



Environnement
Canada

Environment
Canada

PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

PRÉPARÉ PAR

DAVID FRANCIS

LANARK HOUSE COMMUNICATIONS

TORONTO

ET

HENRY HENGEVELD

SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT ATMOSPHÉRIQUE

ENVIRONNEMENT CANADA

Le présent document s'inscrit dans le rapport sur l'état de l'environnement



Ce papier contient un minimum de 50% de fibres recyclées
dont 10% de fibres recyclées après consommation.

COMMENTAIRES ET REMERCIEMENTS

Le document Phénomènes météorologiques extrêmes et changement climatique a été préparé pour répondre aux questions souvent posées par les décideurs, et bien d'autres, à savoir, si vraiment les changements perçus dans le comportement du temps au cours des récentes années, surtout concernant les phénomènes météorologiques extrêmes et les désastres qu'ils entraînent, sont réels et, dans un tel cas, si vraiment ils sont associés au changement planétaire. C'est le deuxième numéro d'une série de rapports spéciaux «Sommaire du changement climatique» qui ont pour but d'expliquer et d'évaluer notre compréhension, ou son manque, de la science du changement climatique dans ses aspects les plus complexes et controversés. Cette série s'inscrit dans le cadre des Sommaires du changement climatique centrés sur les études scientifiques concernant les implications du changement planétaire

David Francis (Lanark House Communications, Toronto) a préparé la version originale en coopération avec Henry Hengeveld, Conseiller scientifique supérieur sur le changement climatique du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada.

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes pour leur précieuse contribution, révision et critique : Bill Hogg, Doug Whelpdale et Francis Zwiers (Direction de la recherche climatique, SEA); Roger Street et David Etkin (Groupe de recherche en adaptation environnementale, SEA); Pam Kertland, David Phillips et John Stone (Direction de la Politique, du Programme et des Affaires internationales, SEA); Eric Taylor (Région du Pacifique et du Yukon d'Environnement Canada); Jim Abraham et Paul Galbraith (Région de l'Atlantique d'Environnement Canada); et Heather Johannesen (Halifax).

Marie-France Guéraud du Bureau de traduction, Travaux publics et services gouvernementaux Canada, à Montréal a fait la traduction du texte anglais et Gilles Tardif, EnviroEdit, Keswick, Ont. a révisé le texte français. Le graphisme, les illustrations et la production technique sont l'oeuvre de BTT Communications de Toronto. Les photos proviennent de la Presse canadienne (p. 7 et 16), de la Région de l'Ontario du SEA (p. 24) et du Ministère des ressources naturelles du Manitoba (p. 25).

On peut obtenir des copies de ce document, sans frais, auprès de :

**Division des produits climatologiques et hydrologiques
Service de l'environnement atmosphérique
4905 rue Dufferin
Downsview, Ontario
M3H 5T4

(416) 739-4328**

Le présent document s'inscrit dans le rapport sur l'état de l'environnement

**© Ministre des approvisionnements et services Canada
Canada 1998**

TABLE DES MATIÈRES

LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES DEVIENNENT-ELLES PLUS COURANTES?	1
VARIABILITÉ NATURELLE	9
RECHAUFFEMENT PAR EFFET DE SERRE ET EXTRÊMES MÉTÉOROLOGIQUES	13
IMPLICATIONS D'UNE AUGMENTATION DES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES	22
RÉPONSES	23
QUELLES CONCLUSIONS TIRER?	26
ENCÂDRÉS	
QU'EST-CE QU'UN PHÉNOMÈNE EXTRÊME?	2
LES EL NIÑO ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	12
INONDATIONS AU CANADA	16
LA TEMPÊTE DE VERGLAS DE 1998	24
LA POSSIBILITÉ DE SURPRISES	27

PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les conditions météorologiques de notre planète deviennent-elles plus extrêmes? Jusqu'ici, dans les seules années 90, il y a eu au moins une demi-douzaine d'inondations d'ampleur épique au Canada et aux États-Unis, dans le centre de l'Europe et dans le sud de la Chine, ainsi que des sécheresses terribles dans le nord de la Chine et du Vietnam, en Corée du Nord et dans le sud de l'Europe. En 1993, la côte du nord-est des États-Unis a connu sa plus forte tempête de neige en plus d'un siècle. À la fin de 1996, c'était le tour de Victoria, qui a été paralysée par la plus grosse chute de neige depuis qu'on y fait des observations météorologiques. Enfin, en janvier 1998, la pire tempête de verglas de tous les temps a privé la région de Montréal et l'est de l'Ontario d'électricité pendant des semaines. L'ouest de l'Europe, qui jouit habituellement d'un climat tempéré, a subi quatre importantes tempêtes pendant l'hiver de 1990. En 1987, la plus grosse tempête depuis 1705 frappait le sud de l'Angleterre. En 1995, des vagues de chaleur tuaient plus de 500 personnes dans le nord et le centre de l'Inde et plus de 550 à Chicago, chiffres qui paraissent dérisoires à côté des 5 000 à 10 000 décès causés par la chaleur dans le centre et l'est des États-Unis pendant l'été 1980.

Le simple nombre des événements survenus au cours des vingt dernières années incite à se poser de sérieuses questions sur l'état actuel et futur du climat mondial. Ces phénomènes font-ils partie d'une tendance à long terme vers des conditions météorologiques plus extrêmes, ou ne sont-ils qu'une aberration temporaire? Sont-ils dus aux seules forces naturelles? Ou bien pourraient-ils être liés au changement climatique induit par l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère? Il est vital de répondre à ces questions. Les ouragans, inondations, sécheresses et autres phénomènes extrêmes peuvent en effet semer la mort et

la dévastation à une échelle catastrophique. S'ils se font plus fréquents, les coûts qu'ils imposeront à la société vont devenir énormes. S'ils sont une conséquence inévitable du changement climatique, nos estimations actuelles des impacts de ce dernier, si sérieuses qu'elles soient, auront été trop optimistes, et il deviendra impératif de procéder rapidement à des réductions draconiennes des émissions de gaz à effet de serre.

LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES DEVIENNENT-ELLES PLUS COURANTES?

Le nombre d'inondations, tempêtes et autres fléaux météorologiques extraordinairement graves qui sont survenus depuis 15 à 20 ans semble suggérer que ces épisodes sont plus fréquents, mais il est difficile de faire la preuve statistique d'une tendance en ce sens. Les chiffres compilés par l'industrie mondiale des assurances montrent cependant que les pertes imputables à des catastrophes météorologiques ont connu une hausse spectaculaire ces dernières décennies. Pour les années 60 au complet, par exemple, les pertes assurées dues aux tempêtes de vent ont totalisé dans le monde entier 2,0 milliards de dollars (en dollars US de 1990). Pour

les années 80, ce chiffre est monté à 3,4 milliards de dollars. Pour les trois premières années de la décennie 90, il a atteint 20,2 milliards. Avant 1987, il était rare de voir une perte d'assurance liée aux conditions climatiques qui soit de l'ordre du milliard de dollars; cependant, entre janvier 1988 et janvier 1997, la chose s'est produite 23 fois aux États-Unis seulement. Il n'est pas encore arrivé au Canada que l'on voie des pertes assurées de cet ordre liées à un seul événement météorologique, mais les coûts totaux (pertes assurées et non assurées) de certains, comme l'inondation du Saguenay en 1996 et la tempête de verglas sur l'est du pays en 1998, ont dépassé cette valeur.

**Les ouragans, inondations,
sécheresses et autres phénomènes
extrêmes peuvent en effet semer
la mort et la dévastation à une
échelle catastrophique. S'ils se
font plus fréquents, les coûts
qu'ils imposeront à la société
vont devenir énormes.**

QU'EST-CE QU'UN PHÉNOMÈNE EXTRÊME?

Les phénomènes météorologiques extrêmes sont des conditions qui se situent à l'extérieur de la plage normale d'intensité pour un endroit donné. Ils sont donc peu fréquents, voire rares. Ils peuvent aussi être destructeurs, mais ne conduisent pas tous à des catastrophes.

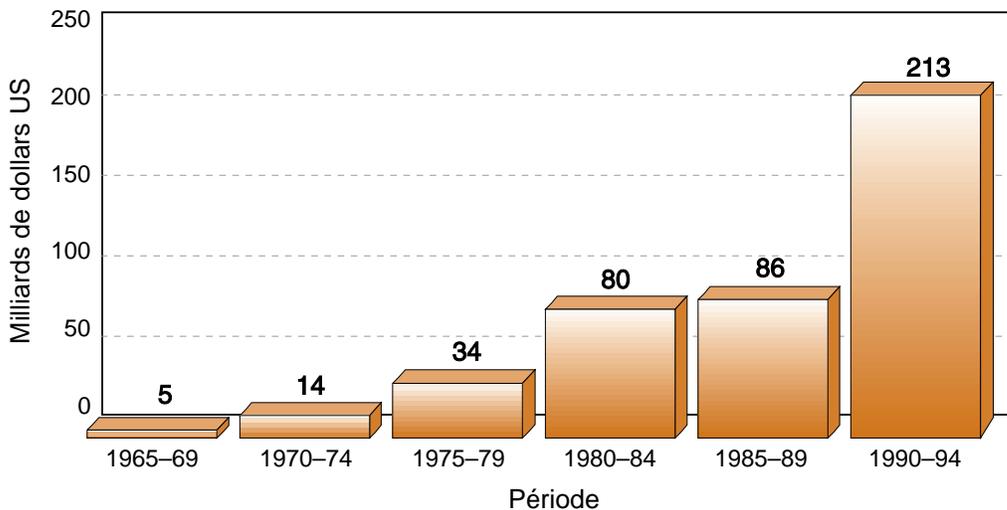
À certains égards, ce qu'on entend par « conditions météorologiques extrêmes » peut varier selon l'endroit. C'est souvent fonction de ce à quoi la région est habituée et préparée. Par exemple, une chute de neige de 20 cm serait un phénomène extrême à Washington, D.C., mais pas à Montréal. À Washington, elle entraînerait probablement une situation d'urgence; à Montréal, cela ne serait qu'un des inconvénients de l'hiver.

Pour prendre naissance, des phénomènes extrêmes comme les ouragans, les tornades et les tempêtes de verglas requièrent souvent que soient réunies un certain nombre de conditions. Beaucoup de ces phénomènes sont issus d'une combinaison de facteurs, comme la fusion de deux systèmes météorologiques ou l'occurrence simultanée d'un extrême météorologique et d'un autre facteur qui en intensifie l'impact. L'ouragan Hazel, par exemple, était une tempête tropicale en cours d'affaiblissement lorsqu'elle s'est fusionnée avec une profonde dépression au nord-ouest de Toronto en octobre 1954, produisant des pluies torrentielles et l'inondation la plus meurtrière de l'histoire du Canada. Pour ce qui est des inondations du Saguenay, les niveaux d'eau dans son bassin étaient déjà inhabituellement élevés lorsque, le 19 juillet 1996, la région a été frappée par la plus grosse tempête de pluie de son histoire météorologique connue. Il y aurait quand même eu une inondation si les niveaux d'eau avaient été normaux, mais les résultats n'auraient pas été aussi catastrophiques.

Ces chiffres font certainement croire à une forte hausse du nombre d'événements météorologiques destructeurs, mais le seul coût n'est pas un indicateur précis des tendances du climat. En fait, bien qu'il soit régi par le nombre et la gravité de ces épisodes, le coût l'est également par la taille et la richesse de la population touchée, deux facteurs qui ont augmenté eux aussi. Deux chercheurs américains, Roger Pielke, Jr. et Christopher Landsea, par exemple, ont avancé que la hausse des coûts des dommages dus aux ouragans aux États-Unis peut être attribuée à trois facteurs : l'inflation, la croissance démographique dans les zones côtières vulnérables et la prospérité accrue de cette population. Selon eux, une fois ces facteurs pris en compte, l'impact économique des ouragans aux États-Unis a en fait baissé dans les dernières décennies.

Si l'on applique le même raisonnement aux pertes mondiales dues à des catastrophes naturelles, les résultats sont cependant différents. Les données de Munich Re, l'une des plus grosses firmes de réassurance du monde, montrent que les pertes économiques directes (en dollars US de 1992) dues aux catastrophes naturelles ont augmenté, pour l'ensemble de la planète, d'un facteur de 43 entre la dernière moitié des années 60 et la première moitié des années 90. La richesse mondiale (mesurée par le Produit intérieur brut, PIB) a quant à elle augmenté d'un facteur de 2,5 et la population de 25 %. Autrement dit, l'inflation étant déjà prise en compte par l'utilisation de dollars constants, la croissance économique et la croissance démographique ne font même pas augmenter les pertes d'un facteur de 4. D'autres facteurs d'ordre démographique, comme la migration vers des zones vul-

PERTES ÉCONOMIQUES ET ASSURÉES IMPUTABLES À DES CATASTROPHES NATURELLES, 1965-1994



Source : Adaptation de Munich Re (1996)

Les augmentations spectaculaires des pertes économiques dues à des catastrophes naturelles, la plupart liées à des phénomènes météorologiques, peuvent impliquer une augmentation des extrêmes météorologiques. Ces tendances doivent être interprétées avec prudence, cependant, puisqu'elles sont aussi considérablement gouvernées par la croissance démographique et économique.

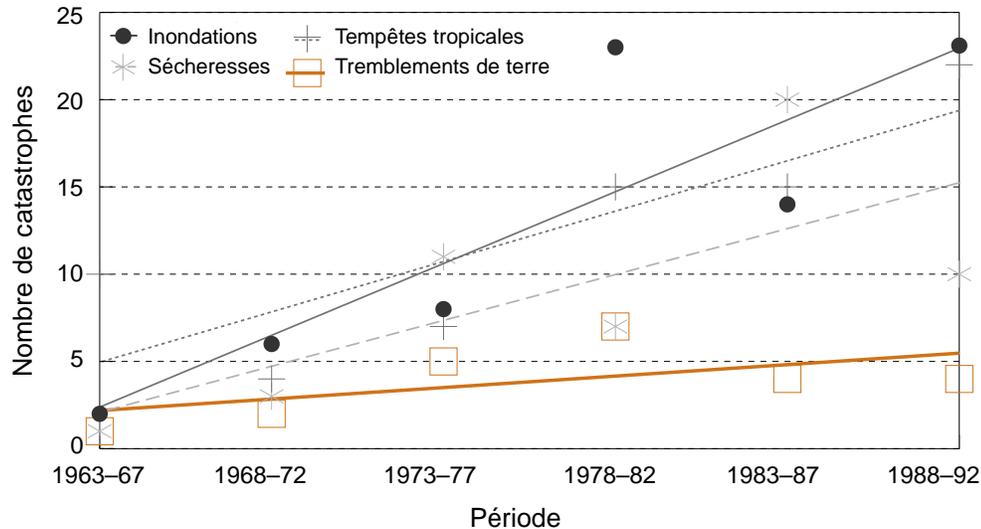
néables, peuvent expliquer une partie de la hausse des pertes, mais il en reste une portion significative. Puisque l'augmentation des pertes est presque entièrement due à des phénomènes d'ordre météorologique, la possibilité d'un accroissement des épisodes de temps violent reste une explication plausible.

