15-27, p. 135-136.

Tourangeau, F., Delage, G., Gauthier-Chouisnard M. *et al.* (1986). California Encephalitis – Quebec, *Canada Diseases Weekly Report*, 12-25, p. 110-111.

Tseng, R., Li, C. et Spinks, J. (1992). Particulate air pollution and hospitalization for asthma, *Annals of Allergy*, 68, p. 425-432.

U.S. Bureau of the Census (1991). *Statistical Abstract of the United States, 11$^{th}$ Edition*, The National Data Book, U.S. Department of Commerce, Washington (D.C.).

Waltner-Toews, D. (1996). An agroecosytem perspective on food-borne illnesses, *Ecosystem Health*, 2, p. 177-197.

Weinstock, M.A, Colditz, G.A., Willett, W.C., Stampfer, M.J., Bronstein, B.R., Mihm, M. Jr. et Speizer, F.E. (1989). Nonfamilial cutaneous melanoma incidence in women associated with sun exposure before 20 years of age, *Pediatrics*, 84, p. 199-204.

Werker, D.H., Singh, A.E., Artsob, H. et Hockin, J. (1995). Hantavirus Pulmonary Syndrome in North America, *Canada Communicable Disease Report*, 21(9), p. 77-79.

Wetherald, R. et Manabe, S. (sous presse). *A Re-evaluation of $CO_2$-Induced Hydrologic Change as Obtained from Low and High Resolution Versions of the GFDL Global Circulation Model*, GFDL/NOAA.

White, E., Kirkpatrick, C. et Lee, J. (1994). Case Control Study of malignant melanoma in Washington State l: constitutional factors and sun exposure, *American Journal of Epidemiology*, 139, p. 857-868.

WHO/OMS (1977). *Alma Ata Declaration*, OMS, Genève (Suisse), 49 p.

WHO/OMS (1986). *The Ottawa Charter for Health Promotion*, OMS, Genève (Suisse), 8 p.

WHO/OMS (1987). *Setting Environmental Standards: Guidelines for Decision-Making*, OMS, Genève (Suisse), 98 p.

WHO/OMS (1990a). *Environment and Health: the European Charter and Commentary*, OMS, Copenhague (Danemark), 110 p.

WHO/OMS (1990b). *Potential Impacts of Climate Change: Report of a WHO Task Group*, document inédit, Genève (Suisse), 58 p.

WHO/OMS Commission on Health and Environment (1992a). *Our Planet, Our Health*, OMS, Genève (Suisse), 282 p.

WHO/OMS (1992b). *Acute Effects on Health of Smog Episodes*, OMS Publications régionales, Série européenne n° 43, Genève (Suisse), 74 p.

WHO/OMS (1994a). *Concern for Europe's Tomorrow: Health and Environment in the WHO European Region*, OMS Publications régionales, Série européenne n° 53, Genève (Suisse), 88 p.

WHO/OMS (1994b). *The Effects of Solar Radiation on the Eye: Report of an Informal Consultation*, OMS, Genève (Suisse).

WHO/OMS (1996). *Environment and Health 1: Overview and Main European Issues*, OMS Publications régionales, Série européenne n° 68, Genève (Suisse), 56 p.

Williams, M., Shewry, P. et Harwood, J. (1994). The influence of the 'greenhouse effect' on wheat (*Triticum aestivum* L.) grain lipids, *Journal of Experimental Botany*, 45, p. 1379-1385.

Wilson, C. et Mitchell, J. (1987). A doubled $CO_2$ climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean, *Journal of Geophysical Research*, 92, p. 13315-13343.

Witek, T.J. Jr. et Schachter, E.N. (1985). Airway responses to sulfur dioxide and methacholine in asthmatics, *Journal of Occupational Medicine*, 27, p. 265-268.

Wittwer, S. (1990). Implications of the greenhouse effect on crop productivity, *HortScience*, 25, p. 1560-1567.

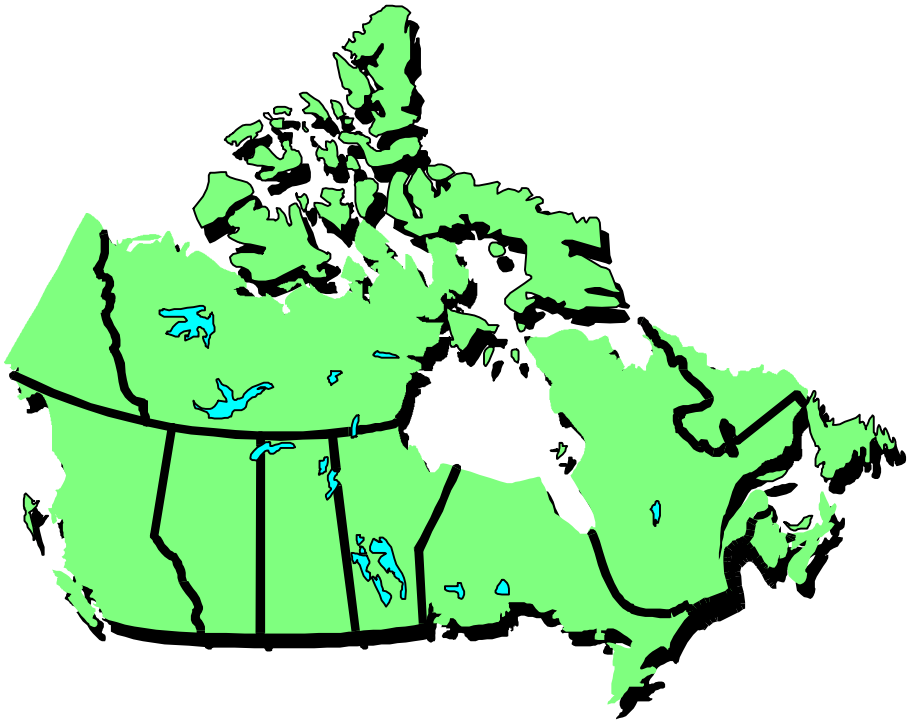
World Bank (1992). *World Development Report 1992: Development and the Environment*, Oxford University Press, New York (N.Y.).

Yassi, A. et Friesen, B. (1990). Controlling air pollution: the plan to reduce nitrogen oxides (NOx) and volatile organic compounds (VOCs) emissions in Canada, *Canadian Journal of Public Health*, 81, p. 6-9.

# CHAPITRE DOUZE

# IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TOURISME ET LES LOISIRS

*Geoffrey Wall*[1]



1. Faculté des études environnementales, Université de Waterloo, Waterloo (Ontario) N2L 3G1, téléphone : (519) 888-4567, poste 3609, télécopieur : (519) 746-0658, courriel : gwall@watserv1.uwaterloo.ca

## INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet d'étudier les impacts possibles du changement climatique sur le tourisme et les loisirs au Canada. La terminologie imprécise des études portant sur le tourisme, les loisirs et la détente les rend difficiles à utiliser (Wall, 1989a). Malgré l'existence d'une littérature considérable sur les différences de signification entre ces concepts, il reste encore à en tirer des définitions communes acceptables. En théorie, ces distinctions peuvent être importantes mais, dans la pratique, les adeptes du plein air, et notamment les touristes, se retrouvent souvent au même endroit en train de pratiquer des activités semblables. Donc, dans le présent document, on renoncera à établir des distinctions rigoureuses entre touristes et autres amateurs de plein air, et les termes seront utilisés de façon interchangeable.

On avancera que l'évolution du climat mondial peut avoir des répercussions profondes sur le tourisme et les loisirs, pour de nombreuses destinations touristiques actuelles et pour des endroits auxquels on envisage de donner une vocation touristique. Le changement climatique mondial peut imposer des contraintes à l'industrie touristique, mais aussi lui offrir de nouveaux débouchés; il pourra donc la pousser à chercher d'autres types de tourisme et de loisirs qui soient compatibles avec les nouveaux régimes climatiques.

Le tourisme et les loisirs englobent une vaste gamme d'activités qui dépendent du climat, de la température et de leur variabilité ou qui en subissent fortement l'influence. Dans ce contexte, la présence de conditions précises, comme la neige ou la température de l'air ou de l'eau, a une influence sur l'accès aux loisirs et sur la qualité des plaisirs qu'on en tire.

Les paramètres du climat et de la température qui influent sur le tourisme, seuls ou combinés, varient selon l'activité. Certaines de ces activités sont aussi plus dépendantes des conditions météorologiques que d'autres. Leur diversité est telle que des variations dans une vaste gamme de paramètres climatiques, ou de paramètres dépendant du climat comme la quantité et la qualité de l'eau, auront probablement des répercussions sur le tourisme et les loisirs, par exemple, le vent pour la navigation à voile, la neige pour le ski, la nébulosité et les concentrations d'ozone pour les bains de soleil, la température de l'eau pour la baignade et sa profondeur pour la navigation de plaisance. Il peut être aussi très important de savoir si les précipitations tombent sous forme de pluie, de neige, de grésil, de pluie verglaçante ou de granules de glace. Bien qu'on dispose d'une certaine information sur les conditions climatiques minimales nécessaires à la pratique de certaines activités (Crowe *et al.*, 1978) et qu'on ait suggéré des réactions possibles des adeptes de diverses activités face aux changements des conditions météorologiques (Paul, 1972), il faudra procéder à des travaux complémentaires dans ces domaines.

Outre ses incidences directes sur le tourisme et les loisirs, le climat les touche plus indirectement. L'accès à des destinations touristiques et récréatives est régi par l'efficacité des systèmes de transport, qui subissent eux-mêmes l'influence du climat et des conditions météorologiques. Par exemple, une neige abondante peut donner des conditions de ski excellentes, mais empêcher de se rendre jusqu'aux pentes de ski. Par contre, des observations effectuées récemment en Alberta ont montré que, même si l'accumulation de neige est moindre, de nombreux skieurs sont attirés vers les montagnes par du temps doux et ensoleillé.

Sur une échelle de temps plus longue, le changement climatique influera sur la répartition des ressources dont dépendent le tourisme et les loisirs, notamment sur celle de la faune aquatique et terrestre qui peut servir d'objet à des formes de loisirs par prélèvement (p. ex., la chasse) ou sans (p. ex., la photographie), ainsi que sur l'écologie des régions de tourisme et de loisirs (p. ex., les parcs nationaux). Par exemple, Brotton et Wall (1997) ont montré que, dans l'avenir, les chasseurs sportifs pourraient avoir accès à une quantité moindre de caribous dans le bassin du Mackenzie. Staple et Wall (1996) ont estimé que, même si la descente en eau vive peut continuer à être pratiquée dans la réserve de parc national Nahanni, ce sera dans un milieu modifié.

Les fluctuations de climat ont des impacts à moyenne et à grande échelle sur le débit et le niveau de l'eau, et influent sur l'attrait et la valeur des propriétés. Une bonne partie des activités touristiques se pratiquent sur le bord de l'eau ou tout près, et la présence d'eau donne de l'agrément à de nombreuses formes de tourisme même si le contact avec celle-ci n'est pas indispensable. Hare (1985) a souligné que, durant la période de bas niveaux des Grands Lacs au milieu des années 60, les eaux ont reculé de quelques centaines de mètres sur certaines rives et plages du lac Huron. En outre, le volume d'eau a des conséquences sur la qualité de celle-ci et, dans certains endroits, notamment des secteurs des Grands Lacs où les plages sont fermées périodiquement à cause de la pollution, la situation est déjà proche de la limite pour les activités où la personne est en contact avec l'eau.

Par conséquent, les relations entre le climat et les conditions météorologiques, d'une part, et le tourisme et les loisirs, d'autre part, sont extrêmement complexes.

## IMPORTANCE DU SECTEUR DU TOURISME ET DES LOISIRS

Avant de reparler du climat et des conditions météorologiques, il conviendrait de faire quelques brefs commentaires sur l'importance du tourisme à l'échelle internationale et au Canada.