La possibilité d'une tendance des catastrophes météorologiques à l'augmentation est également confortée par une analyse effectuée par le Secrétariat de la Décennie internationale de la prévention des catastrophes naturelles (DIPCN), à Genève. On a donc comparé les changements des quatre catégories principales de grandes catastrophes naturelles : inondations, tempêtes tropicales, sécheresses et tremblements de terre. Entre le milieu des années 60 et le début des années 90, le nombre total de ces catastrophes a augmenté, mais celles qui sont liées aux conditions météorologiques l'ont fait beaucoup plus vite. Pour être considéré comme une catastrophe majeure, un événement doit soit causer des dommages égaux à au moins 1 % du PIB du pays touché, soit affecter plus de 1 % de sa popula-

tion, soit faire plus de 100 morts. Avec ces critères, on filtre partiellement les distorsions liées à la croissance démographique et économique, mais pas totalement. Cependant, comme l'influence de ces facteurs sur les tendances des tremblements de terre et des catastrophes météorologiques serait plus ou moins la même, on peut penser que les données reflètent une réelle augmentation du nombre de phénomènes météorologiques violents.

Toutefois, dans le meilleur des cas, les pertes des assurances et les tendances des catastrophes ne sont qu'un indicateur indirect du changement climatique. Les enregistrements historiques en donnent des indices beaucoup plus directs, mais essayer de repérer, dans un corpus de données hautement variables, des tendances et des probabilités pour des extrêmes météorologiques de fréquence très basse est une entreprise risquée, qui se trouve compliquée par des problèmes liés aux irrégularités et à la qualité des données, surtout dans les enregistrements anciens qui constituent les points de référence de l'étude. Si l'on y ajoute le fait qu'il n'y a eu

ACCROISSEMENT DES CATASTROPHES NATURELLES (INONDATIONS, TEMPÊTES TROPICALES, SÉCHERESSES ET TREMBLEMENTS DE TERRE), DE 1963-1967 À 1988-1992



Source : Adaptation de Munich Re (1996)

Les données compilées par le Secrétariat de la DIPCN, à Genève, montrent, pour les trois dernières décennies une augmentation des quatre grandes catégories de catastrophes naturelles. Ce sont cependant les catégories d'ordre météorologique qui montrent le plus fort accroissement. Les tendances pour toutes les catégories devant être influencées sensiblement de la même manière par les facteurs économiques et sociaux, on peut penser que les données reflètent une augmentation réelle des phénomènes météorologiques violents.

que très peu d'analyses statistiques portant sur les phénomènes extrêmes, il n'est pas surprenant que les enregistrements climatologiques ne jettent pas plus de lumière sur les tendances des conditions météorologiques extrêmes.

Quoi qu'il en soit, des travaux effectués ces dernières années ont montré l'émergence de certaines tendances régionales d'un changement des conditions météorologiques extrêmes, bien qu'on ne puisse pas encore déceler de cohérence significative à l'échelle de la planète. Les tendances les plus fiables sont celles des températures et des précipitations (ce qui est normal, puisque ce sont les variables climatiques que l'on mesure le plus). Dans de nombreux endroits du monde, on a constaté une baisse d'occurrence des extrêmes de froid, comme on peut s'y attendre avec un réchauffe-

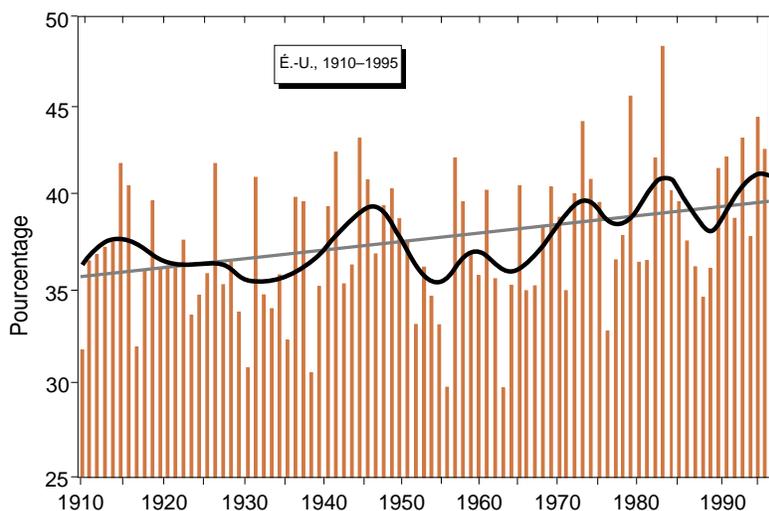
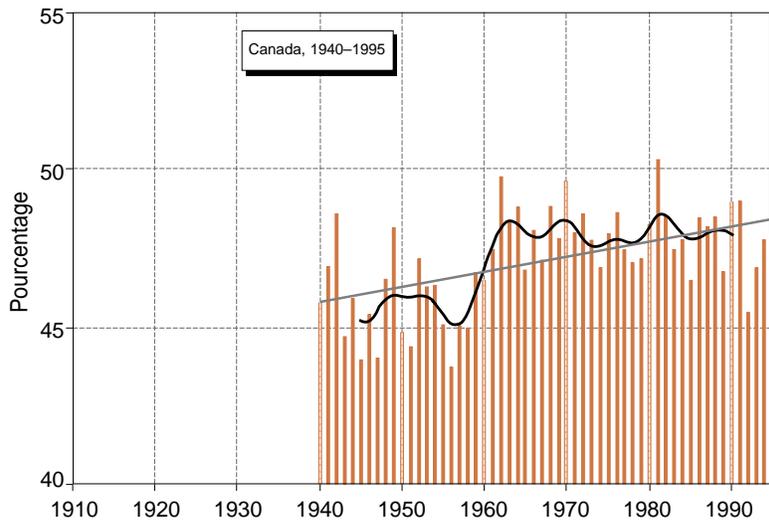
ment du climat. Ce qui est surprenant, c'est que l'on n'ait pas encore observé d'augmentation notable des extrêmes de chaleur. Cette situation semble liée au fait que, dans de nombreuses régions, les températures hivernales ont plus tendance à monter que les températures estivales, et les minimums nocturnes plus que les maximums diurnes.

La température montre donc un affaiblissement des extrêmes, jusqu'ici du moins, mais on remarque une tendance à l'augmentation des précipitations extrêmes dans la plus grande partie des zones terrestres de l'hémisphère Nord. Les pluies abondantes ont augmenté au Japon, aux États-Unis, dans l'ex-Union soviétique, en Chine et dans les pays bordant l'Atlantique Nord. Les relevés canadiens montrent aussi une tendance vers des précipitations plus fortes depuis 1940,

TENDANCES DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES AU CANADA ET AUX ÉTATS-UNIS

Tant au Canada qu'aux États-Unis, le pourcentage des précipitations annuelles apporté par les 10 % des plus abondants des épisodes de précipitations de l'année a augmenté au cours de la seconde moitié du siècle. Les tendances canadiennes ont cependant été fortement marquées par les augmentations de précipitations dans le nord. Dans le sud du pays, les épisodes de précipitations extrêmes ont en fait baissé pendant le dernier siècle.

Rapport du total des 10 percentiles les plus élevés des épisodes de précipitations quotidiens au total de tous les épisodes



Source: Environnement Canada

bien que cette tendance se soit surtout produite sur le nord.

De même, les sécheresses sont devenues plus fréquentes depuis les années 70 dans certaines régions d'Afrique, le long des côtes du Chili et du Pérou et dans le nord-est de l'Australie. Les prairies d'Amérique du Nord ont aussi connu une augmentation de la sèche-

resse dans les années 80, mais les conditions étaient moins graves que dans les années 30 ou 50.

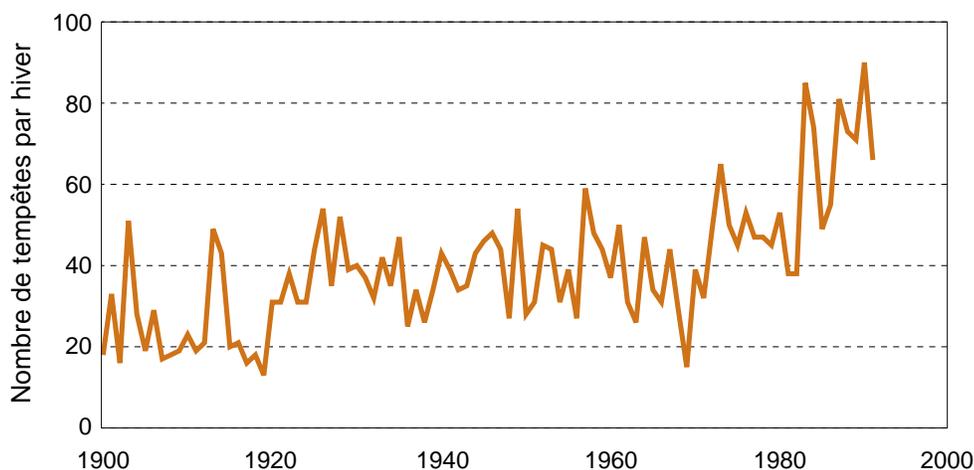
Les tempêtes violentes semblent aussi avoir augmenté dans certaines régions depuis le milieu des années 80, mais les preuves statistiques sont mitigées. Steven Lambert, un chercheur canadien, a récemment étudié l'activité des tempêtes hivernales dans les zones

extratropicales de l'Atlantique et du Pacifique depuis le début du présent siècle. En prenant les dépressions intenses comme marqueurs de tempêtes inhabituellement fortes, il a trouvé peu de changement dans le nombre de ces perturbations avant 1970. Par la suite, cependant, les tempêtes d'hiver sont devenues beaucoup plus fréquentes, surtout dans le Pacifique. D'autres chercheurs, utilisant des méthodes semblables pour analyser les tempêtes dans l'Atlantique Nord, ont aussi remarqué une augmentation de l'activité de ces dernières. En outre, une étude des tempêtes le long de la côte est de l'Amérique du Nord a indiqué qu'elles étaient plus nombreuses depuis le milieu des années 70, mais moins qu'avant 1965. Les tempêtes postérieures à 1965 se distinguaient cependant par leur caractère destructeur. Sept des huit pires tempêtes qui ont touché la région au cours du dernier demi-siècle sont survenues dans les 25 dernières années.

D'autres chercheurs ont néanmoins émis des réserves sur ces conclusions. La qualité des enregistrements météorologiques utilisés pour ces études est, selon eux, trop inégale. En utilisant une technique statistique permettant d'étudier les phénomènes de sous-échelle, qui estime donc les conditions locales sur la base de leurs relations avec des systèmes météorologiques d'échelle plus grande, ils n'ont trouvé aucune tendance récente dans l'occurrence de tempêtes violentes. La plupart de ces études ont cependant été limitées à l'est de l'Atlantique Nord.

Les orages constituent une autre catégorie importante, parce qu'ils sont souvent accompagnés non seulement de vents forts et de pluies abondantes, mais aussi de grêle et de tornades. Il est difficile de mesurer l'activité orageuse sur une grande échelle, parce que les orages sont très localisés et très brefs. Ils ont donc bien des chances de ne pas être enregistrés, sauf s'ils surviennent

FRÉQUENCE DES TEMPÊTES HIVERNALES DANS L'HÉMISPHERE NORD



Source : Adaptation de Lambert (1996)

Ce graphique, provenant de l'analyse de violentes tempêtes d'hiver dans le Pacifique et l'Atlantique extratropicaux effectuée par Steven Lambert, d'Environnement Canada, montre une augmentation frappante de l'activité après 1970. D'autres études de tempêtes extratropicales ont cependant donné des résultats variés. Certaines concordent avec les conclusions de Lambert, mais d'autres n'ont pas trouvé de tendance statistiquement significative de la fréquence des tempêtes.

La tornade de Edmonton du 31 juillet 1987 a laissé 27 morts et 200 blessés en plus de causer des dommages dépassant 250 millions. On a démontré que la fréquence mensuelle des tornades sur les Prairies est en rapport étroit avec la température mensuelle moyenne, ce qui nous laisse penser qu'un printemps et un été plus chauds pourraient entraîner une augmentation des tornades sur la région.



à proximité d'une station météorologique. On a cependant des indications que les orages sont devenus plus fréquents dans certaines régions. Aux États-Unis, par exemple, le fait que la plus grande partie de l'augmentation des pluies abondantes se produise en été suggère un accroissement du nombre d'orages violents. On a recueilli d'autres indications venant du nord de l'Australie, où l'on a aussi constaté une croissance des pluies abondantes pendant l'été, et de France, où la forte grêle est devenue plus fréquente pendant cette saison. L'analyse des configurations nuageuses laisse elle aussi penser que l'activité orageuse a généralement augmenté dans les régions tropicales.

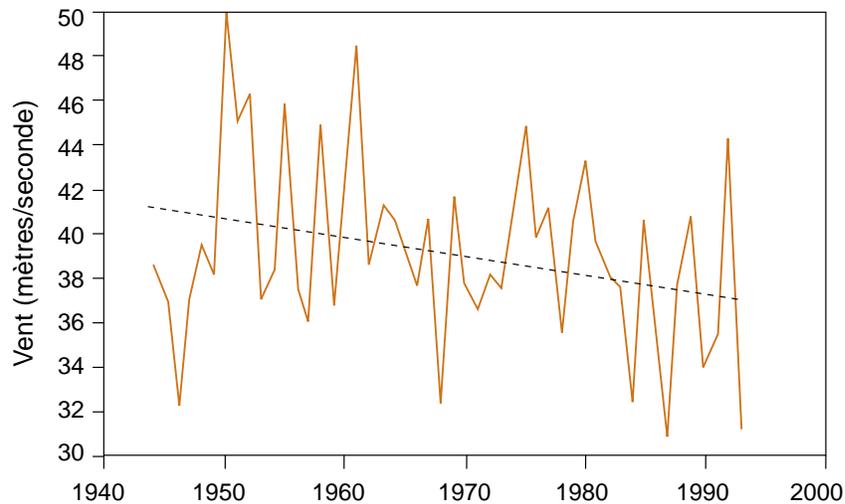
Les tornades sont encore plus difficiles à mesurer que les orages, puisqu'elles durent très peu de temps et qu'elles ne se manifestent pas toujours dans des régions habitées où on pourrait être certain de les observer. Aux États-Unis, où il y a des tornades plus souvent que dans n'importe quelle autre région du monde, les études ont montré une occurrence inchangée pour les tornades fortes, mais plus élevée pour les tornades de moindre intensité. Lorsque David Etkin, un chercheur d'Environnement Canada, a étudié l'activité des tornades dans les Prairies canadiennes, il a par contre noté qu'elles étaient plus fréquentes pendant les printemps et étés chauds. Étant donné que le réchauffement climatique devrait rendre cette situation plus courante, on

pourrait penser que la fréquence des tornades dans les Prairies doit augmenter si les températures de ces saisons se situent au-dessus des normales actuelles.