À l'échelle mondiale, le tourisme international a connu une expansion constante et, selon certaines estimations, il n'est devancé que par le pétrole en ce qui concerne sa contribution au commerce mondial (Pearce, 1981). En outre, on a prédit que le tourisme deviendrait la plus grande industrie du monde au XXI$^{e}$ siècle (Leisure Industry Digest, 1985; Papson, 1979). Il constitue déjà le plus grand secteur économique de nombreux pays développés et en développement. Donc, même s'il a une connotation de plaisir, le tourisme n'est certainement pas une activité frivole. L'Organisation mondiale du tourisme signale 592 millions d'arrivées de touristes à l'étranger pour l'année 1996; les dépenses de ces touristes ont totalisé 423 milliards de dollars US dans les pays de destination (Organisation mondiale du tourisme, 1997). Le Canada s'est situé au dixième rang des arrivées internationales (17 345 000), avec une part du marché mondial s'élevant à 2,93 %, et au douzième rang pour les revenus liés au tourisme international (8 727 millions de dollars US), ou 2,06 % du marché mondial.

Selon la Commission canadienne du tourisme, les dépenses des touristes au Canada ont totalisé 41,8 milliards de dollars en 1995, soit une augmentation de 2,8 milliards de dollars, ou 7,1 %, par rapport à 1994. L'effet direct de ces dépenses sur le PIB a été de 17 milliards, ou une hausse de 7 %, au moment où le PIB global s'élevait de 3,9 %. Les effets directs et indirects ont totalisé

27,6 milliards, soit une augmentation de 7,1 %, par rapport à 1994. Les recettes du gouvernement issues des dépenses liées directement au tourisme ont totalisé 13,2 milliards en 1996, ou 31 cents de chaque dollar dépensé pour le tourisme au Canada.

En 1995, les emplois canadiens liés au tourisme s'élevaient à 488 500 années-personnes, une hausse de 8 100 par rapport à 1994, c'est-à-dire que les emplois liés au tourisme ont augmenté de 2 %, alors que la situation était stationnaire dans l'ensemble du secteur des affaires. D'après les projections, l'augmentation de ces emplois devrait se situer entre 120 000 et 130 000 années-personnes d'ici 2005.

Ces statistiques montrent que le tourisme est l'une des plus grandes sources d'emplois du Canada, se situant au cinquième rang après le commerce de détail, le commerce de gros, les services commerciaux et l'agriculture. Il est également le cinquième producteur de revenus : les recettes du tourisme dépassent les rendements bruts d'industries comme celles des véhicules automobiles, des métaux de première fusion, du papier et des produits chimiques, ainsi que ceux des principales industries du secteur des ressources comme celles du pétrole brut et du gaz naturel, des mines et de l'exploitation forestière.

Les statistiques confirment donc l'importance du tourisme pour l'économie canadienne. Mais le tourisme n'est pas réparti également au Canada et ses effets sont souvent très localisés. Si l'on tient compte de la répartition de la population, bien qu'en termes absolus le tourisme et les loisirs se concentrent dans des régions très peuplées, ce sont souvent les endroits moins peuplés qui ont le plus besoin de diversification économique, qui dépendent beaucoup du tourisme et des loisirs (Wall, 1991).

Le tourisme peut être même plus important par sa contribution positive à la qualité de vie. Même si les marchandises produites à partir de ressources renouvelables canadiennes sont encore très recherchées, la demande pour leur potentiel récréatif et environnemental semble avoir augmenté encore plus rapidement. Jackson (1986) cite plusieurs études qui indiquent un déclin des valeurs associées au matérialisme et un plus grand souci pour la qualité de vie et la protection de l'environnement. Cette mutation d'une société de consommation vers une société de conservation peut se renforcer si l'environnement se détériore. Cette tendance s'accompagne d'une évolution des activités récréatives de consommation vers des activités d'observation. Harrington (1991), par exemple, considère que la demande de services liés à la faune, particulièrement dans les loisirs, continuera d'augmenter, au moins dans un avenir rapproché, et les loisirs qui connaîtront la plus grande expansion seront ceux qui ne s'accompagnent pas d'une consommation, comme l'observation des oiseaux et l'étude de la nature. L'adoption d'attitudes plus favorables à l'environnement renforcerait la demande en endroits naturels propices aux loisirs et intensifierait le tourisme dans les endroits qui peuvent offrir un milieu intact. L'appui de la population à la protection des régions naturelles pourrait aussi s'accroître. Donc, les ressources autrefois perçues comme des obstacles au progrès économique jusqu'à ce qu'elles soient apprivoisées ou remplacées sont maintenant reconnues comme essentielles à la diversité et à la qualité de l'environnement et de nos loisirs (Frederick et Sedjo, 1991).

On peut trouver dans Clawson et Harrington (1991) un bref aperçu de l'évolution de l'offre et de la demande en ce qui concerne les possibilités de loisirs de plein air.

## DISPONIBILITÉ DES DONNÉES

Le tourisme et les loisirs sont des domaines sur lesquels on possède beaucoup de données, mais peu d'information. Il existe une foule d'études sur le sujet, mais la plupart sont limitées à des sites particuliers et peu ont traité des liens avec le climat et les conditions météorologiques. Les sorties des MCG ne conviennent pas à des études portant sur un site ou une région, et ne contiennent généralement pas de variables sous une forme pertinente aux loisirs. Le climat varie sur de courtes distances, selon la hauteur et l'aspect des montagnes et à une échelle qui est importante lorsqu'il s'agit de loisirs, mais qui se situe bien en dessous du seuil de résolution des modèles actuels. Par conséquent, il est difficile de combiner l'information disponible par la modélisation du climat et celle sur les loisirs.

Les exploitants d'entreprises touristiques et récréatives ne tirent généralement pas le meilleur parti de l'abondance des données disponibles sur le climat et les conditions météorologiques actuels. Par exemple, la longueur et la variabilité des saisons convenant à certaines activités dans des endroits en particulier peuvent être calculées pour des conditions actuelles, ce qui a des incidences considérables pour la viabilité économique des entreprises récréatives, mais ces études ne sont généralement pas faites, surtout par les petits exploitants qui gèrent une grande partie de ces entreprises. En réalité, il y a un potentiel encore non exploité pour des travaux pratiques faisant appel à l'information existante sur le climat et les conditions météorologiques qui pourraient aider à la prise de décisions des entreprises touristiques et récréatives.

## ÉVALUATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TOURISME ET LES LOISIRS

L'ampleur des impacts du changement climatique sur le tourisme et les loisirs dépendra à la fois de la répartition et de l'importance du phénomène du tourisme et des loisirs et des caractéristiques du changement climatique. Toutes autres choses étant égales, les endroits dont les économies sont fortement dépendantes du tourisme semblent les plus vulnérables. Se situant dans un contexte international, Wall (1992a, 1993) a estimé que la structure des voyages à l'intérieur d'un pays sera probablement plus stable que celle des voyages à l'étranger parce que les premiers se font souvent durant des congés de courte durée, et les limites de temps imposent des contraintes au choix des destinations des voyageurs (Lundgren, 1989). Les destinations à longue distance sont plus menacées que celles qui dépendent surtout d'un marché local. Mais même les destinations de réputation internationale (comme les chutes Niagara) comptent beaucoup sur le marché régional pour une grande partie de leurs visiteurs; les endroits éloignés des grands centres urbains seraient donc probablement les plus menacés.

En outre, les destinations où ce sont surtout les ressources naturelles qui attirent les visiteurs, comme les montagnes et les bords de mer, sont probablement plus menacées que celles basées sur des attractions culturelles ou historiques.

On peut considérer les relations entre climat et loisirs sous quatre angles (Riebsame, 1985). La première perspective est celle du climat comme décor. De ce point de vue, le climat fait partie du contexte environnemental du tourisme. Il existe de nombreux documents qui décrivent brièvement les caractéristiques climatiques des lieux de destination avant d'aborder les activités qui s'y pratiquent. Mais, la majorité de ces études ne prennent pas les variables climatiques en compte dans les analyses subséquentes et sont donc d'une utilité limitée pour comprendre les répercussions du changement climatique.

Une seconde perspective considère l'évolution des phénomènes atmosphériques comme génératrice de changement dans la participation au tourisme et aux loisirs. Parmi les études de ce type figurent certaines des plus approfondies sur les phénomènes atmosphériques en fonction du tourisme et des loisirs, et leurs conclusions ont été étudiées ailleurs (Wall, 1985). Mais la plupart de ces études mettent l'accent sur les liens entre les conditions météorologiques et les loisirs plutôt que sur les impacts d'un changement climatique à plus long terme.

Une troisième perspective considère le climat comme un danger (Murphy et Bayley, 1989). Le danger suppose une perte ou un dommage liés à une probabilité, à un risque ou à un accident. Les phénomènes climatiques réels ainsi définis peuvent être gradués selon l'intensité, le caractère et les effets, allant de variations légères et courantes à des effets rares et isolés, d'événements mondiaux à des incidents locaux. Les situations qui en résultent peuvent aller de l'inconvénient relativement mineur au désastre total. Bien qu'il existe une vaste littérature sur les dangers, il y en a peu qui porte spécifiquement sur le tourisme, particulièrement au Canada, même s'il est évident que la plus grande partie des terrains détruits par des tempêtes côtières ou des avalanches avaient auparavant une vocation récréative. Incidemment, il est intéressant de noter que les zones sinistrées peuvent elles-mêmes devenir des attractions touristiques, car les visiteurs viennent contempler le malheur des autres ou les effets d'un désastre majeur.

Lynch *et al.* (1981) ont combiné l'approche du danger avec la seconde approche décrite précédemment et considèrent le climat à la fois comme une ressource et une résistance. Comme l'activité humaine impose des limites à l'estimation favorable ou défavorable des conditions météorologiques et que les humains déterminent l'activité socio-économique pour un endroit et un moment précis, ce sont eux qui définissent en fait le caractère dangereux et l'utilité du phénomène qui interagit avec leurs activités. C'est-à-dire que, si les conditions dépassent les limites acceptables, elles deviennent une nuisance plutôt qu'une ressource. La nuisance est donc une fonction de la vulnérabilité humaine ou, en d'autres mots, de la sensibilité des activités et des milieux qui sont exposés aux éléments.

Lynch *et al.* (1982) pensent que ces énoncés ont trois conséquences importantes. Tout d'abord, la gamme des interactions résultant de la variation sans limites des conditions météorologiques et des systèmes sociaux indique que c'est un système excessivement complexe qu'on doit examiner et généraliser. Ensuite, il est aussi, sinon plus, important de comprendre les phénomènes extrêmes que les conditions normales. En troisième lieu, l'observation voulant que les êtres humains soient les déterminants de la ressource et de la résistance donne à penser qu'ils sont capables de réduire la sensibilité des activités humaines aux conditions météorologiques et au climat.

Afin d'être en mesure de prendre des décisions rationnelles et objectives face aux aléas du climat, il est essentiel que celui qui prend les décisions (en l'occurrence le touriste ou le propriétaire d'une entreprise touristique) comprenne parfaitement les liens entre les conditions météorologiques et les activités. Déterminer et mesurer les répercussions économiques des variations des conditions météorologiques est un exercice clé dans l'établissement de cette interaction. L'évaluation économique des accidents météorologiques ou « établissement des coûts des conditions météorologiques » n'est pas seulement possible et pratique, mais elle permet de comparer les sites et d'atteindre une plus grande rentabilité (Taylor, 1970). Cependant, l'« établissement des coûts des conditions météorologiques » n'a pas encore réalisé son plein potentiel chez les entrepreneurs en loisirs et en tourisme.