Les ouragans sont les tempêtes les plus destructrices, mais les anciens enregistrements de ces phénomènes sont souvent incomplets. Avant que l'on n'utilise les satellites, les tempêtes qui atteignaient les terres dans des régions inhabitées passaient souvent inaperçues. Pour l'Atlantique tropical, on dispose cependant depuis 1970 de données raisonnablement bonnes, qui, détail intéressant, montrent une tendance à la baisse de la fréquence annuelle des ouragans, bien qu'il y en ait eu un nombre supérieur à la moyenne en 1995 et en 1996. Les vitesses moyennes des vents des ouragans de l'Atlantique ont aussi baissé pendant une bonne partie du dernier demi-siècle, mais on ne remarque pas de tendance dans les vents maximums des tempêtes prises séparément d'une année à l'autre. L'activité des ouragans dans le Pacifique, par contre, semble avoir augmenté, mais les données n'y sont pas aussi fiables que pour l'Atlantique.

En plus de tenter de trouver des tendances pour les phénomènes pris séparément, les chercheurs en climatologie commencent aussi à élaborer des outils qui détecteront une tendance vers les extrêmes pour toute une gamme de phénomènes météorologiques. On a

VITESSE MOYENNE ANNUELLE DES VENTS MAXIMUMS SOUTENUS DES OURAGANS DE L'ATLANTIQUE, 1940-1993



Source : Adaptation de Landsea et al. (1996)

Les vitesses annuelles moyennes des vents maximums soutenus des ouragans de l'Atlantique ont généralement baissé au cours des 50 dernières années. Le nombre d'ouragans y a également diminué pendant la même période. Dans le Pacifique, cependant, ce nombre peut avoir augmenté.

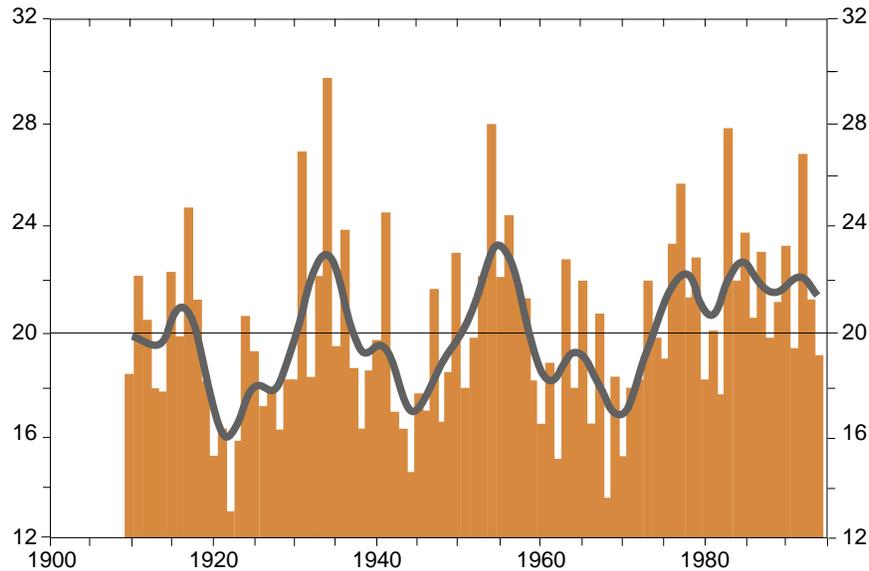
ainsi une approche plus directe pour savoir si le climat en général devient plus extrême. L'Indice des extrêmes climatiques (Climate Extremes Index) du National Climate Data Center des États-Unis en donne une illustration fort intéressante. Il combine plusieurs mesures de la superficie touchée par des extrêmes de températures et de précipitations, des sécheresses, et des surplus d'humidité du sol, en une valeur unique représentant la prédominance relative des phénomènes météorologiques violents pour une année donnée. À partir de 1910, il montre une quasi-périodicité des événements extrêmes, avec des maximums prononcés au milieu des années 30 et des années 50, alors que l'influence de l'homme sur le climat était beaucoup plus faible qu'aujourd'hui. L'indice remonte à des valeurs élevées au milieu des années 70, mais sans redescendre autant qu'il ne le faisait auparavant. En fait, il est même resté au-dessus de la moyenne pendant les années 80 et 90. La transformation du pic en plateau pourrait indiquer que l'occurrence accrue de temps violent devient une caractéristique permanente du climat, aux États-

Unis tout au moins; comme on ne dispose pas d'indices similaires pour d'autres pays ou régions, il est impossible de dire si cela constitue une tendance plus vaste, à l'échelle hémisphérique ou planétaire.

Dans l'ensemble, les enregistrements météorologiques ne permettent donc pas de tirer de conclusions, même s'ils en suggèrent parfois. La planète pourrait en être aux premiers stades d'une évolution radicale vers un climat dans lequel les extrêmes de tous ordres seraient plus fréquents. Ou bien la survenue actuelle de phénomènes extrêmes pourrait n'être que passagère. La validité relative de ces hypothèses dépend énormément des causes de cette prolifération d'événements extrêmes depuis 15 ou 20 ans.

On peut envisager trois raisons possibles. D'abord, si cette multiplicité d'événements extrêmes se révèle temporaire, elle pourrait s'expliquer en totalité par la variabilité naturelle du système climatique. Les pics de l'Indice des extrêmes climatiques pour les années 30 et 50, par exemple, indiquent probablement

INDICE DES EXTRÊMES CLIMATIQUES DES ÉTATS-UNIS



Source : U.S. National Climate Data Center

L'Indice des extrêmes climatiques des États-Unis combine diverses mesures des extrêmes de température et de précipitations en une mesure annuelle unique de la fréquence des phénomènes extrêmes. Bien qu'il ne recense pas tous les types d'extrêmes (les tornades par exemple en sont exclues), il donne une approximation utile des tendances des phénomènes extrêmes à l'échelle régionale. Il montre des pics prononcés mais brefs dans les années 30 et 50, et une période plus soutenue depuis le milieu des années 70.

une montée naturelle de la fréquence des conditions extrêmes. Si, par contre, le climat subit une évolution radicale et que les extrêmes deviennent plus courants, nous devons chercher quel changement fondamental s'exerce sur les forces qui le gouvernent. Ce qui fait naître deux nouvelles possibilités : le changement peut découler d'un processus entièrement naturel, comme une augmentation du rayonnement solaire, ou des activités humaines, en particulier du renforcement de l'effet de serre.

VARIABILITÉ NATURELLE

La variabilité est une caractéristique naturelle du système climatique. Elle peut prendre la forme de fluctuations à court terme, survenant et disparaissant sur une période de l'ordre de la décennie, ou à plus long terme, à l'échelle du siècle ou plus. Ces fluctuations sont la résultante d'un certain nombre de facteurs, dont l'un est la

simple variabilité aléatoire qui survient dans un système complexe quasi chaotique, comme le système climatique, parce que le nombre de forces en jeu est presque infini. Il y a cependant des limites théoriques claires à cette variabilité, qui sont définies par les gouvernes et processus de rétroaction à grande échelle qui régissent la quantité d'énergie entrant dans l'atmosphère et en sortant. Ces facteurs sont entre autres l'intensité du rayonnement solaire, l'orbite de la Terre et l'inclinaison de son axe, et la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il est cependant beaucoup plus difficile de déterminer comment le système se comportera dans les limites ainsi fixées. Dans le cas des phénomènes extrêmes, cette non-prédictibilité peut souvent être encore beaucoup plus grande, parce que les pires extrêmes sont fréquemment dus à une combinaison fortuite d'événements moins extrêmes, comme celle d'une tempête et d'une forte marée, ou la fusion de deux tempêtes.

Certaines anomalies climatiques à court terme ont une cause physique plus facile à repérer. Les fortes éruptions volcaniques peuvent avoir un important effet de refroidissement sur de nombreuses régions du monde, parce que les particules de soufre et de cendres volcaniques qu'elles expulsent dans la stratosphère peuvent bloquer partiellement la lumière solaire pendant plusieurs années. Pendant l'été 1816, par exemple, il y a eu de nombreux épisodes de gel au Québec et en Nouvelle-Angleterre. Ils ont été reliés à la très violente éruption du mont Tambora, en Indonésie, survenue en 1815. Plus récemment, à l'été 1991, l'éruption du mont Pinatubo, aux Philippines - la plus forte du XX^e siècle - a entraîné un refroidissement dans une bonne partie du reste du monde pendant deux ans. On estime qu'en 1992, elle a fait baisser la température moyenne de surface de la planète de 0,3 à 0,5 °C. Au Canada, cette année-là, ce refroidissement a été très marqué en Ontario et au Québec, la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent connaissant son mois de juillet le plus frais depuis les années 1880.

Les fluctuations à court terme peuvent aussi résulter de variations plus organisées dans le système climatique. La rigueur des hivers dans l'ouest de l'Europe, par exemple, tend à suivre les hauts et les bas de l'oscillation nord-atlantique, alternance des différences de pression entre l'Islande et les Açores. Les années où la différence est très marquée, l'ouest de l'Europe connaît des hivers plus doux, alors que l'ouest du Groenland et le Labrador ont du temps exceptionnellement froid. Lorsque la différence est faible, la situation est inversée. L'oscillation nord-atlantique tend à changer de phase tous les deux ou trois ans, mais peut à l'occasion conserver la même pendant une décennie ou plus. Il semble y avoir aussi une périodicité plus longue, une phase étant prédominante pendant 30 à 40 ans, puis l'autre pendant encore 30 à 40 ans. De 1900 à la fin des années 40, la phase positive (fortes différences de pression) a dominé. Ensuite, jusqu'aux alentours de 1980, la phase négative a été plus fréquente. Depuis lors, l'oscillation est revenue à sa phase positive. Les raisons de cette oscillation ne sont pas bien comprises, mais c'est de toute évidence un phénomène naturel qui influe sur la rigueur des hivers dans diverses régions du bassin de l'Atlantique Nord.

El Niño, ce réchauffement des eaux de surface dans la moitié est du Pacifique équatorial, est un phénomène quelque peu semblable, mais beaucoup plus connu. Il dure généralement de 12 à 18 mois, et survient à intervalles de deux à dix ans. Comme ce réchauffement se

produit concurremment avec l'oscillation australe (southern oscillation), qui est une renverse des tendances de la pression sur le Pacifique Sud, les climatologues parlent généralement de l'ENSO (El Niño-Southern Oscillation).

Normalement, le Pacifique équatorial est balayé par de forts alizés de l'est, qui repoussent les eaux superficielles chaudes pour les accumuler sur le côté ouest du Pacifique et font remonter des eaux plus profondes et plus froides sur le côté est. Les années d'El Niño, les alizés faiblissent, et l'eau chaude accumulée dans l'ouest du Pacifique revient graduellement dans l'est, empêchant les eaux plus froides d'atteindre la surface. La température superficielle de l'est du Pacifique commence alors à monter, ce qui change le régime de montée et de descente des masses d'air sur tout le Pacifique équatorial et, à terme, la circulation atmosphérique sur une grande partie du reste de la planète.

En altérant la circulation atmosphérique planétaire, les ENSO modifient considérablement les régimes météorologiques normaux sous les tropiques et même aux latitudes moyennes. À diverses époques, on a lié aux épisodes ENSO des sécheresses en Australie et en Afrique, des inondations au Brésil et au Paraguay, des tempêtes de neige au Moyen-Orient et des moussons moins abondantes en Inde et en Indonésie. Au Canada, l'ENSO a des effets très divers, mais induit généralement des hivers exceptionnellement doux et quelque peu plus secs dans la plupart des régions, exception faite des Maritimes et du Haut-Arctique.

Depuis le milieu des années 70, les épisodes El Niño ont été plus fréquents et plus longs. Ce changement du comportement de l'ENSO peut expliquer, du moins partiellement, un grand nombre des anomalies météorologiques des 20 ou 30 dernières années. Une bonne partie de l'élévation de la température moyenne du globe des 20 dernières années, par exemple, peut être imputée aux événements ENSO, tout comme la baisse des précipitations en Afrique du Nord, dans le sud-est de l'Asie, en Indonésie, dans l'ouest de l'Amérique centrale, et dans d'autres régions tropicales et subtropicales. Le cycle de l'ENSO influe aussi sur la configuration des ouragans, parce que les changements de la circulation en altitude sous les tropiques pendant les années El Niño ont tendance à entraver la formation d'ouragans dans l'Atlantique et à la favoriser dans le sud-est du Pacifique. La baisse de fréquence des ouragans dans l'Atlantique que l'on a notée depuis 1970 et leur apparente augmentation dans le Pacifique peuvent fort bien refléter cette relation. Cependant, l'intensification récente de l'activité d'El Niño elle-même soulève de

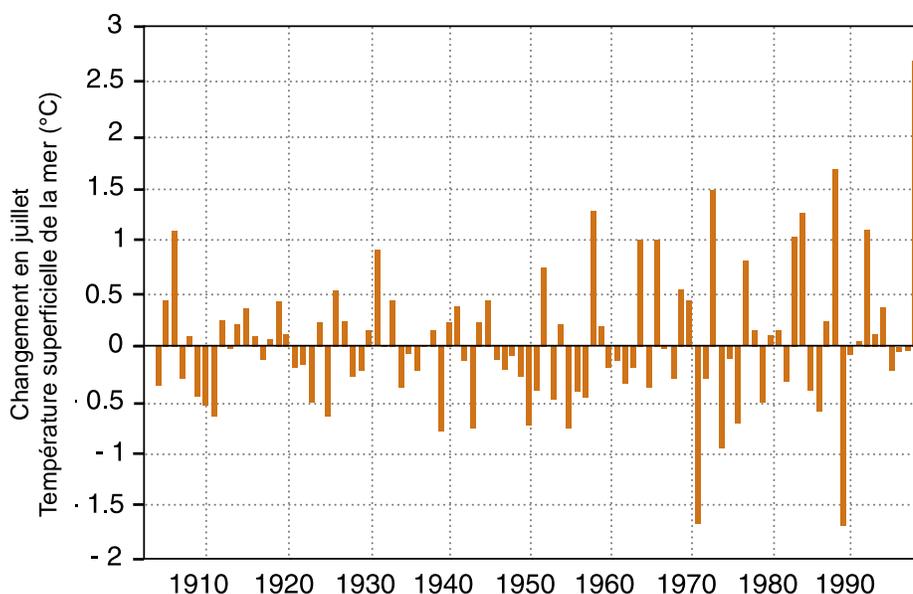
sérieuses questions. On ne trouve rien de comparable dans les enregistrements climatologiques des 120 dernières années et, selon certains chercheurs en climatologie, elle n'a pas de précédent non plus dans le dernier millénaire. Pourquoi El Niño s'intensifie-t-il maintenant? Est-ce un phénomène naturel ou une autre conséquence du réchauffement planétaire?

Certaines fluctuations climatiques à court terme peuvent aussi être liées aux changements mineurs de l'intensité du rayonnement solaire qui accompagnent le cycle des taches solaires. Le nombre de taches à la surface du Soleil augmente et diminue selon un cycle dont la durée varie de 7,5 à 16 ans, avec une moyenne légère-

ment supérieure à 11 ans. Les taches solaires ont tendance à se manifester en paires polarisées et, sur un cycle double, d'environ 22 ans en moyenne, la polarité de la paire s'inverse. Bien que les taches solaires soient en réalité plus froides que la surface avoisinante, elles sont liées à des zones plus chaudes, dites facules. Une augmentation du nombre de taches indique donc une augmentation du rayonnement provenant du Soleil. Le changement de la production d'énergie du Soleil sur un seul cycle est cependant très bas. Les récentes estimations l'évaluent à environ 0,1 %.

De nombreux enregistrements climatologiques montrent des cycles qui, pendant un certain temps du

FRÉQUENCE ET INTENSITÉ DES ÉPISODES EL NIÑO AU XX^E SIÈCLE



Source : James P. Bruce

L'occurrence des El Niño est caractérisée par un réchauffement anormal de l'est du Pacifique équatorial. Comme le montre le graphique de la température superficielle de la mer en juillet, les épisodes de fort réchauffement (au cours desquels cette température est supérieure de 1 °C ou plus à la moyenne 1950-1980) ont non seulement été plus fréquents dans la seconde moitié du siècle, mais aussi ont fait intervenir un réchauffement plus élevé. On voit aussi pendant cette période un renforcement du phénomène opposé, dit La Niña, qui est lié à un refroidissement anormal de la surface de la mer.

LES EL NIÑO ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

À quoi sont dus les épisodes El Niño? Selon une théorie avancée par De-Zheng Sun, chercheur à la National Oceanographic and Atmospheric Administration des États-Unis, c'est à la différence de température entre la surface de l'océan tropical et l'océan profond.

Les conclusions de M. Sun reposent sur des expériences effectuées avec un modèle de système couplé atmosphère-océan, dans lequel la température de l'océan profond est gardée stable, alors que celle de la surface est réchauffée par le rayonnement solaire et par un effet de serre augmentant graduellement. À mesure que la surface devient plus chaude, une différence de température commence à se manifester entre les bords est et ouest de l'océan du modèle. À 29,2 °C, une oscillation de type ENSO des températures de l'océan s'installe et prend de l'ampleur à mesure que la température de surface de l'océan monte. Ces oscillations, qui effectuent un cycle complet en quatre ans, reproduisent de très près le comportement du Pacifique tropical. L'expérience a aussi montré que ces oscillations ne se produiraient pas dans un bassin moins large, comme celui de l'Atlantique.

Si la théorie de M. Sun est correcte, les El Niño deviendraient d'abord plus prononcés dans un climat plus chaud, parce que l'océan se réchaufferait plus rapidement en surface qu'en profondeur. Avec le temps, cependant, leur intensité devrait baisser quelque peu. En effet, la différence de température entre la surface et les profondeurs finirait par diminuer, du fait du réchauffement plus grand qui doit prendre place aux latitudes plus élevées. Cependant, il faudrait plusieurs siècles pour que cette chaleur soit transmise à l'océan profond et influe sur le comportement des El Niño.

moins, suivent le cycle simple ou le cycle double des taches solaires. Les grandes sécheresses du Midwest américain, par exemple, ont tendance à se produire à des intervalles d'une vingtaine d'années. Cependant, lorsque l'on essaie de relier les grands régimes du climat au cycle des taches solaires, on a de la difficulté à expliquer comment de si faibles changements de l'activité solaire peuvent entraîner des fluctuations climatiques relativement importantes. L'un des mécanismes les plus plausibles avancés jusqu'ici lie les maximums des taches solaires à un réchauffement de la basse stratosphère, qui influe ensuite sur les régimes de circulation dans les couches sous-jacentes de l'atmosphère. Bien que le réchauffement ne soit encore que de l'ordre d'une fraction de degré, des études par modélisation du climat faites par Joanna Haigh de l'Université de Londres suggèrent que ces petites variations de la tem-

pérature de la stratosphère peuvent suffire à décaler les trajectoires des tempêtes hivernales d'Europe, qui délaisseraient la Méditerranée pour passer environ 700 km plus au Nord en moyenne.

Certains de ces mécanismes, voire tous, pourraient expliquer une augmentation temporaire des extrêmes météorologiques. Cependant, plus longtemps ces extrêmes persistent, moins ces explications sont acceptables et plus nous devons envisager la possibilité d'une variation à long terme du comportement du climat. Un renforcement de l'effet de serre pourrait être une raison de cette variation, mais le climat peut aussi changer dramatiquement à long terme pour des raisons purement naturelles.

Les grandes glaciations des 2 derniers millions d'années sont les exemples les plus spectaculaires de ce genre de changements, mais des variations plus faibles,

s'étendant sur quelques siècles, sont aussi survenues dans notre climat postglaciaire actuel. Le cas le mieux connu en est l'épisode dit « Petit âge glaciaire », qui a duré grosso modo environ de l'an 1400 à 1850, et pendant lequel le climat de l'Europe et de nombreuses autres régions s'est considérablement refroidi. Vers le milieu du XVII^e siècle, alors que le refroidissement avait son extension maximale, la température moyenne à la surface de la Terre se situait à près de 1 °C en-dessous de sa valeur actuelle. On pense que le Petit âge glaciaire et d'autres fluctuations des températures planétaires survenus au cours des 10 000 dernières années sont dus essentiellement à des changements dans la production d'énergie du Soleil, mais d'autres facteurs peuvent y avoir participé. Par exemple, le milieu du Petit âge glaciaire a coïncidé avec une période d'activité minimale des taches solaires, entre 1645 et 1715, dite « minimum de Maunder ». On estime que l'apport d'énergie solaire était alors inférieur aux valeurs actuelles de 0,1 à 0,7 %.

La production d'énergie solaire augmente depuis environ 1850, et les dernières estimations scientifiques attribuent à cette influence environ la moitié du réchauffement du dernier siècle et le tiers de celui survenu depuis

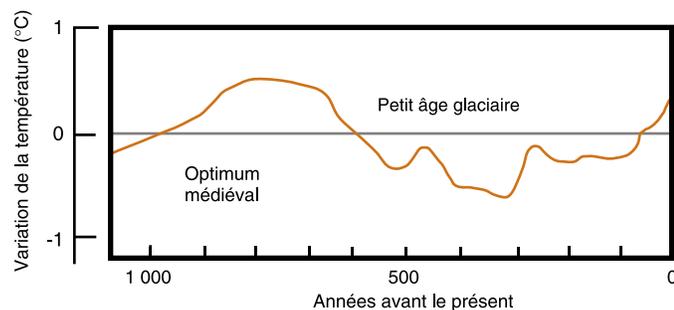
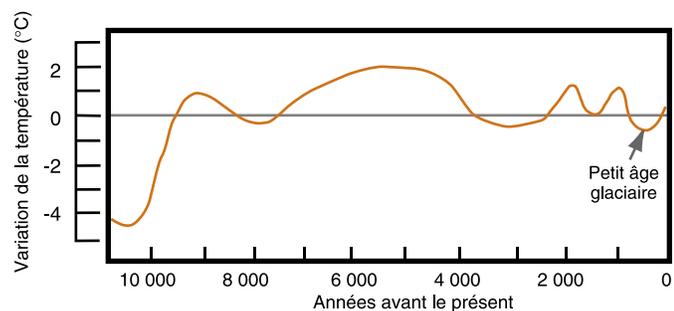
1970. On a cependant de plus en plus d'indications que le renforcement de l'effet de serre est largement responsable du reste du réchauffement de notre climat actuel. Si la prolifération d'épisodes météorologiques extrêmes est imputable à une évolution fondamentale à long terme du climat, c'est probablement le réchauffement par effet de serre qui est le moteur du changement, plutôt que la variation de l'activité solaire.

RÉCHAUFFEMENT PAR EFFET DE SERRE ET EXTRÊMES MÉTÉOROLOGIQUES

Comment un réchauffement par effet de serre peut-il causer une augmentation des conditions météorologiques extrêmes? Une des raisons en est que le réchauffement supplémentaire modifie la distribution de la chaleur, et donc le flux d'énergie dans le système climatique. Il s'ensuit un changement des circulations atmosphériques et océaniques, et du cycle hydrologique (l'échange d'eau entre la surface de la Terre et l'atmosphère). Par conséquent, nombre des principales trajectoires de tempêtes peuvent être considérablement décalées. Pour concevoir les effets d'un tel décalage, il suffit de voir comment un El Niño change les régimes de circulation. Certaines régions seraient exposées à des

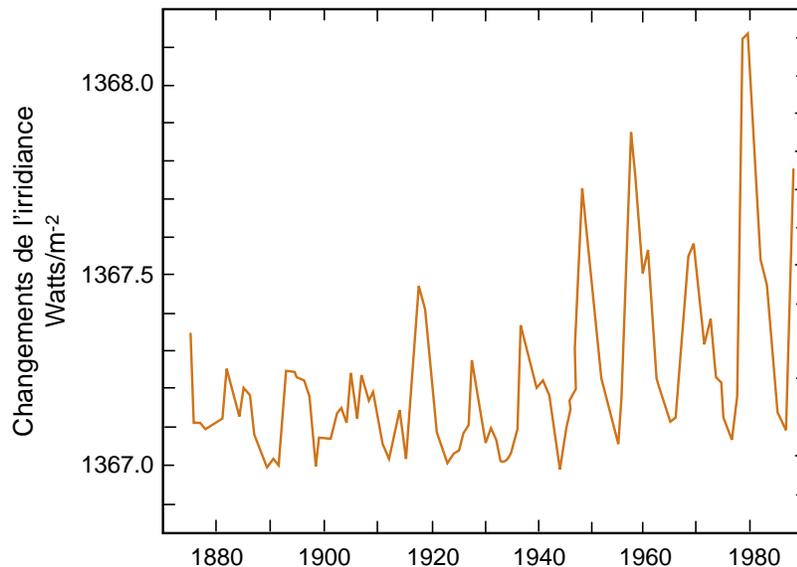
VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE DU GLOBE DEPUIS LA FIN DU DERNIER ÂGE GLACIAIRE

Bien que le climat de la Terre ait été remarquablement stable depuis la fin du dernier âge glaciaire, il y a plus de 10 000 ans, il s'est produit des variations, faibles mais significatives, sur des échelles de temps allant de quelques centaines à quelques milliers d'années. On pense que ces variations sont largement dues aux fluctuations de la production d'énergie du Soleil.



Source : Adaptation de Folland et al. (1990)

IRRADIANCE SOLAIRE ESTIMATIVE, 1874-1988



Source : Adaptation de Foukal and Lean (1990)

La production d'énergie solaire augmente depuis environ 1850. On pense que cet accroissement explique environ la moitié du réchauffement de la surface de la Terre survenu au cours du dernier siècle et un tiers de celui survenu depuis 1970. Ce n'est que depuis 1978 que les satellites fournissent des observations directes de la production d'énergie solaire. Les valeurs estimatives données ici ont été établies à l'aide d'un modèle informatique et de données sur les taches solaires, et les résultats étalonnés par rapport aux observations satellitaires disponibles.

tempêtes plus nombreuses et à des pluies plus abondantes, et d'autres verraient des précipitations jadis prévisibles faire place à des sécheresses prolongées. Le climat d'autres régions pourrait s'améliorer, mais, à en juger par les derniers épisodes El Niño, on serait presque partout confronté à des problèmes météorologiques auxquels la population pourrait être mal préparée. Avec le temps, les collectivités pourraient s'adapter aux nouvelles conditions, mais à des coûts qui risquent d'être énormes.

Il y a une seconde raison, encore plus valide, de soupçonner une relation entre le réchauffement planétaire et les extrêmes météorologiques, qui est liée aux effets possibles d'un climat plus chaud sur les processus physiques régissant les divers types de phénomènes météorologiques. Prenons l'exemple de la pluie. Les précipitations constituent une moitié du cycle de l'eau (cycle hydrologique); l'autre moitié est l'évaporation (et

la transpiration des végétaux). Un des résultats les plus probables d'une hausse des températures planétaires est un accroissement généralisé de la quantité d'eau circulant dans le cycle. En effet, le réchauffement fera augmenter non seulement l'évaporation et la transpiration, mais aussi la capacité de l'air de retenir l'humidité. Il y aura donc dans l'atmosphère plus d'eau susceptible de tomber sous forme de pluie et de neige. En outre, les terres et les eaux étant plus chaudes, il y aura davantage de convection et l'atmosphère sera plus instable, ce qui accroît le risque d'importants épisodes de précipitations dans bien des régions du monde. En raison des changements des circulations à grande échelle, et des différences interrégionales dans les processus hydrologiques, cette augmentation des précipitations ne sera pas uniformément répartie sur la planète. En fait, certaines régions pourront même en recevoir moins. Cependant, les modèles du climat montrent que, dans

une atmosphère plus chaude, davantage d'humidité sera transportée vers les latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord. Ainsi, ces régions pourront recevoir plus de pluie et de neige, et c'est là que l'augmentation des épisodes de précipitations abondantes sera probablement la plus marquée.

Bien sûr, ce raisonnement ne fait intervenir que les relations physiques les plus élémentaires (bien que les plus importantes) entre la température et les pluies. En réalité, il faut aussi prendre en compte nombre d'autres facteurs, comme l'humidité du sol, le relief, la végétation, la saison, les processus physiques de formation des nuages et les circulations atmosphériques. Pour évaluer l'effet net du réchauffement planétaire sur les précipitations - comme sur toute autre variable climatique -, on doit se tourner vers des modèles informatiques complexes du système climatique, ou modèles de circulation générale (MCG). Essentiellement, ces modèles combinent nos connaissances du fonctionnement des grands processus climatiques pour déterminer comment ces processus interagissent sur une période donnée lorsque certaines variables clés, comme les concentrations de gaz à effet de serre, sont changées. Les résultats de ces simulations renferment un certain nombre d'incertitudes et peuvent varier considérablement d'un modèle à l'autre, mais ils offrent certaines indications utiles de l'influence du réchauffement par effet de serre sur les processus climatiques.