Masterton (1982) a mentionné que les changements des conditions météorologiques entraînent des réactions physiologiques et psychologiques qui influent sur les niveaux de confort et que ceux-ci, à leur tour, peuvent être modifiés selon qu'on met plus ou moins de vêtements. Elle propose de créer des classifications climatiques fondées sur le confort, ce qui mènerait à des études sur les destinations touristiques, à l'échelle soit locale soit régionale, et sur les activités récréatives individuelles. Bien que ces études ne soient pas mutuellement exclusives, elles constituent des orientations possibles des futures recherches. Mieczkowski (1985) a utilisé la notion de confort pour évaluer et cartographier les climats touristiques du monde.

L'influence des conditions météorologiques sur le tourisme varie selon la région et l'activité. Une pluie qui tombe dans une région climatique recevant 20 jours de pluie par an aura probablement un plus grand impact sur le comportement humain qu'une pluie de la même intensité et de la même durée dans un climat connaissant 100 jours de pluie par an (Crapo, 1970). De même, les variables météorologiques exercent plus d'influence sur les activités à mesure qu'augmente la quantité de contacts avec l'atmosphère. Mais les conditions météorologiques jouent sur les activités de loisirs d'intérieur et de plein air (Myers et Wall, 1989; Schlegel, 1994). Un temps défavorable aux loisirs de plein air ramènera les gens à l'intérieur; c'est pourquoi on construit des stades couverts afin de protéger des caprices du climat les amateurs d'activités d'extérieur.

## CARACTÈRE SAISONNIER

L'une des principales caractéristiques de la plupart des destinations touristiques est leur caractère saisonnier. Non seulement on associe certaines activités à chaque saison, mais le volume d'activités varie aussi dans les endroits où les saisons ne sont pas bien marquées. Les saisons qui existent dans les endroits d'où provient la demande induisent donc une saisonnalité des visites dans les endroits qui offrent le climat recherché. Ainsi, par exemple, les nombreux Canadiens qui souhaitent échapper à l'hiver canadien pour aller vers des climats plus doux créent une pointe saisonnière dans des régions tempérées ou tropicales qui ne subissent pas le même degré de variation annuelle de la température que le Canada. Smith (1990) a souligné que, dans un monde plus chaud, de nombreuses vacances d'hiver prises actuellement en Floride ou au Mexique par des résidents de régions plus rigoureuses du Canada et des États-Unis pourraient devenir moins irrésistibles, considérant le réchauffement hivernal assez important projeté pour ces latitudes.

La longueur de la saison touristique est d'une importance cruciale, surtout pour les exploitants d'installations privées. Au Canada, de nombreuses activités touristiques sont saisonnières, et se concentrent sur les fins de semaine et un certain nombre de congés. Le capital est investi toute l'année, mais, pour de nombreuses activités et destinations, la période d'exploitation est limitée et les profits doivent se faire en un court laps de temps. Les entreprises touristiques, qu'elles soient concentrées dans les activités d'été ou d'hiver, doivent gagner leurs revenus en peu de temps, et quelques fins de semaine inclémentes peuvent déterminer s'il y a profit ou perte. Il s'ensuit que tout ce qui influe sur la longueur et la constance des saisons d'exploitation, qu'il s'agisse de facteurs climatiques ou autres (comme la longueur et la date des congés scolaires) est susceptible d'avoir un impact sur la viabilité des entreprises touristiques. Tout changement de la longueur des saisons aurait des impacts considérables sur la viabilité à court et à long terme des entreprises touristiques et récréatives, et il serait très utile de pouvoir établir de meilleures prévisions à ce sujet.

## PHÉNOMÈNES EXTRÊMES

Les impacts du changement climatique se feront probablement le plus sentir par la modification de l'intensité et de la fréquence des phénomènes extrêmes.

La grande partie des activités touristiques et récréatives se pratiquent dans des milieux à haute énergie, comme les montagnes et les bords de mer, qui semblent particulièrement vulnérables au changement climatique via les modifications au cycle hydrologique, notamment des changements des niveaux et débits d'eau, et de l'abondance et du moment de survenue des chutes de neige. Les modifications de la fréquence des avalanches et des inondations, des tempêtes importantes et des phénomènes dérivés des conditions météorologiques et du climat, comme la fréquence des incendies, pourraient avoir des répercussions considérables pour les touristes et les installations touristiques. Une baisse des niveaux d'eau dans les Grands Lacs peut avoir des effets négatifs sur les marinas et la navigation de plaisance. En même temps, les menaces liées à l'élévation du niveau des mers peuvent être renforcées par l'évolution des attirances, les gens admettant de plus en plus que la diminution des concentrations d'ozone a des effets sur la santé. Donc, même si l'élévation du niveau des mers associée à l'effet de serre peut entraîner une érosion sur les plages et affecter l'infrastructure des lieux de villégiature en bord de mer, les attirances de la clientèle pourraient aussi changer avec l'évolution des préoccupations quant à la santé associées à l'amincissement de la couche d'ozone. Actuellement, les entreprises touristiques ne sont généralement pas bien préparées aux phénomènes extrêmes; on peut donc supposer qu'elles n'ont à peu près rien prévu face à l'éventualité du changement climatique.

La discussion qui précède montre que les conditions météorologiques et le climat ont des impacts considérables sur le tourisme. Mais, dans l'ensemble, on s'est assez peu préoccupé des impacts éventuels du changement climatique sur le tourisme et les loisirs (Wall et Badke, 1994). La plupart des études faites jusqu'à présent ont été fondées sur des fluctuations à court terme du climat et des conditions météorologiques; on a peu écrit sur les conséquences d'un changement climatique à long terme. Plusieurs aperçus ont déjà été préparés sur les impacts possibles du changement climatique sur le tourisme et les loisirs (Wall, 1994, 1995, 1996). Mais les rares recherches canadiennes à ce sujet ont invariablement été des études de cas limitées quant à la

superficie et aux activités examinées. Il n'est pas possible de cumuler les résultats de ces études pour en arriver à une évaluation quantitative globale des conséquences probables pour le Canada. Nous examinerons donc les résultats d'études diverses, pour donner un aperçu de certains des impacts probables du changement climatique sur certaines activités dans diverses parties du pays.

## IMPACTS

Il est difficile d'imaginer un coin de terre ou d'eau qui, avec ou sans intervention humaine, ne puisse se prêter à certains loisirs. En même temps, les loisirs sont extrêmement variés et ils ont des exigences environnementales diverses. Il est donc très difficile d'établir des généralisations concernant les impacts du changement climatique sur les loisirs.

À ces problèmes particuliers, on peut ajouter certaines autres questions communes à toutes les études d'impact environnemental (Wall et Wright, 1977) :

a. Difficulté de fixer un niveau de référence auquel comparer le changement.
b. Difficulté de discerner les changements anthropiques des changements naturels.
c. Écart spatio-temporel entre la cause et l'effet;
d. Complexité des interactions, compliquant l'identification des effets de second et troisième ordres.

Il est donc nécessaire d'organiser l'évaluation des impacts en les regroupant d'une certaine façon. Dans la présente étude, les impacts seront envisagés sous divers angles : loisirs liés à l'eau, sites naturels, loisirs d'été et loisirs d'hiver. Sous chacune de ces rubriques, on illustrera par des exemples les impacts possibles du changement climatique.

### *Loisirs liés à l'eau*

À peu près toutes les sortes de loisirs sont agrémentés par la présence d'eau. Certains, comme la baignade et la pêche, nécessitent absolument de l'eau en quantité et en qualité suffisantes. D'autres activités, comme la randonnée et le camping, sont attirées vers les rivages et peuvent être rehaussées par la présence de l'eau, même sans contact direct. Il s'ensuit que tout ce qui nuit à la quantité ou à la qualité de l'eau risque d'affecter les loisirs de plein air. En outre, si l'eau se raréfie, les loisirs seront de plus en plus en concurrence avec les autres utilisations de cette ressource restreinte.

#### *Littoraux*

L'élévation du niveau de la mer est une conséquence probable du changement climatique planétaire, qui pourrait avoir des conséquences énormes sur les possibilités de loisirs sur les littoraux.

Stations balnéaires

L'économie de nombreuses collectivités côtières est dominée par l'exploitation de la mer, du soleil et du sable à des fins de loisirs. Tout ce qui menace ces ressources ou l'infrastructure connexe peut être néfaste pour les économies des stations balnéaires. L'élévation du niveau de la mer menace les plages qui ne peuvent pas remonter sur les terres à cause de la présence de constructions; des mesures onéreuses de dédommagement et de protection des plages peuvent s'imposer aux collectivités dont le bien-être économique dépend de l'accès au sable. Les systèmes d'assainissement et les approvisionnements en eau douce peuvent être menacés par la hausse du niveau de l'eau et la salinisation des estuaires; les réserves d'eau douce potable peuvent être réduites si l'eau de mer s'infiltre dans les nappes phréatiques. Si la fréquence des tempêtes augmentait, l'infrastructure côtière serait davantage menacée de subir des dommages à cause des tempêtes et des inondations. Ce danger serait heureusement moindre au Canada que pour certaines régions plus clémentes des États-Unis.

Les menaces liées à l'élévation du niveau de la mer peuvent être renforcées par l'évolution des attirances qui s'est manifestée lorsqu'on a reconnu que la santé était mise en jeu par la diminution des concentrations d'ozone. Les lieux et activités touristiques et récréatifs sont régis tant par la tradition que par la mode : certains demeurent inchangés pendant longtemps, tandis que d'autres surgissent et disparaissent très rapidement. Les bains de soleil ne sont populaires que depuis les années 20 et, avant cette époque, dans les sociétés occidentales, on préférait au bronzage le teint pâle qu'on jugeait plus esthétique. On peut se demander si le préjugé favorable envers le bronzage se maintiendra face au changement climatique et à l'exposition croissante aux rayons ultraviolets qu'entraîne la diminution de l'ozone. Last (1993) a estimé qu'il fallait effectuer des recherches sur les attitudes face au bronzage et à l'utilisation de mesures de protection.

Des bulletins météorologiques de mise en garde quant aux niveaux d'exposition sécuritaire ont été diffusés couramment à la radio et à la télévision australienne depuis quelques années, et ont été introduits au Canada en 1992; cependant, aux États-Unis, ces conseils ne font pas habituellement partie des bulletins météorologiques. Les crèmes et les pommades antisolaires nécessitent une évaluation rigoureuse. Bien qu'il existe des rapports sur l'effet protecteur des écrans solaires contre les coups de soleil, leur efficacité à prévenir le cancer de la peau et les mélanomes malins demeure douteuse. Devrait-on faire une éducation en matière de santé pour convaincre qu'un bronzage n'est pas souhaitable? Si oui, il faudrait effectuer des recherches pour définir et évaluer les moyens de le faire. Quelles sont conséquences de ces changements d'attitudes sur les collectivités côtières dont les économies reposent sur la vente des bienfaits de la mer, du soleil et du sable?

Donc, d'un côté, l'élévation du niveau de la mer suscitée par « l'effet de serre » peut éroder les plages et affecter l'infrastructure des stations balnéaires côtières et, de l'autre, les goûts de leur clientèle peuvent aussi changer, reflétant un souci pour la santé en raison de l'appauvrissement de la couche d'ozone.

Milieux humides maritimes

Les milieux humides maritimes sont un milieu de loisirs qui a retenu une certaine attention dans le contexte du changement climatique mondial, particulièrement dans l'optique de l'élévation du niveau de la mer (Titus, 1988). Wall (1997) a récemment examiné la situation du point de vue du tourisme et des loisirs.

Les milieux humides maritimes sont des environnements dont la superficie a diminué du fait de la subsidence du sol et de l'empiétement d'autres utilisations des sols. Selon Titus (1988), l'élévation du niveau de la mer peut perturber les milieux humides de trois grandes façons : l'inondation, l'érosion et l'intrusion d'eau salée. Dans certains cas, les milieux humides seront convertis en pièces d'eau de surface; dans d'autres, le type de végétation changera, mais une partie survivra sous forme de milieu humide. Mais, si le niveau de la mer monte suffisamment lentement, l'aptitude des milieux humides à se rehausser, en capturant les sédiments ou en s'accumulant sur la tourbe créée par les sédiments, peut empêcher l'élévation du niveau de l'eau de les perturber. Les principaux facteurs régissant les taux d'accrétion littorale sont les charges solides, la vitesse des courants, ainsi que la fréquence et la durée des inondations. L'amplitude et la régularité des marées et le type de substrat jouent également sur les contours des marais et aident donc à déterminer les ajustements à l'élévation des niveaux de la mer (Armenato *et al.*, 1988).

Le long des côtes non aménagées, l'élévation du niveau de la mer va noyer les milieux humides du côté de la mer, mais permettra à de nouveaux de se former à l'intérieur des terres à mesure que les terres autrefois sèches seront inondées. Mais l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les terres humides côtières dépendra largement de la mesure dans laquelle les terres aménagées situées plus à l'intérieur sont protégées de cette hausse par des digues et des ouvrages de retenue. Le long des côtes aménagées, il ne restera peut-être plus de terres disponibles pour créer des milieux humides.

*Régions intérieures*

Milieux humides intérieurs

À l'opposé des bords de mer où le niveau de l'eau devrait monter, indépendamment de la modification éventuelle des précipitations, qui est actuellement mal comprise, la hausse des températures peut augmenter l'évapotranspiration, réduisant ainsi la quantité d'eau dans les lacs et les cours d'eau intérieurs et avivant la concurrence pour l'eau qui existe. Les milieux humides intérieurs peuvent donc être menacés plus par une pénurie que par un excès d'eau, et une baisse du niveau de l'eau des lacs aura des incidences sur le caractère et le potentiel touristique des écosystèmes des rivages intérieurs (Martinello et Wall, 1993). Certains des impacts les plus importants du changement de niveau des lacs se produiront en bordure des Grands Lacs, où les milieux humides constituent un habitat important pour les oiseaux aquatiques et des sites récréatifs recherchés.

L'auteur a étudié les conséquences possibles du changement climatique pour le parc national de la Pointe-Pelée et le parc provincial de Presqu'île sur la rive des Grands Lacs, dans le sud de l'Ontario (Wall, 1988, Wall *et al.*, 1986a). Les deux parcs contiennent de grandes étendues de marais qui ont une importance considérable pour la faune et les loisirs. Ils représentent aussi deux types différents de systèmes, qui peuvent réagir différemment aux fluctuations du niveau de l'eau. Pointe-Pelée est un marais fermé, protégé, qui est séparé du lac par des plages-barrières naturelles. À l'opposé, le marais de Presqu'île est un système ouvert. Dans les deux cas, les marais ne sont pas très influencés par le ruissellement provenant de la terre ferme, et le niveau de l'eau du lac Ontario est un facteur déterminant primaire de la composition en espèces végétales et du fonctionnement des marais.

Dans des marais naturellement confinés comme celui de la Pointe-Pelée, l'abaissement du niveau du lac transformera le marais en baissière, et à terme en terre ferme. À cause des barrières de sable qui le protègent, le marais sera empêché de se déplacer vers le lac et la végétation passera d'un état hydrique à un état mésoïque. Certaines espèces de plantes peuvent changer de forme de croissance pour s'adapter à une plus grande sécheresse, mais la végétation changera radicalement quand les espèces intolérantes à la sécheresse mourront et seront remplacées par des espèces émergeant de semences enfouies. Les arbres qui marquent la lisière entre le marais et la terre ferme peuvent pousser plus loin à cause d'une baisse de la laisse de crue. Les espèces de milieu humide seront moins diversifiées et les marais seront moins propices comme habitat des espèces recherchées pour leur valeur commerciale ou récréative, comme la sauvagine migratrice et le rat musqué. La pêche sportive pourrait aussi être affectée par la baisse de qualité des marais riverains où les poissons se nourrissent et se reproduisent. D'autres activités sans prélèvement de ressources comme le canotage et le patinage sur glace diminueront à cause du manque d'eau libre. La fréquence des incendies pourrait augmenter. Avec le temps, le marais pourrait perdre son caractère de milieu humide et, dans des conditions extrêmes, la sauvagine pourrait emprunter une autre voie de migration, ce qui mettrait fin à la chasse et, de façon plus importante, à l'observation des oiseaux.

Dans des marais de rivage ouverts comme Presqu'île, les effets de la baisse du niveau des lacs ne risquent pas d'être aussi graves. Plutôt que de voir les marais se vider et s'assécher sous forme de terre ferme, la végétation migrera vers le lac. L'étendue de ce déplacement dépend de l'ampleur du changement de niveau du lac, de la pente du profil du fond et de l'adéquation du substrat.

Il est évident que les impacts du changement climatique sur les écosystèmes riverains varieront considérablement selon la géographie physique du littoral, parce que la configuration de ce dernier influe sur les effets écologiques des changements de niveau de l'eau et parce que des loisirs différents se pratiquent dans des milieux différents (Wall et Costanza, 1984). Advenant une baisse du niveau des Grands Lacs, toutes autres choses étant égales par ailleurs et avec suffisamment de temps, on peut supposer qu'un nouvel équilibre s'établira et que de nouveaux milieux humides se créeront dans les endroits du littoral dont la géographie physique le permet. Mais les autres éléments de la situation ne seront malheureusement pas aussi stables. Bon nombre des principaux milieux humides sont actuellement protégés dans des parcs nationaux, provinciaux ou des États ou en vertu d'une autre désignation patrimoniale. Rien ne garantit que les endroits qui peuvent devenir des milieux humides seront assujettis à l'autorité publique, et les propriétaires actuels

peuvent s'opposer à la création de nouveaux milieux humides adjacents à leur propriété. Les besoins des autres usagers (navigation, production d'hydroélectricité, etc.) qui peuvent préconiser le dragage et le remplissage ou la stabilisation des niveaux de l'eau, viendront aussi s'opposer à la formation de nouveaux milieux humides. Que feront les gestionnaires des milieux humides actuels si leur territoire perd de son intérêt écologique et la raison d'être initiale de sa désignation?

Même si la perte éventuelle de milieux humides est devenue une préoccupation majeure, les contradictions et les compromis sont nombreux parce que les milieux humides injectent dans l'atmosphère d'importantes quantités de méthane, l'un des gaz à effet de serre (GES) les plus puissants (Frederick et Sedjo, 1991).

Marinas et navigation de plaisance

Depuis longtemps, les Grands Lacs sont un des hauts lieux de la pêche et de la navigation de plaisance et leurs rives abritent des installations récréatives comme des chalets privés et des parcs publics. Les lacs servent aussi à l'approvisionnement en eau, à la navigation et à la production d'électricité, et leur niveau varie avec les fluctuations climatiques. Cette variation est nécessaire aux processus écologiques; toutefois, certains utilisateurs comme les centrales hydroélectriques et les navigateurs préféreraient une plus grande stabilité et des niveaux relativement élevés, alors que d'autres, comme les propriétaires de chalet, voudraient des niveaux moins élevés et relativement stables. Des niveaux extrêmes nuisent aux marinas et à la navigation de plaisance, qu'ils soient élevés ou bas, surtout dans le dernier cas, et c'est lui qui est le plus susceptible de se produire dans le contexte du changement climatique.

On a connu des hautes eaux en 1951-1952, en 1973-1974, en 1985-1986 et des basses eaux en 1934 et en 1964. Donc, les Grands Lacs doivent depuis longtemps s'ajuster à des variations climatiques dans des périodes de crue et de sécheresse (Great Lakes Commission, 1990; Scott, 1993; Parker *et al.*, 1993).

Des sondages effectués en 1992 auprès d'exploitants de marinas et de navigateurs de plaisance du côté canadien des Grands Lacs ont montré qu'à peu près tous avaient dû, à un moment ou à un autre, assumer des coûts liés à la fluctuation du niveau de l'eau (Bergmann-Baker *et al.*, 1992-1993, 1995). Depuis qu'ils avaient commencé à exploiter leur marina (environ un tiers était exploitant depuis moins de 5 ans, même si la plupart des marinas existaient depuis plus longtemps), 67 % des répondants avaient eu de la difficulté avec l'accès aux docks ou aux postes de mouillage durant les périodes d'eaux basses, 64 % avaient éprouvé des problèmes à cause de la profondeur insuffisante des chenaux, 62 % à cause de la difficulté d'accéder aux rampes, 45 % avaient été obligés d'utiliser moins de rampes d'accès, 21 % avaient connu une saison de navigation plus courte et 13 % avaient eu un problème de pourriture sèche dans leurs constructions en bois. Pour régler ces problèmes, 55 % ont dragué, 45 % ont ajusté leurs docks, 44 % ont restreint la taille des bateaux, 44 % ont dû déplacer des bateaux, 27 % ont fermé les rampes d'accès à l'eau, 19 % ont construit des docks flottants et 7 % ont remplacé les structures pourries.

Malheureusement, il est impossible de mesurer exactement les dépenses occasionnées par ces ajustements, mais, de toute évidence, elles ont été considérables. En outre, d'autres ajustements ont été effectués dans les périodes de hautes eaux. En fait, on peut citer des exemples d'exploitants de marina qui ont été affectés par des bas niveaux au moment où ils étaient encore en train de rembourser des prêts contractés pour construire des digues afin de se protéger des hautes eaux. Les plaisanciers assument aussi divers coûts, mais ils sont plus mobiles que les exploitants de marina et peuvent donc s'ajuster plus facilement. Ils peuvent cependant être affectés autrement. Par exemple, le réchauffement climatique mondial peut augmenter la productivité du poisson si la qualité de l'eau ne se dégrade pas, mais certaines espèces valorisées peuvent dépérir, et des espèces étrangères peuvent coloniser plus facilement les lacs.

Stevens (1991), dans son étude sur l'exploitation des marinas, et Duc (1997), dans son étude sur la navigation de plaisance, sont arrivés à des conclusions semblables pour certaines parties du lac Huron.

Bien qu'Alexander (1997) soit parvenue à des résultats non concluants dans son étude des conséquences possibles du changement climatique sur les loisirs de plein air à Sauble Beach, les Grands Lacs peuvent offrir un exemple saisissant des impacts que pourraient avoir sur les activités récréatives les fluctuations du niveau de l'eau et donc la variabilité du climat.

***Sites naturels***

Les sites naturels, qui sont des ressources importantes pour le tourisme et les loisirs, sont attrayants dans une très grande mesure par les espèces qu'ils abritent et les processus écologiques qu'ils maintiennent. Les facteurs biophysiques jouent un rôle dans la définition des sites naturels, le choix des parcs, la gestion courante et l'interprétation. En outre, des outils d'aménagement comme le zonage, le contenu des programmes d'interprétation et la définition des activités récréatives pertinentes reposent sur les caractéristiques biophysiques de chaque région. La gestion des éléments naturels comme la faune et la flore est directement associée à l'écologie et à l'habitat, et donc au climat. Si le climat devait changer, les conséquences seraient probablement lourdes pour les sites naturels (Peters et Darling, 1985).