Les modèles s'entendent cependant sur un point : dans des climats plus chauds, il y a une augmentation des précipitations mondiales moyennes; en outre, ils indiquent tous que cette augmentation sera maximale en hiver aux latitudes moyennes et élevées. La plupart d'entre eux montrent aussi un accroissement de l'humidité du sol à la fin de l'hiver et au printemps aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. Dans une région comme le Canada, ces facteurs pourraient facilement se transformer en scénario du pire pour les inondations printanières : importantes accumulations de neige, pluies abondantes et sols saturés d'eau. D'ailleurs, le débordement de la rivière Rouge en 1997 est l'illustration parfaite d'une telle combinaison de facteurs.

Ce qui est encore plus intéressant, quand on ne se limite pas aux moyennes, c'est que nombre des modèles indiquent un accroissement substantiel des précipitations abondantes. Par exemple, deux études concluent que les pluies devraient augmenter d'environ 10 à 30 % à la plupart des latitudes lorsque les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone sont doublées. Cependant, le nombre des pires épisodes de précipitations, soit les 10 % les plus extrêmes, monterait de 50 % dans certaines régions. Une telle augmentation ferait

croître considérablement le danger d'inondations soudaines et de problèmes connexes, comme l'érosion et les glissements de terrain.

Le paradoxe est que l'accroissement des précipitations mondiales moyennes pourrait aussi s'accompagner d'une augmentation de la fréquence des sécheresses dans bien des endroits. C'est évident pour les régions où la circulation modifiée entraînerait une baisse de la pluviométrie, mais les sécheresses pourraient aussi être plus fréquentes même dans celles où les pluies seraient plus abondantes. Il y a à cela plusieurs raisons, dont l'une est que l'évaporation augmente rapidement avec la température. Dans un climat plus chaud, cette évaporation accrue des sols (et de la transpiration des plantes) pourrait donc égaler, voire dépasser, toute humidité supplémentaire apportée par les pluies. Une autre est que, avec l'augmentation disproportionnée des pluies extrêmement abondantes, un plus fort pourcentage de la pluviosité sera reçue au cours d'un plus petit nombre d'événements, ce qui entraînerait, comme l'ont indiqué plusieurs études par modélisation, un accroissement du nombre de jours sans précipitations. En outre, les pluies torrentielles ne rechargent pas efficacement l'humidité du sol, parce qu'une grande partie de l'eau est perdue par le ruissellement en surface. Dans les régions où les précipitations baisseront, ces effets pourraient être dévastateurs. Une étude récente menée sur le sud de l'Europe a indiqué par exemple qu'un doublement des concentrations du dioxyde de carbone ferait baisser les précipitations moyennes de 22 %, mais multiplierait par un facteur de 2 à 5 la probabilité d'une séquence de 30 jours sans pluie.

Dans les pays des latitudes moyennes, comme le Canada, les chutes de pluie (et de neige) abondantes sont généralement associées à des tempêtes et à des vents forts. Si les précipitations extrêmes augmentent, il en ira probablement de même pour les importantes tempêtes. La plupart des dommages sont imputables à trois types de systèmes : les tempêtes tropicales et ouragans, les grosses tempêtes extratropicales et les orages. Ces phénomènes sont cependant issus de processus complètement différents, dont certains peuvent être plus sensibles que d'autres au réchauffement du climat. Il convient donc de les examiner séparément.

Les *tempêtes tropicales et ouragans* sont potentiellement sensibles à un réchauffement par effet de serre, en ce sens qu'ils ne se forment que sur des océans dont la température de surface est supérieure à 27 °C. Comme le réchauffement par effet de serre peut amener plus souvent une plus grande superficie d'océan à ce seuil thermique, il s'ensuit que la zone d'activité des ouragans pourrait s'étendre et qu'il pourrait s'en former davan-

INONDATIONS AU CANADA

- *Selon la Croix-Rouge internationale, la majorité des catastrophes survenues entre 1967 et 1991 sur la planète étaient des inondations. En 1996, année « normale » de catastrophes pour la firme de réassurance Munich Re, les inondations ont entraîné près de 35 milliards de pertes économiques, soit environ 57 % des pertes imputables à des catastrophes à l'échelle planétaire. Au Canada, les versements fédéraux couvrant des pertes dues à des inondations ont dépassé ceux liés à toute autre forme de catastrophe météorologique.*
- *Au Canada, les risques varient selon les endroits et les saisons. Au début du printemps, avec la fonte rapide du couvert nival et les embâcles, les cours d'eau peuvent déborder dans à peu près toutes les régions. En été, dans tout le sud du pays, ce sont les orages qui risquent le plus souvent de causer des inondations, dues à des pluies torrentielles courtes mais intenses, et généralement limitées à une petite superficie. C'est surtout au printemps et en automne que l'on a des inondations imputables à des tempêtes de pluie prolongées associées à des systèmes météorologiques intenses. Sur une période de deux ou trois jours, ces tempêtes peuvent déverser d'énormes quantités d'eau sur une vaste superficie. Par exemple, celle qui a causé l'inondation du Saguenay en 1996 a déversé en 48 heures une moyenne d'environ 126 mm de pluie sur un territoire de 100 000 km², soit l'équivalent de l'écoulement du Saint-Laurent pendant près de la moitié d'un mois, à son débit moyen de 10 100 m³ par seconde. Le débordement de la rivière Rouge, par contre, était dû à une combinaison de facteurs : un automne humide, qui a laissé les sols saturés d'humidité, des précipitations de neige supérieures à la normale pendant l'hiver, et un blizzard au début d'avril, qui a déversé 50 à 70 cm de neige et de pluie verglaçante peu après le début du ruissellement.*



Emerson, Manitoba, 25 avril 97

- *Dans l'ensemble, au Canada, le risque d'inondation serait plus grand dans un climat plus chaud. Cet accroissement serait essentiellement le fait d'inondations dues à des tempêtes de pluie, l'augmentation de la pluviométrie provenant d'orages plus nombreux (et possiblement plus violents) et de tempêtes de pluie associées aux systèmes météorologiques de grande échelle, qui seraient moins nombreuses mais plus fortes. Les hivers plus courts pourraient faire baisser le risque d'inondations dues à la fonte des neiges et aux embâcles dans certaines régions, mais les chutes de neige plus abondantes pourraient l'accentuer ailleurs.*
- *Face au risque accru d'inondations, il faudra prendre des mesures d'adaptation plus efficaces pour minimiser les dommages. Ces mesures, peut-être onéreuses au départ, pourront éviter des coûts nettement plus élevés lorsqu'il surviendra de graves inondations. Le Manitoba, par exemple, a investi beaucoup dans la protection contre les inondations, surtout parce que la rivière Rouge est naturellement propice aux inondations au printemps (puisqu'elle coule vers le nord et que son débouché dans le lac Winnipeg est souvent encore gelé lorsque les tronçons amont, situés plus au sud, commencent à dégeler). Le canal de crue de la rivière Rouge, construit au coût de 68 millions de dollars pour diriger les eaux autour de Winnipeg, a été terminé en 1968. Si ce n'avait été de cet ouvrage, l'inondation de 1997 aurait recouvert près de 80 % de la ville et aurait forcé à évacuer plus de 550 000 personnes. En outre, huit villes et environ 700 résidences rurales sont protégées par des digues.*

tage. Il semble d'ailleurs y avoir une bonne corrélation entre les températures de surface de la mer et la fréquence des ouragans; selon une étude, les températures record de la surface de la mer atteintes en 1995 expliquaient à 61 % le très grand nombre d'ouragans de cette année. Cependant, près d'une demi-douzaine d'autres conditions doivent être présentes pour qu'un ouragan se forme, et l'on ne sait pas si elles seraient plus ou fréquentes dans un climat plus chaud. Cependant, des projections de modèles du comportement des tempêtes tropicales, effectuées à l'Institut Max Plank en Allemagne, montrent une diminution importante de l'activité des ouragans, surtout dans l'hémisphère sud, en raison d'un climat plus chaud.

Le réchauffement peut aussi influencer sur l'intensité des ouragans. En effet, la limite théorique de la force du système dépend de l'ampleur du déséquilibre énergétique local entre l'atmosphère et l'océan. Des expériences menées à l'aide de modèles du climat suggèrent que ce déséquilibre sera plus important dans un climat plus chaud, ce qui entraînerait une hausse significative de l'intensité potentielle des ouragans. Par exemple, une équipe dirigée par Thomas Knutson, de la National Oceanic and Atmospheric Administration des États-Unis, a utilisé un modèle régional de prévision des ouragans pour examiner comment le réchauffement clima-

tique influencerait sur le comportement de ces perturbations dans l'ouest du Pacifique. Le modèle a montré qu'un réchauffement de 2,2 °C de la surface de la mer entraînerait une augmentation de 5 à 10 % des vitesses des vents des ouragans.

Les modèles de circulation générale de la génération actuelle peuvent simuler certaines des caractéristiques du comportement des ouragans, mais la quantité d'information qu'ils donnent est limitée parce que les ouragans sont d'une échelle trop petite pour être simulés avec suffisamment de détail. Des modèles régionaux à haute résolution ou des modèles spécialement conçus pour les ouragans peuvent donner d'autres indications, mais il n'y a que peu de résultats utilisables. Les MCG peuvent cependant indiquer s'il risque d'y avoir un changement dans les grandes caractéristiques de la circulation qui régissent les régimes de vents dominants de la planète et imposent des limites à la latitude maximale que peuvent atteindre les ouragans. Selon les modèles actuels, ces caractéristiques, et donc la ceinture où surviennent les ouragans, ne connaîtraient pas beaucoup de changement.

Le comportement qu'adopteraient les ouragans dans un climat plus chaud pourrait aussi dépendre de l'évolution des El Niño. Comme ces derniers ont tendance à entraver la formation d'ouragans dans

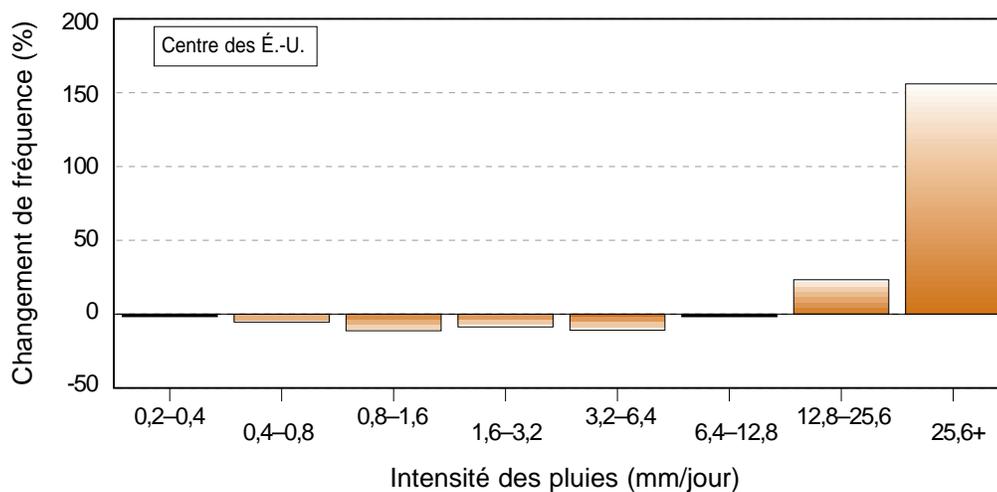
l'Atlantique et à la favoriser dans le Pacifique, des épisodes El Niño plus intenses et plus fréquents entraîneraient un déplacement de la zone d'activité des ouragans, qui seraient plus nombreux dans le Pacifique et moins dans l'Atlantique. Par contre, un affaiblissement de l'activité El Niño pourrait faire pencher la balance dans l'autre sens.

De quelque manière que le réchauffement planétaire influe sur la fréquence ou l'intensité des ouragans, les dangers posés par les inondations qui accompagnent ces derniers seront certainement accentués par l'élévation du niveau marin. Au cours du dernier siècle, le réchauffement planétaire a fait monter le niveau moyen de la mer de 10 à 25 cm, et l'on s'attend à une hausse supplémentaire de 50 cm d'ici la fin du XXI^e siècle. Comme les inondations par les ondes de tempête des ouragans font habituellement plus de dégâts que le vent, le risque de pertes de vies humaines et de dommages aux biens augmenterait probablement, même sans accroissement de la fréquence ou de l'intensité de ces perturbations.

Les tempêtes extratropicales sont de vastes dépressions qui habituellement se forment et se déplacent sur les frontières entre des masses d'air contrastantes, aux latitudes moyennes et élevées. L'énergie de ces tempêtes provient surtout du transfert de chaleur entre les régions subtropicales et les régions polaires, et leur déplacement est régi grosso modo par la position et la trajectoire des courants-jets subtropicaux et polaires.

Le réchauffement planétaire peut influencer de diverses manières sur cet échange de chaleur. Si, comme on le pense, les pôles se réchauffent plus que les tropiques, la différence de température qui gouverne ces tempêtes devrait s'atténuer et le nombre de tempêtes violentes diminuerait probablement. Malgré cela, cependant, certaines différences régionales de température pourraient s'accroître. Par exemple, les continents devraient se réchauffer plus que les océans, et ce contraste accru pourrait faire augmenter l'intensité des tempêtes côtières. Un autre facteur à prendre en compte est la vapeur d'eau. La chaleur libérée par la condensation de la vapeur d'eau est une source d'énergie pour les tem-

CHANGEMENTS DE L'INTENSITÉ DES PLUIES DANS LE CAS D'UN DOUBLEMENT DES CONCENTRATIONS DE DIOXYDE DE CARBONE



Source : Adaptation de Gordon et al. (1992)

Les modèles climatiques indiquent qu'un climat plus chaud apportera davantage de précipitations. Certaines études montrent aussi que les pluies abondantes seront plus fréquentes, et les pluies faibles plus rares. Les résultats d'une étude australienne, montrés ici pour le centre de l'Amérique du Nord, projettent une hausse spectaculaire des catégories de pluie les plus abondantes.

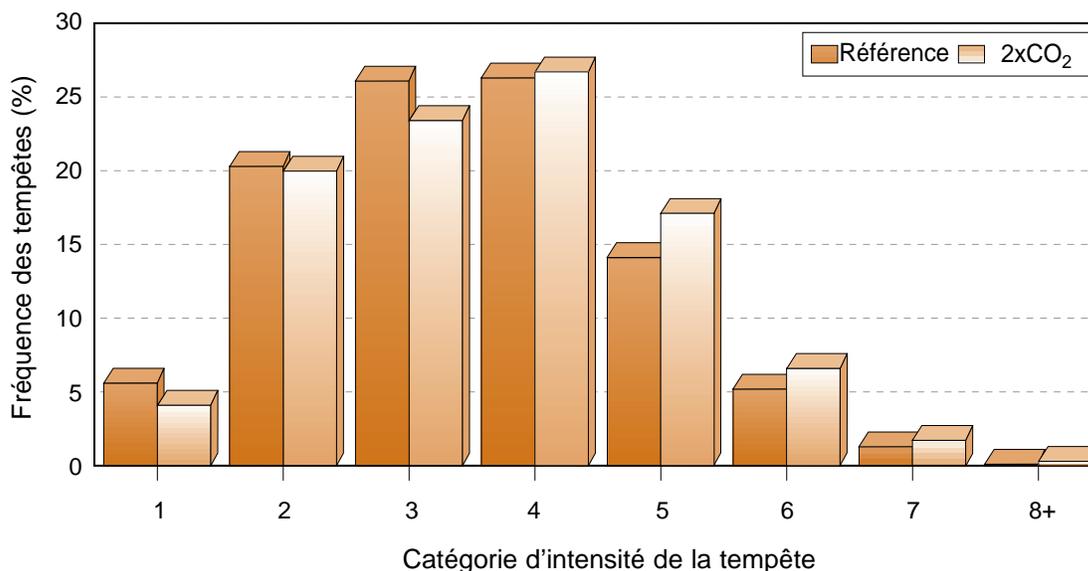
pêtes et, une atmosphère plus chaude retenant plus de vapeur d'eau, pourrait fournir le supplément d'énergie requis pour alimenter des tempêtes plus puissantes.

On ne sait pas encore lequel de ces effets sera prédominant, et les simulations de climats plus chauds faites par les modèles ne permettent pas de se prononcer. Des chercheurs utilisant deux modèles mis au point par le Bureau météorologique du Royaume-Uni ont constaté que les principales trajectoires de tempêtes dans l'hémisphère Nord se décalaient vers le nord et que l'occurrence de tempêtes s'intensifiait, surtout sur l'est de l'Atlantique et l'ouest de l'Europe. Par contre, un modèle canadien donnait plus de tempêtes, sans changement significatif de la position des trajectoires. Cependant, il projetait une augmentation substantielle du nombre de violentes tempêtes hivernales.

Les orages se forment lorsque le réchauffement du sol fait s'élever l'air chaud et humide, qui se condense dans l'air plus froid situé au-dessus. La chaleur libérée par l'humidité qui se condense fait monter davantage l'air chaud, ce qui conduit à la formation rapide de cumulus bourgeonnants ou nuages d'orage. Puisqu'un climat plus chaud et plus humide favorisera ce processus, on peut s'attendre à ce que l'activité orageuse augmente. Des températures de surface et des taux d'humidité plus élevés permettront aussi à l'air des cellules d'orage de monter plus vite et plus haut, donnant naissance à des nuages plus dynamiques, et donc à des orages plus forts.

Une conséquence non négligeable de cette situation sera l'augmentation des occurrences de foudre. Les données d'observation montrent une relation entre l'ac-

CHANGEMENTS DE LA FRÉQUENCE ET DE L'INTENSITÉ DES TEMPÊTES HIVERNALES DANS UN CLIMAT À DOUBLE CO₂



Source: Lambert (1995)

On a utilisé des modèles de circulation générale pour comparer les fréquences des tempêtes dans le climat actuel et dans un climat plus chaud résultant d'un doublement des concentrations de gaz à effet de serre. Ces résultats d'une étude canadienne montrent que le nombre de tempêtes violentes au nord de 30° N augmente dans un climat plus chaud, alors que le nombre de tempêtes moins intenses reste constant ou baisse.

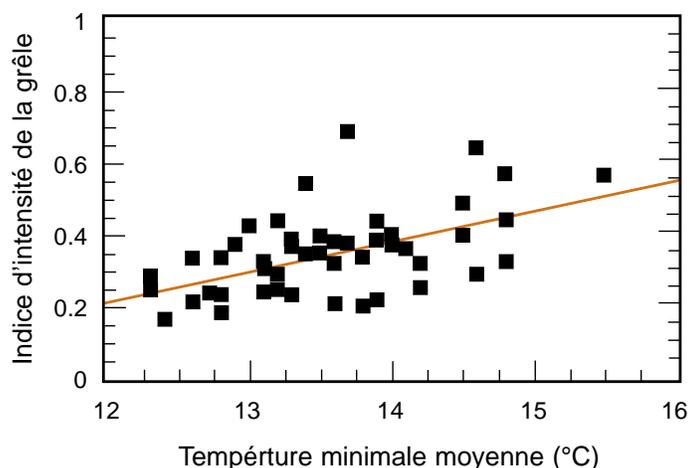
tivité de la foudre dans le monde et les variations de la température mondiale en surface, tout comme le font les sorties de modèles du climat. Une expérience menée au Goddard Institute for Space Studies, par exemple, montre une augmentation de 6 % de la foudre pour chaque degré Celsius d'élévation de la température moyenne de la Terre. La foudre étant une cause fréquente de feux de forêt, le risque d'incendie serait certainement plus grand dans un climat plus chaud, surtout si les vagues de sécheresse estivales deviennent plus généralisées.

Il y aura probablement aussi davantage d'occurrences de grêle. Une analyse statistique des tempêtes de grêle en France montre une étroite corrélation entre les températures nocturnes moyennes en été (qui ont monté en France, comme dans bien d'autres régions du monde) et les chutes de grêle. Il peut sembler difficile de voir le lien entre les températures nocturnes et les tempêtes de grêle, qui surviennent généralement en fin d'après-midi, mais il découle d'une relation bien connue des météorologistes : les températures minimales nocturnes sont régies par la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, et sont donc un bon indicateur de ce que sera, l'après-midi suivant, le point de rosée, c'est-à-dire la température à laquelle l'air est saturé de vapeur d'eau; le point de rosée de l'après-midi est à son tour un prédictor utile de temps instable, puisqu'il indique la quantité de vapeur d'eau disponible pour alimenter un orage en développement. L'élévation des températures minimales estivales est ainsi une indication que l'atmosphère sera plus propice aux orages et donc à la grêle.

La formation de tornades et de puissants orages supercellulaires exige des conditions spéciales, en particulier un apport d'air froid et sec à haut niveau. On ne sait pas si ces conditions seront plus fréquentes dans un

climat plus chaud. Les grands modèles de circulation générale utilisés dans les études du changement climatique ne peuvent pas donner beaucoup d'information sur le comportement des orages, parce que les cellules individuelles sont beaucoup plus petites que les plus petits détails que les modèles peuvent reproduire. Cependant, une analyse des tornades dans les provinces des Prairies a montré que la fréquence de ce phénomène avait tendance à augmenter au printemps et au début de l'été à mesure que montent les températures moyennes mensuelles. Il est donc raisonnable de penser qu'il y aurait davantage de tornades sur les Prairies dans un climat plus chaud. Les techniques liant les phénomènes météorologiques locaux à des régimes climatiques de plus grande échelle pourront donner des informations supplémentaires sur le com-

TEMPÉRATURE MINIMALE ESTIVALE MOYENNE ET INTENSITÉ DE LA GRÊLE EN FRANCE



Source : Adaptation de Dessens. (1995)

Des recherches effectuées en France ont montré que l'activité de la grêle était plus forte lorsque les minimums nocturnes étaient plus élevés. Ce lien laisse penser que les tempêtes de grêle (et les orages violents) seraient plus fréquents dans un climat plus chaud.

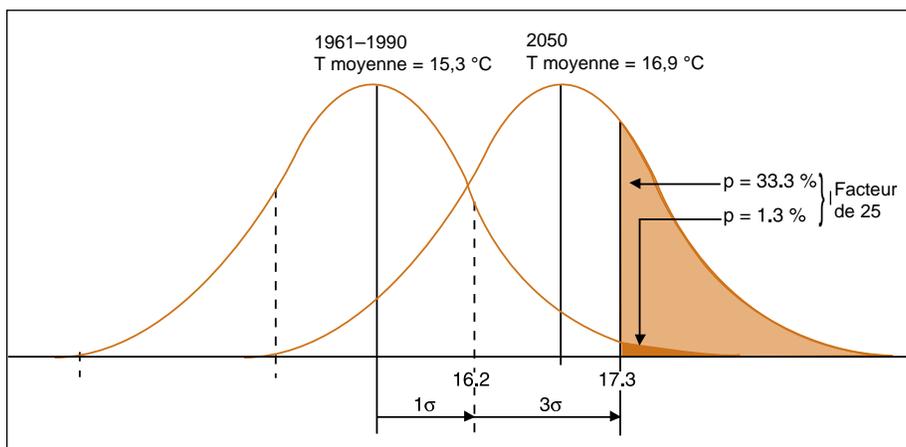
portement des orages et des tornades dans un univers plus chaud.

Et, enfin, qu'en est-il de la température? On peut penser que le nombre de journées extrêmement chaudes va augmenter avec l'élévation des températures moyennes. Cependant, on a de bonnes raisons de croire que l'augmentation serait considérable et sans aucune commune mesure avec l'élévation de la température moyenne. L'une de ces raisons fait intervenir le comportement mathématique des distributions de fréquences. La courbe de gauche sur les graphiques ci-dessous montre une distribution typique des mesures des températures estivales moyennes. Cette figure représente une région du centre de l'Angleterre pour laquelle on a 300 ans d'enregistrements météorologiques, mais les graphiques d'autres endroits montreraient des distributions très similaires. C'est une courbe en cloche classique, où les valeurs proches de la moyenne sont les plus fréquentes et les valeurs extrêmes le sont le moins. Dans un climat plus chaud

où les températures varieraient de la même façon, la courbe garde la même forme, mais se décale vers la droite, avec des conséquences intéressantes. Dans ce cas précis, la température moyenne a monté de 1,6 °C, mais, si l'on compare le nombre d'étés avec des températures moyennes supérieures à 17,3 °C, il y a un changement énorme entre les deux graphiques. Là où l'on avait une valeur très basse sur la courbe de gauche, on a une valeur très élevée sur celle de droite. La différence réelle, mesurée en comparant les aires situées sous la courbe à droite de la ligne 17,3 °C, pour chacun des graphiques, est un facteur de 25. Autrement dit, un été extrêmement chaud que l'on pouvait s'attendre à avoir seulement une fois en 75 ans pourrait revenir tous les 3 ans dans un climat plus chaud. C'est un exemple théorique, mais qui montre bien qu'un changement minime dans les moyennes entraîne de très grands changements des extrêmes.

On a une autre raison de s'attendre à une hausse substantielle des extrêmes de températures élevées,

CHANGEMENTS DE LA FRÉQUENCE DES TEMPÉRATURES EXTRÊMES AVEC LES CHANGEMENTS DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE



Source: Adaptation de Munich Re (1996)

De petits changements de la moyenne peuvent entraîner de grands changements des extrêmes. Dans cet exemple, sur le centre de l'Angleterre, une élévation de 1,6 °C de la température estivale moyenne fait croître (de plus de 3 écarts-types) la probabilité d'un été très chaud, d'une fois en 75 ans (probabilité de 1,3 %) à une fois en 3 ans (probabilité de 33,3 %).

fournie par les expériences menées avec des modèles du climat, qui montrent que le réchauffement planétaire entraînerait une forte augmentation du nombre de journées extrêmement chaudes et de vagues de chaleur. Une étude canadienne suggère qu'à Toronto, une élévation de 4 °C de la température moyenne accroîtrait considérablement le risque de jours d'été où la température dépasserait 30,5 °C, le faisant passer de 1 sur 10 à près de 1 sur 2. Les estimations faites pour d'autres régions du monde donnent des résultats similaires. Par exemple, une étude australienne a conclu qu'une hausse de 0,5 °C de la température moyenne ferait monter de 25 % le nombre de journées extrêmement chaudes (plus de 35 °C) dans l'état de Victoria. Avec un réchauffement de 1,5 °C, le nombre de journées chaudes augmenterait de 50 à 100 %.

Mais, si un climat plus chaud cause une augmentation des extrêmes de températures élevées, il devrait logiquement induire une diminution des extrêmes de basses températures, ce que les simulations des modèles ont tendance à appuyer. Dans l'étude australienne, par exemple, la possibilité d'une période de 5 journées en-dessous de 0 °C baisserait de 20 à 40 %, selon la région. De même, des calculs faits par Francis Zwiers, modélisateur canadien du climat, ont montré que les températures les plus basses auxquelles seraient confrontés les résidents de Winnipeg sur une période de vingt-cinq ans, qui sont actuellement de -45 °C, monteraient à -33 °C, dans le climat auquel on peut s'attendre si les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone doublent.

IMPLICATIONS D'UNE AUGMENTATION DES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

La possibilité d'une relation entre le réchauffement planétaire et les extrêmes météorologiques ne présente pas qu'un intérêt théorique. Une augmentation à long terme des extrêmes, même faible, aurait en effet des coûts économiques et humains considérables, dont on peut se faire une idée en regardant ce que les conditions météorologiques extrêmes ont déjà coûté.

Au Canada, des inondations ont fait jusqu'à 79 morts (ouragan Hazel, en 1954), déplacé plus de 25 000 personnes (débordement de la rivière Rouge, en 1997), et causé des dommages aux biens et autres coûts dépassant 1 milliard de dollars (inondation du Saguenay, en 1996). Une tempête de grêle a fait à elle seule 120 millions de dollars de dégâts à Winnipeg en juillet 1996, et les pertes assurées dues à d'autres tempêtes de grêle ont

monté jusqu'à 400 millions de dollars, comme à Calgary en 1991. La forte tempête de neige qui a frappé Victoria et le Lower Mainland de Colombie-Britannique à la fin de 1996 a causé des pertes estimatives de 200 millions de dollars, privé 1 700 personnes d'hébergement et de nourriture, laissé 150 000 résidences sans électricité et gardé certaines routes bloquées pendant 10 jours. Elle a aussi causé 500 avalanches et 65 déversements de polluants. L'événement météorologique le plus destructeur jusqu'ici a cependant été la tempête de verglas qui a touché l'est du Canada en janvier 1998, faisant 25 morts, laissant près de 3 millions de personnes sans chauffage ni électricité, obligeant à mobiliser 15 000 militaires et causant des dommages estimés à 2 milliards de dollars. En outre, il faut se rappeler que même des événements de relativement petite échelle peuvent avoir une lourde facture. Une pluie torrentielle de 90 minutes, tombée sur Ottawa en août 1996, par exemple, a fait plus de 20 millions de dollars de pertes assurées, et entraîné des coûts supplémentaires de réparation des routes et égouts.