Le réchauffement planétaire peut modifier de nombreux écosystèmes dont dépendent les amateurs de loisirs de plein air. Par exemple, une étude réalisée sur le parc national de Prince-Albert, en Saskatchewan (Vetsch, 1986; Wall, 1989b), décrivait les conditions climatiques de l'avenir et les modifications correspondantes de la végétation, et explorait les diverses conséquences possibles du changement climatique pour la zone d'étude et la gestion des parcs nationaux. On a choisi la végétation comme variable centrale puisqu'elle est la base de l'habitat et un bon indicateur du changement environnemental. Comme c'est le cas pour une grande partie des Grandes plaines et des Prairies, les scénarios climatiques indiquent que, dans le futur, le parc national de Prince-Albert connaîtra probablement un climat plus chaud et plus sec. Des examens détaillés des théories sur les réactions de la végétation aux stimuli environnementaux, des impacts du climat sur la végétation, des indications historiques de la répartition de la végétation, de l'écologie des espèces, des facteurs de perturbation comme les incendies et le pâturage ainsi que des facteurs affectant la répartition des espèces constituent la base d'hypothèse sur les changements de

végétation à prévoir dans le parc dans le cadre des scénarios de changement climatique. Si l'on se fonde sur ces analyses, la végétation évoluera probablement vers une augmentation de la proportion d'herbages aux dépens de la forêt boréale, et les ressources particulières subiront l'impact du changement climatique, ce qui aura des conséquences sur le zonage, les thèmes d'interprétation et les loisirs. Cinq de ces changements sont indiqués ci-dessous :

i. Transition des prairies à la forêt boréale. La zone de transition, ou écotone, entre les biomes de prairie et de forêt boréale est un élément important de la gestion de la ressource et de l'interprétation dans le parc. Les lisières des biomes pourraient être parmi les premiers secteurs qui réagiront à un changement environnemental, ce qui influera sur la position et l'importance de la zone de transition. Si le changement climatique se prolonge, on peut concevoir que la plus grande partie de la zone de transition migre jusqu'au nord du parc. Cette évolution de la végétation peut exiger de réévaluer les traits uniques et représentatifs du parc. Dans un avenir rapproché et à moyen terme, l'interprétation pourrait s'orienter davantage sur la dynamique des processus environnementaux.

ii. Prairie à fétuque. Les petites zones de prairie à fétuque sont considérées comme un attrait spécial du parc, parce qu'elles sont une enclave de zones plus étendues de prairie à fétuque situées environ 60 km plus au sud, et parce qu'au cours des dernières décennies le peuplier faux-tremble a empiété sur la prairie, rapetissant ainsi l'habitat de l'élan et du bison. Le changement climatique favorisera la perpétuation des communautés d'herbes des prairies dans le parc, faisant ainsi diminuer la nécessité de leur accorder une protection spéciale, comme c'est le cas actuellement. Mais des altérations continuelles de l'état naturel de prairies semblables à l'extérieur du parc semblent indiquer que les communautés de prairie de fétuque contenues dans le parc demeureront une anomalie pour la région.

iii. Pélicans d'Amérique. Au Canada, la seule colonie de nidification protégée de pélicans d'Amérique se situe sur l'île Heron, dans le lac Lavalee, près de la limite nord-ouest du parc. Les changements climatiques décrits par les scénarios des MCG peuvent avoir sur elle des effets nocifs en changeant le niveau de l'eau du lac, en reliant les îlots de nidification au rivage et en permettant l'invasion des prédateurs. Cependant, l'isotherme 0 ºC d'avril se situe approximativement à la limite méridionale de l'aire du pélican d'Amérique, et reflète la disponibilité du poisson au moment de l'arrivée des oiseaux dans leurs lieux de nidification. Le changement climatique augmentera la période libre de glace, ce qui pourrait donner accès à un habitat convenable au nord des limites actuelles du parc.

iv. Caribou des forêts. Les caribous des forêts qu'on trouve dans le parc national de Prince-Albert sont à la limite sud de leur aire de répartition et se concentrent dans la partie nord du parc. Ils sont considérés comme un attrait spécial du parc, puisqu'on ne les retrouve habituellement que plus au nord, et aussi comme une espèce rare au Canada. Le troupeau, composé d'environ 38 individus, entre dans le parc et en sort, mais ne se déplace pas sur de longues distances. Leur habitat préféré est la forêt boréale mature, où l'on trouve des fondrières d'épinettes noires, mais ce milieu devrait rétrécir dans un climat plus chaud et plus sec. Le caribou pourrait être forcé de trouver un habitat convenable plus au nord, ce qui laisserait le parc sans caribou des forêts.

v. Bison en liberté. Le parc abrite un troupeau de bisons migrants dont l'habitat principal est l'écotone entre la prairie et la forêt. Le peuplier faux-tremble et d'autres espèces arbustives qui ont empiété sur la prairie ont réduit l'habitat des bisons, ce qui les a incités à sortir plus fréquemment du parc pour se rendre sur les terres agricoles avoisinantes. Le bison n'est alors pas protégé et il y a eu des conflits avec les propriétaires. Un réchauffement éventuel pourrait augmenter l'étendue de l'habitat du bison dans le parc, qu'il n'aurait plus besoin de quitter; cette situation aiderait à réduire les conflits liés à leur passage sur les terres.

Dans un scénario de changement climatique, l'évolution pourrait affecter les ressources considérées actuellement comme spéciales ou rares. Par exemple, il ne serait plus nécessaire de protéger les prairies à fétuque, mais des secteurs de la forêt boréale pourraient prendre de l'importance. La saison des loisirs d'été sera plus longue et celle d'hiver plus courte, ce qui créera plus de pression sur les loisirs. Des sécheresses plus fréquentes feront croître les pressions liées à l'utilisation des terres (comme l'indiquent les scénarios des MCG) et pourraient inciter à convertir à l'agriculture des terres actuellement peu productives. Ces pressions peuvent se traduire par une augmentation des conflits liés à l'utilisation des terres (parcs ou autres fins).

Le changement climatique a aussi des impacts sur la superficie des terres consacrées aux parcs et à d'autres réserves naturelles, sur la taille de chaque parc ainsi que sur leur choix, désignation et délimitation. Ces derniers ont comme mandat de protéger les espèces en voie de disparition et de servir de réserves écologiques. La perspective du changement climatique et de la vulnérabilité accrue des ressources à ce changement donne à penser que les critères climatiques deviendront des facteurs plus pertinents pour désigner les parcs et autres réserves. Par exemple, là où c'est possible, le choix des limites du parc devrait permettre la migration des espèces. Les scénarios indiquent que les régions plus nordiques connaîtront un changement climatique d'une plus grande ampleur. Il faudrait donc s'attacher davantage à installer les parcs dans des endroits dont le climat sera optimal pour les espèces qu'on veut protéger. On aura davantage besoin de grands parcs dont les limites correspondent à l'écologie.

Dans les régions nordiques, le concept d'îlot écologique n'est pas viable à cause de l'ampleur des migrations de nombreux animaux. Comment peut-on réussir à désigner des endroits comme optimaux du point de vue écologique quand le changement climatique imminent est d'une grande envergure et les espèces qu'on essaie de protéger très mobiles? Il est évident que le changement climatique a pour les parcs et les systèmes de parcs des conséquences importantes qui dépassent la portée du présent rapport, mais elles méritent d'être approfondies.

Les questions qui ont été soulevées quant aux milieux humides et au parc national de Prince-Albert peuvent s'appliquer d'une façon plus générale à d'autres écosystèmes. Une tendance au réchauffement devrait entraîner un décalage des biomes vers le pôle, mais les espèces elles-mêmes ne devraient pas se déplacer toutes au même rythme; il serait donc simpliste de considérer le processus comme une marche d'écosystèmes intacts vers le nord ou en altitude. Les réserves naturelles sont souvent des îlots enclavés dans de vastes régions de paysages modifiés, et en l'absence de voies évidentes permettant le déplacement d'espèces ou d'association d'espèces,

on peut se demander comment la faune et la flore pourront se relocaliser. En réalité, des changements dans la fréquence des phénomènes extrêmes, comme les incendies et les infestations de ravageurs, peuvent être des agents cruciaux du changement (Wall, 1992b).

Que peut-on considérer comme naturel dans une époque où le changement dû à l'activité humaine se fait sentir partout? Que faut-il protéger et pourquoi? Le changement climatique pose alors des questions fondamentales quant à la désignation et à l'aménagement des réserves et des ressources naturelles recherchées pour le tourisme et les loisirs. Ces questions méritent beaucoup plus d'attention qu'elles n'en ont reçu jusqu'à présent.

### *Loisirs d'hiver*

L'examen des loisirs d'hiver s'attachera surtout au ski alpin. Mais le ski de randonnée, la motoneige (Hind, 1986), la pêche sur la glace (Wareing, 1994) et d'autres activités qui dépendent de la neige ou de la glace sont susceptibles de subir des conséquences négatives assez semblables.

Le manque de neige a des répercussions immédiates sur le ski. La hausse des températures peut réduire la proportion des précipitations qui tombent sous forme de neige. Cet énoncé ne s'avère peut-être pas dans tous les cas, car de l'air plus chaud contient plus de vapeur d'eau que de l'air plus frais et donc, dans certaines situations comme dans les latitudes de l'extrême-nord, les chutes de neige peuvent effectivement augmenter. La climatologie des régions montagneuses où sont situées de nombreuses pistes de ski est aussi extrêmement complexe et n'est peut-être pas reproduite par les MCG existants. Mais on pense généralement que la quantité et la constance (car la neige peut être suivie de pluie dans des situations limites) de la neige au sol diminueraient probablement, ce qui raccourcirait les saisons d'exploitation de nombreuses régions de ski. Nombre d'entre elles doivent rentabiliser leur investissement sur de courtes saisons d'exploitation, particulièrement durant les congés et les fins de semaine, donc tout ce qui peut réduire la durée et la constance des saisons d'exploitation est susceptible d'avoir des conséquences économiques négatives. Il importe de reconnaître que, dans ce cas comme dans bien d'autres, ce ne sont pas les conditions moyennes qui comptent, mais la fréquence des phénomènes extrêmes. De nombreuses stations de ski peuvent faire face à une mauvaise semaine, un mauvais mois ou même une mauvaise saison et, dans les conditions d'exploitation actuelles, s'y attendent. Mais une succession de saisons médiocres pourrait être cruciale.

Naturellement, les centres de ski ont réagi (et continueront de le faire) à des conditions défavorables en fabriquant de la neige. Mais l'application de cette technologie a des limites, car elle est très coûteuse, nécessite de grandes quantités d'eau et a ses propres contraintes climatiques. Au mieux, c'est un palliatif, et non une solution aux aléas du climat. D'autres adaptations possibles consistent à élargir l'exploitation des pistes de ski à des régions montagneuses d'altitude plus élevée, là où les chutes de neige peuvent demeurer fiables, comme on l'a fait dans les Alpes, mais cette stratégie a des conséquences écologiques, particulièrement quand l'exploitation s'effectue au-dessus de la limite forestière.

Une autre stratégie d'adaptation, qui est valable dans les conditions climatiques actuelles et qui aidera à se préparer à un changement de climat, est la diversification des activités, afin que les

investissements effectués dans l'immobilier et les infrastructures produisent des revenus pendant la plus grande partie de l'année. On pense par exemple à la construction de glissades d'eau qui permettent d'exploiter les téléphériques durant l'été, à la création de terrains de golf, de sentiers de randonnée et de piscines, à la construction de condominiums afin d'attirer la clientèle toute l'année et à l'ajout d'installations de conférence. Ces stratégies permettent de réduire le caractère saisonnier des entreprises récréatives et de garantir des emplois plus stables, ce qui renforce les collectivités avoisinantes et tire parti de l'allongement de l'été (voir les Loisirs d'été).

Ski alpin en Ontario

La sensibilité des loisirs à la variabilité du climat a été bien illustrée en Ontario quand une vague de temps doux sans précédent a coïncidé en 1979 avec les vacances de Noël, qui sont une période cruciale pour l'industrie du ski (Lynch *et al.* 1981; 1982). Les journaux ont rapporté les « déboires financiers », les « effets nuisibles » et les « malheurs terribles » subis par les exploitants de stations de ski de l'Ontario et qui se sont répercutés sur le commerce de détail et le secteur des services, surtout dans les centres de villégiature. Dans le sud de la baie Georgienne, la pratique du ski a été de 40 % inférieure aux prévisions, ce qui représentait une perte de recettes directement liées aux loisirs de l'ordre de 10 millions de dollars. À la fin de janvier, des stations de ski avaient subi des pertes s'élevant jusqu'à 2,5 millions de dollars.