À l'autre extrémité du cycle hydrologique, la sécheresse peut infliger à l'industrie agricole des pertes se chiffrant en milliards de dollars. C'est ainsi qu'en 1988, la production de céréales du Canada a baissé de près du tiers, ce qui s'est accompagné de pertes d'exportations estimées à 4 milliards de dollars. Pendant les étés chauds et secs, les conditions sont propices aux incendies de forêt et, entre une bonne saison et une mauvaise, les coûts de gestion des incendies peuvent montrer un écart de 200 millions ou plus.

À l'étranger, les coûts des extrêmes météorologiques sont souvent encore plus élevés. En 1996, une série d'inondations survenues en Chine a fait plus de 3 000 morts, laissé 5 millions de personnes sans abri, fermé 8 000 usines et tué des dizaines de milliers d'animaux, causant des pertes économiques estimées à 20 milliards de dollars US. La famine en Corée du Nord, qui a atteint des proportions catastrophiques en 1997, était due en partie aux inondations de 1995 et 1996, suivies d'une sécheresse en 1997. En Jamaïque, les pertes infligées par l'ouragan Gilbert en 1988 se sont montées à environ un tiers du PIB du pays, et plus de 40 % des logements de l'île ont été détruits. Les pays aux ressources limitées ont beaucoup de difficulté à se remettre de telles catastrophes. Nombre d'entre eux ont déjà sérieusement entamé leurs forêts et autres ressources prélevables pour assurer leur croissance économique et certains pourraient être tentés d'utiliser encore plus rapidement ces ressources amoindries pour

accélérer le raffermissement de leur économie. L'aide de pays industrialisés comme le Canada joue un rôle essentiel dans cette récupération. Si les catastrophes météorologiques deviennent plus fréquentes, la demande d'aide va grimper en proportion et, s'il est établi sans aucun doute que l'augmentation des extrêmes météorologiques est liée au réchauffement par effet de serre et au changement climatique, le devoir moral des pays industrialisés de fournir cette aide s'en trouvera considérablement accru.

La façon dont les coûts des dommages aux biens causés par des phénomènes météorologiques ont monté dans les 2 ou 3 dernières décennies a déjà un impact sur les ressources de l'industrie mondiale des assurances. Depuis 1987, celle-ci a dû, presque chaque année, éponger au moins une catastrophe de plus d'un milliard de dollars. Certaines grosses compagnies d'assurance et de réassurance ont déjà été menées à la faillite par des réclamations liées à ce genre de catastrophe, et d'autres, comme la Lloyd's of London, ont connu des problèmes de solvabilité partiellement imputables aux pertes dues à des catastrophes météorologiques. Si ces tendances se poursuivent, les assureurs devront augmenter les primes, limiter leur responsabilité, ou même se retirer de marchés actuels devenus trop risqués, comme l'ont fait aux Caraïbes nombre de compagnies assurant contre les dommages dus aux ouragans. De plus en plus, les gouvernements devront peut-être fournir la protection contre les risques que n'offriront plus les assureurs. Ce sont eux, et donc les contribuables, qui seront confrontés aux coûts croissants des services d'urgence, de l'aide aux sinistrés et de l'aide à l'étranger.

D'autres secteurs de la société et de l'économie devront aussi assumer une hausse de coûts pour limiter les dégâts de conditions météorologiques plus dangereuses et plus destructrices. Les structures telles que les immeubles, barrages, ponts et pylônes de transport d'électricité devront être construites de manière à supporter des contraintes plus élevées; les services de transport risqueront d'être plus souvent interrompus et de subir des dommages plus graves aux infrastructures et aux équipements; les agriculteurs pourront devoir améliorer l'irrigation et adapter leurs pratiques culturales en fonction d'une plus grande occurrence des sécheresses. Si ces précautions ne sont pas prises, la survenue d'une catastrophe pourrait entraîner des pertes économiques plus élevées et des perturbations sociales accrues, et faire davantage de morts.

Il ne faudrait pas négliger non plus les impacts des phénomènes extrêmes sur les écosystèmes naturels et agricoles. Des événements comme la tempête de verglas

de 1998 sur l'est du Canada ou la tempête de vent de 1987 dans le sud de l'Angleterre, par exemple, ont détruit des millions d'arbres qui, en bonne santé, fournissaient nourriture et habitat à la faune, et absorbaient le dioxyde de carbone. Les inondations emportent les couches arables peu abondantes et réduisent la productivité des terres agricoles. Les pertes dues à un épisode particulier peuvent ne pas être insurmontables, mais, avec le temps et si le stress est combiné à d'autres, l'effet cumulatif du temps violent sur les écosystèmes pourrait être énorme.

Un problème connexe particulièrement inquiétant est celui de la sécurité alimentaire, étant donné la croissance constante de la population mondiale et le plafonnement de la production de denrées cruciales comme le blé et le riz. Si les sécheresses, inondations et tempêtes causent davantage de dommages aux cultures, les famines pourraient être non seulement plus fréquentes, mais aussi plus difficiles à soulager.

RÉPONSES

Il est clair que les extrêmes météorologiques sont un problème de plus en plus grave pour notre société. Il est probable par ailleurs que le réchauffement planétaire l'exacerbera considérablement. La difficulté vient du fait que nous ne savons pas encore exactement jusqu'à quel point l'actuelle prolifération de phénomènes extrêmes s'inscrit dans la variabilité naturelle du climat, ni jusqu'où ces phénomènes pourraient s'intensifier dans un climat plus chaud. Pour lever ces incertitudes, on devra effectuer beaucoup d'autres études scientifiques du temps violent en tant que caractéristique du climat. Et cet effort devra porter sur trois domaines en particulier.

D'abord, il nous faudra comprendre beaucoup mieux les tendances actuelles et émergentes du temps violent. Et la difficulté ici réside dans le fait que les phénomènes météorologiques extrêmes, par définition, sont rares. Ils sont aussi généralement de superficie limitée et de courte durée. Les statistiques à leur égard sont donc rares, voire inexistantes. Cependant, l'occurrence d'un grand nombre de tels épisodes peut être déduite de l'analyse des systèmes à plus grande échelle dont ils sont issus. La présence des tempêtes et l'intensité des vents peuvent par exemple être estimées à partir des configurations barométriques régionales. Il y a également des problèmes de comparabilité ou de qualité des enregistrements climatologiques historiques. Les appareils évoluent avec le temps, de même que les caractéristiques physiques des stations d'observation et de leurs alentours. Ces facteurs risquent d'introduire de

LA TEMPÊTE DE VERGLAS DE 1998

La pluie verglaçante est un phénomène courant dans la plus grande partie du Canada. Bien qu'il n'en tombe qu'environ 2 heures chaque année à Victoria, des endroits comme Yellowknife, Regina et Toronto en reçoivent 35 heures les années moyennes, et St. John's 148 heures. Les épisodes de pluie verglaçante sont généralement de courte durée, mais, de temps à autre, ils peuvent se transformer en importantes tempêtes de verglas, remarquables à la fois par leur étincelante beauté et par l'écrasante charge de glace qu'elles imposent aux arbres et aux lignes de transport d'électricité. Il y a eu des tempêtes destructrices à Ottawa en 1986 et à St. John's en 1984, mais celle qui a frappé une grande partie de l'est du Canada en janvier 1998 est exceptionnelle, par sa durée, par la superficie touchée et, en fin de compte, par l'ampleur de la destruction qu'elle a semée. Sur une période de six jours, il est tombé en plusieurs fois un total de 100 mm de pluie verglaçante sur un territoire qui, à un moment, s'étendait du centre de l'Ontario à l'île du Prince-Édouard. L'effondrement des lignes de transport a laissé près de trois millions de personnes sans électricité. C'est la région de Montréal qui a été le plus affectée et, dans certaines localités au sud de l'île, la panne a duré jusqu'à cinq semaines. La tempête a fait 25 morts et, avec des dommages de l'ordre de 1 à 2 milliards de dollars en première estimation, c'est de loin la catastrophe météorologique la plus coûteuse de l'histoire du Canada.

La pluie verglaçante survient lorsque de l'air humide et chaud, au-dessus du point de congélation, surmonte de l'air froid au niveau du sol, qui est lui sous le point de congélation. La pluie tombant de l'air plus chaud devient en surfusion lorsqu'elle traverse la couche plus froide, et se congèle instantanément au contact du sol. C'est une situation assez fréquente le long des fronts, à la rencontre de masses d'air chaud et d'air froid, dont les températures respectives sont situées de part et d'autre du point de congélation; cependant, les fronts se déplacent généralement rapidement et les épisodes de pluie verglaçante sont de courte durée. La tempête de verglas de 1998, cependant, était la résultante de conditions très inhabituelles : un courant-jet subtropical, lié à El Niño, qui apportait de l'air chaud et humide du sud, une circulation régulière du nord-est qui maintenait près de la surface une mince couche d'air froid, et enfin une crête anticyclonique stationnaire sur l'Atlantique, qui immobilisait la totalité du système.

Avec un réchauffement du climat, l'adoucissement des hivers pourrait entraîner une augmentation des épisodes de pluie verglaçante dans les endroits où la température moyenne quotidienne commencerait à osciller autour du point de congélation au lieu de rester carrément en-dessous. Cela ne signifie pas nécessairement qu'il y aura davantage d'événements tels que la tempête de verglas de 1998. Celle-ci était en effet due à la conjonction d'au moins trois facteurs particuliers et on n'a à l'heure actuelle aucune raison de penser qu'un réchauffement du climat rendrait cette situation significativement plus probable.



Ottawa, janvier 1998

fausses tendances à long terme dans les analyses climatologiques, mais un examen attentif peut révéler ces problèmes et il est souvent possible de leur apporter des corrections statistiques.

Ensuite, il nous faudra mieux comprendre la variabilité du climat. On peut y arriver en partie grâce à l'enregistrement climatologique instrumental, c'est-à-dire les données d'observations météorologiques faites à l'aide d'appareils convenablement étalonnés dans des conditions contrôlées. Pour certains endroits, l'information peut couvrir un siècle et demi ou plus, mais, pour la plus grande partie de la planète, l'enregistrement est beaucoup plus court. Pour détecter les fluctuations climatiques de long terme, il faut recourir aux données paléoclimatologiques, soit l'information fournie par les cernes de croissance des arbres, les sédiments, les carottes de glace, les fossiles ou autres indicateurs naturels qui peuvent porter la trace des changements climatiques passés. On peut en tirer beaucoup d'infor-

mations sur les variations anciennes de la température et des pluies, bien que peu sur les autres extrêmes météorologiques comme les tempêtes ou orages. Les documents historiques, comme les mémoires, récits, journaux de bord des navires et dossiers d'assurance, offrent aussi des indications directes, quoique qualitatives, des épisodes de temps violent du passé. Les données historiques indirectes, comme les prix des céréales, peuvent aussi mettre en évidence l'occurrence de sécheresses et de périodes humides, ainsi que d'autres facteurs climatiques qui influent sur l'approvisionnement en denrées agricoles.

Enfin, il convient d'explorer plus à fond la relation possible entre le réchauffement planétaire et les divers types d'extrêmes météorologiques. Nous connaissons déjà certains mécanismes par lesquels le réchauffement planétaire peut faire augmenter la fréquence ou l'intensité du temps violent, mais d'autres processus physiques pourraient aussi y jouer un rôle important.



Canal de dérivation de la rivière Rouge

Des mesures d'adaptation, comme le canal de dérivation de la rivière Rouge à Winnipeg (photo d'avril 1997), sont parmi les moyens possibles de combattre les phénomènes météorologiques extrêmes. Bien qu'elles puissent être très onéreuses, le coût des dommages qu'elles évitent compense fortement la dépense. Ces mesures pourraient cependant être dépassées par l'impact innattendu de conditions extrêmes et, alors, les communautés pourraient faire face à des coûts catastrophiques. Des mesures d'adaptation améliorées telles que l'élargissement des voies de détournement des crues, un contrôle plus sévère de l'aménagement des sols, et un renforcement des structures et bâtiments font partie des mesures de parade essentielles à toute augmentation des extrêmes météorologiques.

Pour déterminer l'effet net des interactions entre ces processus, nous devons nous fier aux modèles du climat, mais nos actuels modèles de circulation générale ne peuvent pas reproduire la finesse de détail nécessaire pour étudier le comportement du climat régional et les phénomènes de petite échelle comme les orages et ouragans. C'est pourquoi les modélisateurs du climat sont en train d'élaborer des techniques permettant d'estimer l'occurrence d'extrêmes météorologiques à partir des systèmes à plus grande échelle que peut reproduire le modèle. On recueille également beaucoup d'informations en utilisant des modèles des processus physiques pour étudier la dynamique de phénomènes tels que les ouragans et les orages dans les conditions qui pourraient être induites par le changement climatique. Une autre avenue de recherche fait intervenir l'utilisation de modèles régionaux de haute résolution pour mieux étudier le comportement des climats de régions particulières dans différents scénarios de réchauffement. Ces études sont très importantes, parce que les effets du réchauffement planétaire sur les climats régionaux et en particulier sur les extrêmes météorologiques varieront probablement beaucoup d'une région du monde à l'autre.

Quels que soient les résultats de ces études, il est déjà évident que les sociétés modernes deviennent plus vulnérables aux dommages économiques causés par les extrêmes météorologiques à mesure que leurs infrastructures sont plus complexes et leurs populations plus nombreuses et plus concentrées. En fait, l'un des enseignements de la tempête de verglas de 1998 et des récentes inondations de la rivière Rouge et du Saguenay est que, au Canada, nous avons sous-estimé tant les risques que les conséquences d'au moins certains des grands fléaux météorologiques qui nous menacent maintenant. Il est donc impératif de réviser nos estimations des risques de catastrophes météorologiques et notre capacité d'y faire face. Autrement dit, nous devons revoir nos calculs des probabilités des divers types d'extrêmes météorologiques, pour déterminer si l'événement qui a aujourd'hui une probabilité estimative de se produire une fois en 100 ans ne devrait pas recevoir une probabilité de, disons, une

fois en 50 ans. Ce genre de changement exigera à son tour un sérieux réexamen de nombre des règlements de zonage, codes du bâtiment et normes d'ingénierie, ainsi que des plans et capacités d'intervention face aux urgences. La preuve d'un lien significatif entre le réchauffement planétaire et les occurrences de phénomènes extrêmes rendrait cette révision encore plus essentielle, et imposerait des exigences encore plus strictes en ce qui concerne la définition des niveaux acceptables de protection.

QUELLES CONCLUSIONS TIRER?

Le réchauffement planétaire favorise-t-il la survenue de phénomènes extrêmes? On a de toute évidence des indications d'une augmentation des extrêmes dans certaines régions du monde. Ces augmentations pourraient certes être imputables à la variabilité naturelle du climat, mais aussi elles concordent avec un grand nombre des changements auxquels on s'attend dans le cadre d'un réchauffement par effet de serre. Nous savons qu'il existe des mécanismes physiques plausibles par lesquels le

On a de toute évidence des indications d'une augmentation des extrêmes dans certaines régions du monde. Ces augmentations pourraient certes être imputables à la variabilité naturelle du climat, mais aussi elles concordent avec un grand nombre de changements attendus dans le cadre d'un réchauffement par effet de serre.

réchauffement climatique peut faire croître la fréquence et l'intensité de certains types de phénomènes météorologiques extrêmes. Par exemple, notre connaissance des processus climatiques porte très fortement à penser que les pluies abondantes et les orages seront plus courants dans un climat plus chaud. Les vagues de chaleur et les journées très chaudes seront aussi plus fréquentes. Pour ce qui est des autres types d'extrêmes météorologiques, comme les tempêtes extratropicales et les ouragans, les indications sont contradictoires.

Il ne sera pas facile de trouver une preuve irréfutable qu'il y a ou non un lien entre le réchauffement par effet de serre et les extrêmes météorologiques, au moins d'ici 10 ou 20 ans. D'abord, nous n'avons pas encore assez de connaissances sur la variabilité naturelle du climat pour disposer de points de comparaison fiables. Ensuite, le réchauffement planétaire en est encore à ses débuts. La plupart des études scientifiques du réchauffement planétaire postulent une atmosphère à double CO₂, dans laquelle les concentra-

LA POSSIBILITÉ DE SURPRISES

Les modèles et autres outils scientifiques peuvent indiquer certaines des conséquences les plus probables du changement climatique, mais nous ne pouvons pas être sûrs qu'ils les repèrent toutes. Le climat est la résultante d'une somme étonnamment complexe de processus, et il demeure une possibilité de surprises importantes. Les climats du passé, au lieu d'évoluer graduellement, ont parfois montré une tendance, au moins à l'échelle régionale, à basculer soudainement vers un état radicalement différent. Des surprises de ce genre pourraient avoir des conséquences désastreuses, tant pour les écosystèmes naturels que pour les sociétés humaines.

Le climat pourrait prendre une orientation totalement imprévue, par exemple, si le dégel généralisé des régions subpolaires de la planète libérait les grandes quantités de méthane qui sont présentement piégées dans le pergélisol de ces régions sous la forme d'hydrates congelés. Il s'ensuivrait une intensification rapide de l'effet de serre, qui non seulement accroîtrait les extrêmes de chaleur, mais aussi perturberait considérablement les régimes climatiques de nombreuses régions de la planète.

Une autre possibilité est liée aux processus qui gouvernent la circulation thermohaline dans l'Atlantique, cet écoulement subsuperficiel d'eau chaude dans l'Atlantique Nord qui donne à l'ouest de l'Europe ses hivers modérés. L'eau chaude est attirée vers le nord pour remplacer l'eau salée froide qui plonge vers le fond de l'océan en divers endroits du nord de l'Atlantique Nord. Ce processus de formation d'eau profonde est le moteur principal de la circulation thermohaline de l'Atlantique, mais ne fonctionne que lorsque l'eau est très salée et froide. L'une ou l'autre de ces caractéristiques pourrait facilement être modifiée par un réchauffement du climat. Si la circulation thermohaline de l'Atlantique devait s'affaiblir, voire même s'interrompre, le climat de l'ouest de l'Europe se refroidirait considérablement et celui de l'hémisphère Nord en général deviendrait beaucoup plus variable. Un changement de cet ordre pourrait se produire en quelques décennies.

Des études faites avec des modèles couplés de l'océan et du climat montrent le phénomène suivant : la circulation thermohaline de l'Atlantique s'affaiblit puis revient à sa force initiale à mesure que la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone augmente graduellement jusqu'au double de sa valeur préindustrielle. Lorsque l'on arrive au quadruple de la concentration préindustrielle, cependant, la circulation peut rester faible jusqu'à 500 ans. D'autres études laissent penser que cette circulation pourrait devenir moins stable et plus variable dans un monde plus chaud.

tions atmosphériques de dioxyde de carbone seraient donc doubles des niveaux de l'époque préindustrielle, soit environ 280 parties par million (ppm) ou une autre valeur plus récente. À l'heure actuelle, la concentration est d'environ 360 ppm, quelque 30 % au-dessus des valeurs de référence préindustrielles. Si nous y ajoutons l'effet des autres gaz à effet de serre, nous n'en sommes encore qu'à mi-chemin de l'équivalent d'un doublement du CO₂. En outre, l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre est jusqu'à un certain point compensé par

la dispersion du rayonnement solaire sous l'effet des aérosols sulfatés présents en concentrations élevées au-dessus et en aval des régions industrialisées de la planète. Un autre problème est que la variabilité naturelle du climat va parfois renforcer mais aussi parfois atténuer toute éventuelle influence du réchauffement par effet de serre sur le développement d'extrêmes météorologiques. L'occurrence des conditions météorologiques extrêmes évoluera donc de manière irrégulière et il sera difficile d'y déceler des tendances.

BIBLIOGRAPHIE

LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES DEVIENNENT-ELLES PLUS COURANTES?

Born, K., 1996. Tropospheric warming and changes in weather variability over the northern hemisphere during the period 1967–1991, *Meteorology and Atmospheric Physics*, **59**, 201–215.

Davis, R.E. and R. Dolan, 1993. Nor'easters. *American Scientist*, **81**, 428–439.

Dessens, J., 1995. Severe convection weather in the context of a nighttime global warming. *Geophysical Research Letters*, **22**, 1241–1244.

Environnement Canada, 1995. *L'état du climat au Canada: la surveillance de la variabilité et du changement climatique*. Environnement Canada, Downsview, Ontario.

Etkin, D. Beyond the year 2000: More tornadoes in western Canada? Implications from the historical record. *Natural Hazards*, **12**, 19–27.

Kaas, E., T-S. Li, and T. Schmith, 1996. Statistical hindcast of wind climatology in the North Atlantic and northwestern European region. *Climate Research*, **7**, 97–110.

Karl, T.R., R.W. Knight, and N. Plummer, 1995. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. *Nature*, **377**, 217–220.

Karl, T.R., R.W. Knight, D.R. Easterling, and R.G. Quayle, 1996. Indices of climate change for the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 279–292.

Lambert, Steven J., 1996. Intense extratropical northern hemisphere winter cyclone events: 1899–1991. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 21219–21325.

Landsea, C.W., N. Nicholls, W.M. Gray, and L.A. Avila, 1996. Downward trend in the frequency of intense Atlantic hurricanes during the past five decades. *Geophysical Research Letters*, **23**, 1697–1700.

London, S.J., S.G. Warren, and C.J. Hahn, 1991. Thirty-year trend of observed greenhouse clouds over the tropical oceans. *Advances in Space Research*, **11**(3), 45–49.

McCulloch, J. and D. Etkin, eds., 1993. *Proceedings of a workshop on improving responses to atmospheric extremes: The role of insurance and compensation*. Environment Canada, Downsview, Ontario.

Munich Re, 1997. *Topics: Annual review of natural catastrophes*. Munich Re, Munich.

Nicholls, N., G.V. Gruza, J. Jouzel, T.R. Karl, L.A. Ogallo, and D.E. Parker, 1996. Observed climate variability and change. In *Climate change 1995: The science of climate change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Ostby, F.P., 1993. The changing nature of tornado climatology. In *Preprints, 17th conference on severe local storms, October 4–8, 1993, St. Louis, Missouri*, pp. 1–5.

Pearce, D.W., W.R. Cline, A.N. Achanta, S. Fankhauser, R.K. Pachauri, R.S.J. Tol, and P. Vellinga, 1996. The social costs of climate change: Greenhouse damage and the benefits of control. In *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change*. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J. Bruce, H. Lee, and E. Haites, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Pielke, Roger A., Jr. and Christopher W. Landsea, 1998. Normalized hurricane damages in the United States: 1925–1995. (in press).

Schmidt, H. and H. von Storch, 1993. German Bight storms analysed. *Nature*, **365**, 791.

Suppiah, R. and K.J. Hennessy, 1996. Trends in the intensity and frequency of heavy rainfall in tropical Australia and links with the southern oscillation. *Australian Meteorological Magazine*, **45**, 1–18.

Thompson, C., S. Ready, and X. Zheng, 1992. *Tropical cyclones in the South West Pacific: November 1979 to May 1989*. National Institute of Water and Atmospheric Research report.

Tsonis, A.A., 1996. Widespread increases in low-frequency variability of precipitation over the past century. *Nature*, **382**, 700–702.

Von Storch, H., J. Guddak, K.A. Iden, T. Jünnen, J. Perlwitz, M. Reistad, J. de Ronde, H. Schmidt, and E. Zorita, 1993. *Changing statistics of storms in the North Atlantic?* Report No. 116. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.

VARIABILITÉ NATURELLE

Burroughs, W.J., 1992. *Weather cycles: Real or imaginary?* Cambridge University Press, Cambridge.

Environment Canada, 1995. *L'état du climat au Canada: la surveillance de la variabilité et du changement climatique*. Environnement Canada, Downsview, Ontario.

Folland, C.K., T.R. Karl, and K.Ya. Vinnikov, 1990. Observed climate variations and change. In *Climate change: The IPCC scientific assessment*. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Foukal, P. and J. Lean, 1990. An empirical model of total solar irradiance variation between 1874 and 1988. *Science*, **247**, 556–558.

Haigh, J.D., 1994. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. *Nature*, **370**, 544–546.

Haigh, J.D., 1996. The impact of solar variability on climate. *Science*, **272**, 981–984.

Hansen, J.E., A. Lacis, R. Ruedy, M. Sato, and H. Wilson, 1993. How sensitive is the world's climate? *National Geographic Research and Exploration*, **9**, 142–158.

Lean, J., J. Beer, and R. Bradley, 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters*, **22**, 3195–3198.

Morton, Oliver. The storm in the machine. *New Scientist*, **157** (2119), 22–27.

Shine, K.P., Y. Fouquart, V. Ramaswamy, S. Solomon, and J. Srinivasan, 1995. Radiative forcing. In *Climate change 1994*. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris, and K. Maskell, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

RÉCHAUFFEMENT PAR EFFET DE SERRE ET EXTRÊMES MÉTÉOROLOGIQUES

Bengtsson, L., M. Botzet, and M. Esch, 1996. Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? *Tellus*, **48A**, 57–73.

Broccoli, A.J., S. Manabe, and J.F.B. Mitchell, 1995. Comments on “Global climate change and tropical cyclones:” Part II. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **76**, 2244–2245.

Carnell, R.E., C.A. Senior, and J.F.B. Mitchell, 1996. An assessment of measures of storminess: simulated changes in northern hemisphere winter due to increasing CO₂. *Climate Dynamics*, **12**, 467–476.

Cubasch, U., J. Waszkewitz, G. Hegerl, and J. Perlwitz, 1995. Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Climate Change*, **31**, 273–304.

Dessens, J., 1995. Severe convection weather in the context of a nighttime global warming. *Geophysical Research Letters*, **22**, 1241–1244.

Emanuel, K.A., 1995. Comments on “Global climate change and tropical cyclones:” Part I. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **76**, 2241–2243.

Etkin, D. Beyond the year 2000: More tornadoes in western Canada? Implications from the historical record. *Natural Hazards*, **12**, 19–27.

Fowler, A.M. and K.J. Hennessey, 1995. Potential impacts of global warming on the frequency and magnitude of heavy precipitation. *Natural Hazards*, **11**, 283–303.

Gordon, H.B., P.H. Whetton, A.B. Pittock, A.M. Fowler, and M.R. Haylock, 1992. Simulated changes in daily rainfall intensity due to the enhanced greenhouse effect: implications for extreme rainfall events. *Climate Dynamics*, **8**, 83–102.

Gregory, J.M. and J.F.B. Mitchell, 1995. Simulation of daily variability of surface temperature and precipitation over Europe in the current and 2 x CO₂ climates using the UKMO climate model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **121**, 1451–1476.

Hall, N.M.J., B.J. Hoskins, P.J. Valdes, and C.A. Senior, 1994. Storm tracks in a high resolution GCM with doubled CO₂. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **120**, 1209–1230.

Hennessey, K.J. and A.B. Pittock, 1995. Greenhouse warming and threshold temperature events in Victoria, Australia. *International Journal of Climatology*, **15**, 591–612.

Kattenberg, A., F. Giorgi, H. Grassi, G.A. Meehl, J.F.B. Mitchell, R.J. Stouffer, T. Tokioka, A. J. Weaver, and T.M.L. Wigley, 1996. Climate models – projections of future climate. In *Climate change 1995: The science of climate change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Knutson, T.R., R.E. Tuleya, and Y. Kurihara, 1998. Simulated increase of hurricane intensities in a CO₂-warmed climate. *Science*, **279**, 1018–1020.

Lambert, S.J., 1995. The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths. *Journal of Climate*, **8**, 1447–1452.

Lighthill, J, G. Holland, W. Gray, C. Landsea, G. Craig, J. Evans, Y. Kurihara, and C. Guard, 1994. Global climate change and tropical cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **75**, 2147–2157.

- O'Brien, J.J., T.S. Richards, and A.C. Davis, 1996. The effect of El Niño on U.S. landfalling hurricanes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 773–774.
- Price, C. and D. Rind, 1994. Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies. *Journal of Geophysical Research*, **99**, 10823–10831.
- Saunders, M.A. and A.R. Harris, 1997. Statistical evidence links exceptional 1995 Atlantic hurricane season to record sea warming. *Geophysical Research Letters*, **24**, 1255–1258.
- Sun, De-Zheng, 1997. El Niño: A coupled response to radiative heating? *Geophysical Research Letters*, **24**, 2031–2034.
- Whetton, P.H., A.M. Fowler, M.R. Haylock, and A.B. Pittock, 1993. Implications of climate change due to the enhanced greenhouse effect on floods and droughts in Australia. *Climate Change*, **25**, 289–317.
- Zwiers, F.W., 1998. Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂ doubling. *Journal of Climate* (in press).
- QUELLES CONCLUSIONS TIRER?
- Etkin, D., 1997. Climate change and extreme events: Canada. Draft paper. Environmental Adaptation Research Group, University of Toronto.
- Pearce, D.W., W.R. Cline, A.N. Achanta, S. Fankhauser, R.K. Pachauri, R.S.J. Tol, and P. Vellinga, The social costs of climate change: Greenhouse damage and the benefits of control. In *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change*. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J. Bruce, H. Lee, and E. Haites, eds. Cambridge University Press, Cambridge.
- Street, R., 1997. Weather impacts in Canada. Paper presented at the Workshop on the Social and Economic Impacts of Weather, Boulder, Colorado, 2–4 April.