Certains détaillants ont radié la saison hivernale, et deux grandes chaînes de vente au détail d'articles de sport ont été mises sous séquestre. En janvier 1980, l'Ontario Ski Resort Association a demandé l'aide du gouvernement de l'Ontario pour faire face aux coûts d'exploitation fixes. Certains exploitants ont aussi demandé et reçu une aide directe ou des garanties d'emprunt de la Société de développement de l'Ontario. D'autres ont annulé ou remis à plus tard des rénovations ou des agrandissements prévus.

La vulnérabilité des stations de ski dépend considérablement du type et de la quantité des ajustements qu'elles ont effectués à l'avance pour annuler ou compenser les effets de conditions météorologiques variables. Une adaptation majeure consiste à investir dans des canons à neige. Ces derniers peuvent améliorer les conditions limites et prolonger la saison de ski, mais ils ont leurs contraintes de température, sont chers et nécessitent de grandes quantités d'eau. D'autres exploitants ont aussi adopté des stratégies d'adaptation différentes, qui consistaient notamment à se donner une meilleure marge de manœuvre en diversifiant leurs installations récréatives et leurs sources de revenus. Par exemple, le Blue Mountains Resorts a beaucoup investi dans les canons à neige, mais a aussi créé des installations qui sont exploitées toute l'année. Bien que ce centre ait subi des pertes durant la saison de ski 1979-1980, il a été capable de générer un profit (bien que réduit) sur la totalité de l'année.

Ski dans la région des Grands Lacs

À l'aide des scénarios de changement climatique élaborés par le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) de l'Université Princeton et le Goddard Institute of Space Studies (GISS) de la National Aeronautical et Space Administration pour des concentrations doubles de GES, on a essayé d'évaluer la résilience du ski alpin au changement climatique dans la région des Grands

Lacs. Bien que les pentes de ski soient courtes et la dénivellation minime par rapport à d'autres endroits, et que les stations accueillent surtout des skieurs le jour et les fins de semaine, on s'y prépare pour les centres de vacances de ski plus exigeants de l'Amérique du Nord et d'ailleurs. Cependant, l'auteur du présent rapport ignore si l'on a examiné les impacts du changement climatique sur ces autres centres nord-américains. Donc, le devenir des pentes de ski de régions comme celle des Grands Lacs dans le contexte du réchauffement climatique peut devenir crucial pour l'industrie du ski dans son ensemble.

Pour six endroits de la région des Grands Lacs situés au Canada et aux États-Unis, on a déterminé la longueur actuelle d'une saison de ski à chaque site en ayant recours à la méthodologie de Crowe *et al.* (1978). Ceux-ci ont déterminé qu'une journée convenant au ski alpin est caractérisée par :

- une épaisseur de neige au sol d'au moins 5 cm;
- aucune précipitation liquide (pluie verglaçante, bruine ou pluie) mesurable;
- une température maximale inférieure à 4,5 ºC.

Les chercheurs ont alors déterminé la probabilité en pourcentage qu'une journée d'hiver corresponde à ces critères. Si cette probabilité se situe :

- à moins de 50, les conditions sont considérées comme incertaines pour le ski;
- entre 50 et 74, elles sont généralement favorables au ski;
- à 75 ou plus haut, elles sont alors fiables.

En suivant l'approche utilisée dans des études précédentes (McBoyle *et al.*, 1986; McBoyle et Wall, 1987; Wall, 1988; Lipski et McBoyle, 1991; McBoyle et Wall, 1992), la saison de ski a été définie comme la période durant laquelle l'épaisseur de neige au sol est jugée généralement bonne ou mieux. La longueur actuelle de la saison de ski divise en trois la région des Grands Lacs :

- Le nord de l'Ontario et le Michigan ont une saison de 131 jours, du 21 novembre au 31 mars, tandis que la saison est de 10 jours plus courte dans le sud du Québec et se termine le 20 mars.
- Le centre et le sud du Michigan ont une saison de ski de 100 jours, qui débute plus tard que dans le nord, soit le 11 décembre, et qui se termine le 20 mars, comme dans le sud du Québec.
- Le sud de l'Ontario a une saison d'environ 70 jours qui commence juste avant Noël, le 21 décembre, et qui dure jusqu'à la fin de février.

Les conditions sont similaires pour la saison de ski fiable, qui se caractérise par une réduction de la durée à mesure qu'on se déplace vers le sud.

Dans ces deux scénarios de changement climatique, les précipitations mensuelles hivernales devraient s'accroître d'environ 9 % et la température devrait monter en moyenne de 3,4 ºC selon le modèle du GFDL, et de 5,3 ºC selon celui du GISS. Par conséquent, seuls les trois sites les plus au nord, à Thunder Bay, dans le nord du Michigan et dans le sud du Québec auraient une

température mensuelle moyenne qui se situerait sous le point de congélation, selon le modèle GFDL, tandis que, pour celui du GISS, cette situation ne se produirait qu'à Thunder Bay et dans le sud du Québec. Il s'ensuit que la plus grande partie des précipitations ne tomberont probablement pas sous forme de neige. En général, les conditions de ski dans la plus grande partie des Grands Lacs deviendront peu intéressantes. Par exemple, la saison de ski dans la baie Georgienne et le sud du Michigan, selon le GFDL, serait réduite à 41 jours, ce qui n'est pas considéré comme fiable. Selon le scénario du GISS, plus restrictif, la saison de ski est éliminée dans la partie méridionale du bassin, tandis que dans le nord, elle est réduite et se situe entre 59 et 80 jours, et que seule Thunder Bay possède une saison de ski assurée de plus de 10 jours.

Les résultats ci-dessus sont-ils extrêmes? En ce qui concerne la température et les précipitations, quels sont les changements minimaux requis pour produire des situations semblables à celles suggérées par les scénarios? En prenant le Michigan à titre d'exemple, si les températures actuelles montent progressivement de 0,6 ºC avec les valeurs de précipitations actuelles, il faudrait seulement une hausse de 2,2 ºC pour ramener la durée assurée de la saison de ski à celle projetée par le modèle du GFDL. On est en dessous des prévisions du plus prudent des deux scénarios. Avec une base de précipitations de 110 % de la précipitation normale (ce qui est proche de la moyenne hivernale projetée par les deux scénarios), il faut une élévation de 2,8 ºC pour ramener la durée assurée de la saison de ski de maintenant à celle prévue par le GFDL. Cela indique encore qu'une hausse de température inférieure à la valeur projetée par le GFDL modifiera les saisons de ski de la façon indiquée plus haut. Mais il faut une hausse de température d'au moins 5 ºC pour atteindre les conditions du GISS. Cette analyse de sensibilité suggère que les résultats du scénario ne sont pas exagérés.

Heureusement pour la région de Thunder Bay, dans le nord de l'Ontario, selon le scénario du GFDL, les périodes de pointe pour le ski - les vacances de Noël et les vacances des collèges et universités à la mi-février - auront des conditions de ski fiables. La principale perte sera la disparition du ski en mars, mois qui ne représente pas plus de 20 % de l'achalandage total. La valeur des recettes perdues en mars, selon le scénario du GFDL, totaliserait 2,675 millions de dollars. Dans le sud du Québec, la situation est semblable, mais avec une perte de 5,068 millions de dollars.

Dans la baie Georgienne, les pertes seront importantes. On perdra le congé de Noël, soit entre 20 et 30 % du chiffre d'affaires. De même, il y aura une réduction se situant entre 10 et 15 %, due à la disparition du ski durant les vacances de la mi-février. Ces pertes pourraient totaliser entre 4,877 et 7,316 millions de dollars.

Avec des techniques différant quelque peu de celles des études citées précédemment, Lamothe et Périard Consultants (1988) en sont arrivés à des conclusions très semblables sur le ski alpin dans les Laurentides, au Québec. Ordower (1995), utilisant une version de la méthodologie précédente, a aussi calculé que les saisons de ski alpin seraient réduites dans le sud de l'Ontario, comme l'ont fait Brotton et Wall (1993).

Parce que la saison sera plus courte, les exploitants de centres de ski auront besoin de plus de remontées mécaniques et de canons à neige, d'un meilleur matériel de damage des pistes et

d'éclairage de nuit pour obtenir les mêmes revenus en beaucoup moins de jours. Tous ces moyens sont onéreux. Ces investissements seront abordés avec précaution en raison de l'incertitude entourant la rentabilité future. Par exemple, avec une dépense de 4,12 $ par heure-acre de fonctionnement, le coût de fabrication de la neige devient rapidement inabordable pour tous, sauf pour les plus grands exploitants (Goeldner *et al.*, 1990). Des conditions hivernales clémentes peuvent se traduire par des risques d'avalanche plus élevés dans les régions montagneuses, nécessitant des fermetures plus fréquentes et plus coûteuses des pentes de ski, et des mécanismes de contrôle plus sévères d'activités comme la randonnée (Smith, 1990). Par contre, la saison estivale serait plus longue (voir les Loisirs d'été). C'est pourquoi de nombreux centres de ski se sont diversifiés pour devenir des centres de villégiature ouverts toute l'année, avec des terrains de golf, des courts de tennis, des villages de condominiums et des installations de conférence; ils font même fonctionner leurs remontées mécaniques pour amener les vacanciers vers des glissoires d'eau ou des sentiers de randonnée dans la nature qui les ramèneront à la station. En fait, certains centres ont retiré le mot « ski » de leur nom et ont adopté un mode d'exploitation toutes saisons. Mais cette expansion se limitera probablement à quelques centres, ce qui accroîtra encore l'incertitude pour les plus petites exploitations.

### *Loisirs d'été*

Le changement climatique pourrait se traduire aussi par un allongement des saisons estivales (sous réserve de la disponibilité de l'eau et des contraintes institutionnelles) comme le montrent Lamothe et Périard Consultants (1989) dans leur étude sur le golf au Québec. Cette possibilité est illustrée ici par une enquête sur le camping en Ontario (Wall *et al.*, 1986b). Pour les touristes, le camping est à la fois une activité et une forme d'hébergement; c'est pourquoi on l'a choisi comme étant un bon indicateur des activités estivales.

Essentiellement comme on l'a fait dans la section précédente pour le ski, on a calculé les longueurs actuelle et future de la saison de camping pour huit parcs provinciaux de l'Ontario. On a supposé que tout allongement de la saison générerait autant d'activité dans les semaines additionnelles que l'on connaît aux limites de la saison normale actuelle.

En ce qui concerne la longueur des saisons, il existe des différences régionales considérables, les parcs du sud connaissant une saison climatique plus longue (bien que pas nécessairement sur le plan administratif) que ceux situés beaucoup plus au nord. Mais il n'y a pas de régime nord-sud simple en raison de l'effet des lacs. Dans tous les cas, les deux scénarios GISS et GFDL prévoient un allongement de la saison de camping assurée qui atteint souvent 40 jours. Les saisons marginalement assurées commencent plus tôt au printemps et finissent plus tard à l'automne. L'information sur le nombre de campeurs, la durée de leurs séjours et leurs dépenses a été utilisée pour calculer les répercussions économiques de l'allongement des saisons. Si les campeurs tiraient parti des saisons de camping potentiellement plus longues, la situation aurait des conséquences économiques positives, variant en importance selon les différentes parties de la province. Mais ces avantages économiques peuvent entraîner en revanche une plus grande dégradation de l'environnement, les parcs recevant plus de visiteurs durant des périodes plus longues.

Il importe de reconnaître que les impacts ne sont pas toujours négatifs, que le changement n'est pas nécessairement mauvais et que l'évolution du climat peut créer des débouchés autant que des problèmes. L'avenir est prometteur pour les entreprises qui ont comme clients des touristes d'été, à condition qu'elles ne soient pas affectées par des baisses du niveau de l'eau ou des pénuries d'eau.

## LIMITATION ET ADAPTATION

Les stratégies à adopter face au changement climatique planétaire sont souvent examinées sous l'angle de la limitation et de l'adaptation (Smit, 1993). La limitation concerne les tentatives visant à réduire la production de GES et donc la vitesse du changement climatique. L'adaptation consiste à accepter l'éventualité du changement climatique et essaie de trouver les mesures qui peuvent être prises pour en limiter les inconvénients et pour en tirer profit. Il n'y a pas à choisir entre la limitation et l'adaptation, car elles sont interdépendantes.

### *Limitation*

Mise à part l'énergie consommée par le transport, le tourisme et les loisirs ne sont pas habituellement considérés comme de grands producteurs de GES. Comme les gens mangent, dorment et recherchent leur confort qu'ils soient à la maison ou ailleurs, la consommation d'énergie due au transport entre les points de départ et d'arrivée est considérée comme la contribution la plus importante des loisirs à la hausse des concentrations de GES. Il est vrai que le déplacement temporaire de gens d'une zone tempérée à une zone tropicale a des incidences locales sur la consommation d'eau et d'énergie et sur l'élimination des déchets, mais des activités récréatives sur place sont généralement considérées comme contribuant de façon mineure à la production mondiale des GES.

Bien que les voyages d'agrément soient par définition des activités facultatives, ils ne le sont certes pas pour les entreprises et les collectivités qui accueillent les touristes. Par conséquent, les politiques visant à restreindre les voyages peuvent avoir des répercussions considérables sur les lieux de destination. Dans les années 70, au moment de la pénurie d'essence, les économies de ces endroits en ont souffert. Mais on a constaté que de nombreux citadins préféraient économiser leur essence pour leurs loisirs, puisqu'ils disposaient de plus de moyens pour se rendre au travail que vers des endroits dispersés, mal desservis par les transports en commun.

Bref, le tourisme et les loisirs ne sont pas considérés comme de grandes sources de production nette de GES, sauf peut-être durant l'étape des voyages, mais les initiatives de politiques adoptées pour restreindre les voyages peuvent avoir des conséquences importantes sur les lieux de destination.

### *Adaptation*

Les systèmes naturels et humains sont adaptés, dans une mesure encore incertaine, à la plus grande partie de la variabilité actuelle du climat. En ce qui concerne les loisirs, par exemple, les centres de ski fabriquent de la neige (bien que ce processus soit quelque peu limité par le climat)

et les exploitants de marinas des Grands Lacs ont installé des quais flottants pour s'ajuster aux fluctuations des niveaux d'eau.

En ce qui concerne le potentiel d'adaptation au changement climatique, on peut examiner deux principaux groupes : les participants eux-mêmes et les entreprises qui les ont comme clients. Chacun de ces groupes sera étudié tour à tour.

Participants

Par définition, la pratique des loisirs résulte d'un choix et, bien que celui-ci ne soit pas illimité, il y demeure beaucoup de souplesse. Des sommes importantes sont investies dans l'équipement de loisirs. Cependant, la plus grande partie de cet équipement est mobile. Les gens disposent donc de beaucoup de choix quant à la décision de participer ou non, aux activités auxquelles participer, ainsi qu'au moment et au lieu de ces activités. En fait, comme ce que l'on recherche dans les loisirs est une expérience, les participants peuvent remplacer une activité ou un endroit par un autre sans grande perte dans la qualité des loisirs. Il est vrai que ceux qui veulent observer des espèces animales ou végétales particulières peuvent les trouver moins accessibles ou remplacées par d'autres, et les pêcheurs peuvent devoir viser d'autres prises en des endroits donnés, mais, dans la mesure où il reste des espaces sauvages et des possibilités de loisirs, la plupart des participants éventuels devraient pouvoir satisfaire leurs besoins en loisirs. Il leur sera donc très facile de s'adapter au changement climatique.

Entreprises

La souplesse des participants peut causer un problème à ceux qui offrent des services dans le domaine des loisirs. La plupart des investissements récréatifs, qu'il s'agisse d'une pente de ski, d'un terrain de camping, d'une marina ou d'un parc national, sont immobilisés dans un endroit avec un capital englouti qui ne peut pas facilement être liquidé et réinvesti. Si la qualité des ressources récréatives et des expériences liées se dégrade ou si la saison d'exploitation est raccourcie sous le seuil de rentabilité, les entreprises spécialisées dans les loisirs et les collectivités qui en dépendent risquent de voir leur économie se détériorer considérablement. Ce processus pourra faire des gagnants et des perdants quand les participants modifieront leurs choix.

## RECHERCHES NÉCESSAIRES

Il va sans dire qu'il faudra avoir une plus grande résolution spatiale, une plus grande variété de variables climatiques et connexes, et une réduction de l'incertitude associée aux scénarios climatiques produits par les MCG, si on veut améliorer les estimations des impacts éventuels du changement climatique sur le tourisme et les loisirs. Mais l'amélioration de cette information est insuffisante en soi pour approfondir cette compréhension. En réalité, il faudra des stratégies de recherche complémentaires, afin d'étudier l'adaptation des participants et des entreprises récréatives à la variabilité climatique passée et actuelle.

Comme les loisirs sont par définition des activités choisies librement, il importe de comprendre comment les solutions de rechange sont évaluées par les participants éventuels. Les choix ne sont pas totalement sans contraintes et, si les options futures sont restreintes par un changement de climat, les participants peuvent être en mesure de substituer une activité ou un endroit à d'autres. L'évaluation de la mesure dans laquelle des loisirs et des lieux de loisirs peuvent constituer des substituts pourrait donc être un domaine de recherche utile.

L'évaluation des impacts du changement climatique sur l'aménagement et la désignation de réserves naturelles représente un important secteur de recherche, qui n'a pas reçu encore toute l'attention qu'il mérite.

Parmi les autres sujets qui méritent d'être approfondis figurent l'évaluation des façons de diversifier la prestation de loisirs afin d'en diminuer la vulnérabilité, l'évaluation de l'influence des phénomènes extrêmes sur cette prestation, et l'incidence des modifications du zonage du territoire, des assurances et d'autres ajustements sociaux sur la prestation d'activités récréatives dans des milieux à forte énergie comme les rivages et les montagnes.

Le climat n'est qu'un facteur parmi tant d'autres qui influent sur le tourisme et les loisirs. Il faut en évaluer l'importance relative par rapport à d'autres variables pour :

a. différents loisirs;
b. différents endroits.

On pourrait bien améliorer nos connaissances en utilisant les données existantes sur le climat afin d'évaluer la longueur actuelle des saisons d'exploitation, leur variabilité spatio-temporelle et la viabilité économique relative des entreprises récréatives. Ces études auraient des applications pratiques considérables. Les analyses pourraient faire mieux accepter l'utilité d'inclure le changement climatique dans les facteurs à prendre en considération lorsqu'on évalue la rentabilité des investissements dans le secteur des loisirs.

Mais, même si on était déjà en mesure de prévoir avec certitude quel sera le changement climatique, il est douteux que l'industrie du tourisme et des loisirs comprenne suffisamment à quel point elle est vulnérable à la variabilité climatique pour planifier rationnellement son avenir.

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Dans le présent exposé, on s'est penché sur les impacts des processus atmosphériques, et plus particulièrement du changement climatique, sur les loisirs. On s'est attaché surtout à l'importance du tourisme ainsi qu'à l'ampleur et à la complexité des influences exercées par le climat et les conditions météorologiques sur le tourisme. On a montré que le tourisme et les loisirs apportent une contribution importante à l'économie nationale et régionale, mais que celle-ci est compromise à l'occasion par la variabilité du climat actuel. Toutefois, les connaissances actuelles ne permettent pas une comptabilité exhaustive de ces coûts appréciables.

Bien qu'il existe de la littérature sur les relations entre le climat et le tourisme, on a très peu écrit sur les impacts du changement climatique pour le tourisme et les loisirs. La correspondance échangée avec les pays membres de l'Organisation mondiale du tourisme et l'Organisation météorologique mondiale indique qu'à peu près tout le monde reconnaît l'importance du climat pour le tourisme, mais qu'à peu près personne ne s'est penché sérieusement sur les impacts du changement climatique mondial pour le tourisme et les loisirs (Wall et Badke, 1994). C'est fort dommage, car, à cette époque, l'humanité risque de faire face à l'un des bouleversements climatiques les plus rapides et les plus radicaux de son histoire.

Le changement et la variabilité du climat ont des conséquences importantes pour le tourisme et les loisirs; les amateurs de loisirs et l'industrie qui répond à leurs besoins bénéficieraient d'une capacité de prévision accrue des perturbations du climat et des conditions météorologiques et de leur impact sur les systèmes humains et naturels. Mais la plupart des études qui ont été effectuées jusqu'à présent sont fondées sur des fluctuations à court terme du climat et des conditions météorologiques; il existe peu d'analyses dans le contexte du tourisme sur les répercussions du changement climatique à long terme. Toutefois, les climats qu'on connaîtra dans l'avenir influeront sur la viabilité de divers types de tourisme, posant des défis et des menaces à certains lieux de destination et ouvrant des débouchés à d'autres.

Dans l'état actuel des connaissances, il serait peut-être prématuré de recommander des politiques, mais on peut faire quelques observations pertinentes. Les régions côtières semblent nécessiter une attention spéciale, en raison de leur vulnérabilité aux changements du niveau de l'eau et de leur importance pour les loisirs. Les exploitants de centres de ski situés dans des régions de climat limite peuvent devoir améliorer leur équipement de fabrication de neige et diversifier leurs activités, stratégies qui pourraient être rentables même sans changement climatique. Les activités estivales aux latitudes moyennes et élevées peuvent profiter de saisons allongées, pourvu que la géographie côtière ne soit pas perturbée et qu'il n'y ait pas de pénurie d'eau.

Le changement climatique mondial posera des problèmes et offrira des débouchés aux lieux de destination. Ces changements climatiques dont nous avons parlé devraient se produire pendant la durée utile de nombreux projets d'investissement actuels et durant la vie de nombreux habitants actuels de la Terre. Bien que les impacts sur le tourisme risquent d'être profonds, très peu de chercheurs en tourisme ont commencé à formuler les questions pertinentes, à plus forte raison à élaborer des méthodologies qui feront avancer la compréhension de la nature et de l'ampleur des défis qui s'annoncent.

## RÉFÉRENCES

Alexander, H.L. (1997). *Climate and Outdoor Recreation in Sauble Beach, Ontario: Current Sensitivities and Potential Impacts of Climate Change,* thèse de maîtrise, Université de Toronto, Toronto (Ont.), 56 p. + appendices.

Armentano, T.V., Park, R.A. et Cloonan, C.L. (1988). « Impacts on coastal wetlands throughout the United States », dans *Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Coastal Wetlands,* J. Titus (dir.), Office of Policy, Planning and Evaluation, United States Environmental Protection Agency, Washington (D.C.), p. 87-149.

Bergmann-Baker, U., Brotton, J. et Wall, G. (1992-1993). Non-Riparian Recreational Boater and Marina Operations Study: Canadian Section. Interim Report and Final Reports, IJC Working Committee 3, Task Group 4, The Water Network, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.). Trois rapports – marinas, navigation de plaisance, implications des fluctuations de niveau (ronéo).

Bergmann-Baker, U., Brotton, J. et Wall, G. (1995). Socio-economic impacts of fluctuating water levels for recreational boating in the Great Lakes basin, *Canadian Water Resources Journal*, 20(3):185-194.

Brotton, J. et Wall, G. (1993). « Prospects for downhill skiing in a warmer world », dans *The Impact of Climate Change on Water in the Grand River Basin, Ontario,* M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 93-104.

Brotton, J. et Wall, G. (1997). Climate change and the Bathurst caribou herd in the Northwest Territories, Canada, *Climatic Change*, 35(1):35-52.

Clawson, M. et Harrington, W. (1991). « The growing role of outdoor recreation », dans *America's Renewable Resources: Historical Trends and Current Challenges,* K.D. Frederick and R.A. Sedjo (dir.), Resources for the Future, Washington (D.C.), p. 249-284.

Crapo, D.M. (1970). *Recreational Activity Choice and Weather: the significance of various weather perceptions in influencing preferences and for selected recreational activities in Michigan State Parks,* thèse de doctorat inédite, Michigan State University, East Lansing (Mich.), 129 p.

Crowe, R.B., McKay, G.A. et Baker, W.M. (1978). *The Tourist and Recreation Climate of Ontario,* REC-1-73, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ont.), vol. 1, 70 p.

Duk, M. (1997). *Climate change and lower Great Lakes water levels: the impacts on boating in Twelve Mile Bay and Moon Bay*, essai inédit d'études supérieures, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 56 p.

Frederick, K.D. et Sedjo, R.A. (dir.) (1991). *America's Renewable Resources: Historical Trends and Current Challenges*, Resources for the Future, Washington (D.C.), 296 p.

Goeldner, C.R., Buchanan, T.A., DiPersio, C.E. et Hayden, G.S. (1990) *Economic Analysis of North American Ski Areas 1981-1989*, Business Research Division, University of Colorado, Boulder (Colo.), 147 p.

Great Lakes Commission (1990). *A Guidebook to Drought Planning, Management and Water Level Changes in the Great Lakes*, Great Lakes Commission, Ann Arbor (Mich.), 61 p.

Hare, F.K. (1985). « Climatic change in the Great Lakes Basin: an appraisal », dans *Climate Impact Assessment in the Great Lakes Basin: Overview and Research Recommendations*, P. Timmerman et A.P. Grima (dir.), Institute for Environmental Studies Monograph No. 7, Université de Toronto, Toronto (Ont.), p. 1-16.

Harrington, W. (1991) « Wildlife; severe decline and partial recovery », dans *America's Renewable Resources: Historical Trends and Current Challenges*, K.D. Frederick et R.A. Sedjo (dir.), Resources for the Future, Washington (D.C.), p. 205-246.

Hind, D. (1986). Implications of climatic change for recreation in Georgian Bay Islands National Park, essai inédit d'études supérieures, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 44 p.

Jackson, E. (1986). Outdoor recreation participation and attitudes to the environment, *Leisure Sciences*, 5, p. 1-23.

Lamothe et Périard Consultants (1988). *Les répercussions d'un changement climatique sur l'industrie du ski alpin au Québec, Sommaire du changement climatique, SCC 88-03*, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ont.), 12 p.

Lamothe et Périard Consultants (1989). *Les répercussions d'un changement climatique sur les besoins en eau des municipalités et sur l'industrie du golf au Québec, Sommaire du changement climatique SSC 89-04*, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ont.), 6 p.

Last, J.M. (1993). Global change: ozone depletion, greenhouse warming, and public health, *Annual Review of Public Health*, 14, p. 115-136.

Leisure Industry Digest (1985). Leisure travel, *Leisure Industry Digest*, 5(23):3.

Lipski, S. et McBoyle, G. (1991). The impact of global warming on downhill skiing in Michigan, *East Lakes Geographer*, 26:37-51.

Lundgren, J. (1989) « Patterns », dans *Outdoor Recreation in Canada*, G. Wall (dir.), Wiley, Toronto (Ont.), p. 133-161.

Lynch, P., McBoyle, G. et Wall, G. (1981). « A ski season without snow », dans *Canadian Climate in Review 1980*, D. Phillips et G. McKay (dir.), Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Ottawa (Ont.), p. 42-50.

Lynch, P., McBoyle G.R. et Wall, G. (1982). Skiing, snow and solvency, *Geographical Inter-University Resource Management Seminars*, 12, p. 31-70.

McBoyle, G. et Wall, G. (1986). « The resiliency and sensitivity of downhill skiing in Ontario to climatic change », *Proceedings of the Eastern Snow Conference held June 5-6, 1986, Hanover, New Hampshire*, J.E. Lewis (dir.), American Geophysical Union et American Water Resources Association, p. 94-105.

McBoyle, G., Wall, G., Harrison, R., Kinnaird, V. et Quinlan C. (1986). Recreation and climatic change: a Canadian case study, *Ontario Geography*, 28:51-68.

McBoyle, G. et G. Wall (1987). The impact of $CO_2$-induced warming on downhill skiing in the Laurentians, *Cahiers de Géographie de Québec*, 31:39-50.

McBoyle, G. et Wall, G. (1992). « Great Lakes skiing and climate change », dans *Mountain Resort Development: Proceedings of the Vail Conference 1991*, A. Gill et R. Hartmann (dir.), Centre for Tourism Policy and Research, Simon Fraser University, Burnaby (C.-B.), p. 82-92.

Martinello, L. et Wall, G. (1993). « Implications of climate change for Luther Marsh », dans *Climate Change and Water Management in the Grand River Basin*, M. Sanderson (dir.), Department of Geography Publication Series No. 40, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 105-136.

Masterton, J. (1982). Skiing, snow and solvency: the climatological perspective, *Geographical Inter-University Resource Management Seminars*, 12:72-79.

Mieczkowski, Z.T. (1985). The tourism climate index: a method of evaluating world climates for tourism, *The Canadian Geographer*, 29:220-223.

Murphy, P. et Bayley, P. (1989). Tourism and disaster planning, *Geographical Review*, 79:34-42.

Myers, K. et Wall, G. (1989). Factors influencing attendance: Toronto Blue Jay games, *Sport Place*, 3(1/2):29-33.

Ordower, M. (1995). *Investigating the Sensitivity of Downhill Skiing in Southern Ontario to Climate Change*, rapport inédit préparé pour le Service de l'environnement atmosphérique, Canada Centre for Inland Waters, Burlington (Ont.), 22 p.

Papson, S. (1979). Tourism: world's biggest industry in the twenty-first century, *The Futurist*, 12, p. 249-257.

Parker, P., Cariou, G., Duff, S., Hamersak, S., Kershaw, D., Moores, M., Morrison, D., Scott, D. et Wilson, T. (1993). Impact Analysis and Assessment for: recreation; domestic water supply and sanitation; industrial and commercial water supply and agriculture, IJC Working Committees 2 and 4, The Water Network, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.) (ronéo).

Paul, A.H. (1972). « Weather and the daily use of outdoor recreation areas in Canada », dans *Weather Forecasting for Agriculture and Industry*, J. Taylor (dir.), Newton Abbot; David and Charles, p. 132-146.

Pearce, D. (1981). *Tourist Development*, London: Longman, 112 p.

Peters, R. et Darling, J. (1985). The greenhouse effect and nature reserves, *BioScience*, 35(11):707-717.

Riebsame, W. (1985). « Seven challenges of climate impact research », paper presented at the *Workshop on Climate Impact Assessment in the Great Lakes Basin: Research Strategies, held February 8-9, 1985, King City, Ontario* (ronéo).

Scott, D.J. (1993). *Ontario Cottages and the Great Lakes Shoreline Hazard: Past Experiences and Strategies for the Future*, thèse de maîtrise inédite, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 143 p.

Schlegel, P. (1994). *The influence of weather on outdoor recreational facility use: a case study of Sportworld, Kitchener, Ontario*, essai d'études supérieures inédit, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 82 p.

Smit, B. (dir.) (1993). *Adaptation to Climate Variability and Change: Report to the Task Force on Climate Adaptation*, Occasional Paper No. 19, Université de Guelph, Guelph (Ont.), 53 p.

Smith, K. (1990). Tourism and climate change, *Land Use Planning*, 7:176-180.

Staple, T. et Wall, G. (1996). « Climate change and recreation in Nahanni National Park Reserve », *The Canadian Geographer*, 40(2):109-120.

Stevens, T.J. (1991). The impact of global climate change on Lake Huron marina operations, essai d'études supérieures, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 86 p.

Taylor, J.A. (dir.) (1970). *Weather Economics*, Memorandum No. 11, University College of Wales, Aberystwyth, Wales (G.-B.), 126 p.

Titus, J.G. (dir.) (1988). *Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Coastal Wetlands*, Office of Policy, Planning and Evaluation, United States Environmental Protection Agency, Washington (D.C.), 152 p.

Vetsch, J. (1986). *The implications of $CO_2$-induced climatic change for Prince Albert National Park, Saskatchewan*, thèse de maîtrise inédite, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 167 p.

Wall, G. (1985) *Climatic Change and its Impact on Ontario: Tourism and Recreation*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, 1985 (2 volumes) (ronéo).

Wall, G. (1988). *Les répercussions du changement climatique sur le tourisme et les loisirs en Ontario. Sommaire du changement climatique, SCC 88-05*, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ont.), 16 p.

Wall, G. (dir.) (1989a). *Outdoor Recreation in Canada*, Wiley, Toronto (Ont.), 365 p.

Wall, G. (1989b). *Les répercussions du changement climatique sur le parc national de Prince-Albert en Saskatchewan, Sommaire du changement climatique, SCC 89-03*, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ont.), 8 p.

Wall, G. (1991). « Tourism in Ontario », dans *Ontario: Geographical Essays on Economy and Environment*, B. Mitchell (dir.), Department of Geography Publication Series No. 34, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), p. 85-102.

Wall, G. (1992a). « Tourism alternatives in an era of global climate change », dans *Tourism Alternatives: Potentials and Problems in the Development of Tourism*, W. Eadington et V. Smith (dir.), University of Pennsylvania Press, Philadelphia (Penn.), p. 194-215.

Wall, G. (dir.) (1992b). *Implications of Climate Change for Pacific Northwest Forest Management*. Department of Geography Publication Series No. 15, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 232 p.

Wall, G. (1993). Tourism and recreation in a warmer world, dans *Leisure and the Environment*, S. Glyptis (dir.), Belhaven, London (Ont.), p. 293-306.

Wall G. (1994). « Implications of climate change for tourism and recreation », dans *Proceedings of a US/Canada Symposium on A Regional Response to Global Climate Change: New England and Eastern Canada*, R. Greene (dir.), University of Maine, Orono (Me.), p. 94-106.

Wall, G. (1995). « Tourism and recreation », dans *The Case for Canadian Contributions to the Global Climate Observing System (GCOS)*, Canadian Ad Hoc GCOS Task Group (dir.), Report to the Canadian Climate Program Board and the Canadian Global Change Programme Board, p. 137-140.

Wall, G. (1996). « The implications of climate change for tourism in small islands », dans *Sustainable Tourism in Islands and Small States: Issues and Policies*, Briguglio, L., Archer, B., Jafari, J. et Wall, G. (dir.), Cassell, London (Ont.), p. 206-216.

Wall, G. (sous presse). Implications of global climate change for tourism and recreation in wetland areas, *Climatic Change*.

Wall G. et Badke, C. (1994). Tourism and climate change: an international perspective, *Journal of Sustainable Tourism*, 2:193-203.

Wall, G. et Costanza, M. (1984). « Recreational behavior in coastal environments: variations in cottaging in different physical settings », *Proceedings of the 7th Applied Geography Conference*, 7:175-85.

Wall, G., Harrison, R., Kinnaird, V., McBoyle, G. et Quinlan, C. (1986a). « Climatic change and recreation resources: the future of Ontario wetlands? », *Proceedings of Applied Geography Conference*, 9:124-131.

Wall, G., Harrison, R., Kinnaird, V., McBoyle, G. et Quinlan, C. (1986b). The implications of climatic change for camping in Ontario, *Recreation Research Review*, 13(1):50-60.

Wall, G. et Wright, C. (1977). *The Environmental Impact of Outdoor Recreation*, Department of Geography Publication Series No. 11, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 69 p.

Wareing, M. (1994). Implications of Climate Change for Ice Fishing on Lake Simcoe, essai d'études supérieures inédit, Département de Géographie, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.), 51 p.

World Tourism Organization (1997). *Tourism Highlights 1996*, World Tourism Organization, Madrid (Espagne), 29 p.