

PROGRAMME DE FORÊTS MODÈLES DU CANADA

La comptabilité du bilan du
carbone au niveau de l'unité
d'aménagement forestier :
aperçu des enjeux et des méthodes

Juillet 2000





Le Service canadien des forêts :

Mission: «Promouvoir le développement durable des forêts canadiennes et la compétitivité du secteur canadien des forêts pour garantir le mieux-être des Canadiens d'aujourd'hui et de demain».

Le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada est également partenaire principal de chacune des onze forêts modèles, et il fournit l'essentiel du financement et de l'appui administratif au programme des forêts modèles du Canada.

Le Canada a pris les devants dans la recherche de moyens pour veiller à la durabilité et à l'amélioration de nos forêts. Le gouvernement canadien, par l'entremise du Service canadien des forêts, a mis en place le Réseau des forêts modèles en 1992. Il s'agit d'un système reliant 11 sites de recherche canadiens et d'autres sites internationaux voués à « former des partenariats au niveau local, national et international dans le but de susciter de nouvelles idées et de trouver des solutions pratiques en matière d'aménagement forestier durable ». Ce système a rapproché des centaines de partenaires provenant notamment du milieu universitaire, de l'industrie, du gouvernement, des collectivités, des peuples autochtones, du public et d'autres milieux intéressés.

Site web: www.NRCan.gc.ca



Qu'est-ce qu'une forêt modèle?

Une forêt modèle est un endroit où les meilleures pratiques d'aménagement forestier durable sont élaborées, testées, puis partagées avec le reste du pays. Chaque forêt modèle est gérée par un organisme à but non lucratif et, à l'exception d'un personnel administratif restreint, toutes les personnes participant aux travaux de la forêt modèle offrent gracieusement leur temps et leur savoir et, habituellement, fournissent même un appui financier.

Au coeur de chaque forêt modèle, on retrouve un groupe de partenaires qui ont des points de vue différents sur la dynamique sociale, environnementale et économique de leur forêt. Ces différences sont nécessaires pour en arriver à des décisions justes et informées sur la façon d'aménager la forêt. Le vrai «modèle» dans ces forêts est la façon dont les divers partenaires - compagnies forestières, communautés autochtones, producteurs de sirop d'érable, propriétaires de boisés, parcs, écologistes, universités, organismes gouvernementaux, groupes récréatifs, associations communautaires, chasseurs, trappeurs - ont intégré leurs intérêts personnels pour se donner un but commun, celui d'élaborer des approches pour l'aménagement durable de la forêt sans sacrifier les intérêts des autres.

Même si la forêt modèle n'a pas de droits sur les terres utilisées pour ses essais, ceux qui en ont doivent y participer. En prenant part dès le début à l'élaboration des nouvelles approches et solutions pratiques, les responsables de l'aménagement forestier adoptent progressivement les suggestions de la forêt modèle.

Site web du Réseau des forêts modèles: www.foretmodele.net

Print: Numéro de catalogue Fo42-312/2000F
ISBN 0-662-84930-2

PDF: Numéro de catalogue Fo42-312-2000F-IN
ISBN 0-662-84931-0

Exemplaires disponibles gratuitement auprès de :

Programme de forêts modèles du Canada

Ressources naturelles Canada
Service canadien du Canada
580, rue Booth
Ottawa (Ontario) K1A 0E4

Téléphone : (613) 992-5874

Télec. : (613) 992-5390

Site Internet : www.foretmodele.net

This publication is also issued in English under the title:

Carbon Budget Accounting at the Forest Management Unit Level: An Overview of Issues and Methods

La comptabilité du bilan du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier :

aperçu des enjeux et des méthodes

Le présent rapport a été préparé comme document d'information pour le Réseau canadien de forêts modèles par Martin von Mirbach, consultant. Il ne s'agit pas d'une publication officielle du Service canadien des forêts ou du Programme de forêts modèles du Canada. Toute opinion qu'il exprime ne reflète pas nécessairement les points de vue du Service canadien des forêts ou du Réseau canadien de forêts modèles.

Préparé pour :
le Réseau canadien de forêts modèles

Par :
Martin von Mirbach
20 Elford Avenue
Corner Brook (T.-N.) A2H 2N1
Tél. : (709) 634-0371
Courriel : alterego119@hotmail.com

Juin 2000

[Page laissée blanche à dessein]

Résumé

Le présent rapport a été préparé après qu'on eut décelé le besoin de fournir des directives aux aménagistes forestiers qui s'efforcent de rendre compte du bilan du carbone à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier (UAF). Sa préparation a bénéficié du soutien du Comité consultatif stratégique sur les indicateurs locaux du Réseau canadien de forêts modèles.

Un bref tour d'horizon des recherches sur le bilan du carbone dans l'ensemble du Réseau de forêts modèles révèle que seule la Forêt modèle de Foothills a déployé de gros efforts pour rendre compte des flux du carbone dans son territoire. De nombreuses forêts modèles ont jugé que la question devait être abordée à l'échelle provinciale ou nationale plutôt qu'à celle de l'UAF. Le présent rapport adopte un point de vue différent et soutient que le bilan du carbone préliminaire au niveau de l'UAF ne présente pas, dans la plupart des cas, de défis insurmontables, sans compter que si l'on veut que la comptabilité du carbone influence vraiment les décisions d'aménagement, il faut alors la ramener à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier.

Le carbone se trouve dans la biomasse vivante, dans la matière organique morte ou en décomposition, dans la matière organique du sol, dans les sols minéraux et les produits forestiers. Ces « réservoirs » de carbone ne sont pas stables et évoluent de manière différente, du carbone venant s'y ajouter en vertu de divers processus naturels et anthropiques et en s'échappant à des rythmes variables soit pour entrer dans un autre réservoir soit pour être réémis dans l'atmosphère.

Le bilan du carbone peut être ventilé en trois tâches distinctes :

- obtenir une mesure de base de la quantité de carbone qui se trouve dans une forêt donnée à un moment donné;
- mesurer l'évolution de ce réservoir dans le temps;
- évaluer l'incidence probable de diverses activités d'aménagement sur les variations futures du bilan du carbone.

Chacune de ces tâches est analysée tour à tour, fournissant les données dont ont besoin les aménagistes forestiers pour mettre ces mesures en pratique dans leur unité d'aménagement forestier particulière. Ces méthodes peuvent être utilisées de trois façons différentes pour suivre les variations dans le temps qui surviennent dans les stocks de carbone: en comparant les mesures de base successives; en suivant les changements survenus après une mesure de base; ou en mesurant les variations proprement dites, sans référence à une mesure de base. Les avantages et les inconvénients de chaque méthode sont analysés brièvement.

Le présent rapport se concentre sur la façon d'utiliser les inventaires existants pour rendre compte des stocks et des flux de carbone. Le recours à des mesures directes et à la télédétection pourrait jouer un rôle important dans le bilan du carbone, même si ce rapport n'en traite pas, car pour l'instant, leur application fructueuse à l'estimation du bilan du carbone dépend encore de solides estimations de base tirées des évaluations du bilan du carbone reposant sur les inventaires.

La difficulté qu'il y a à consigner les changements qui surviennent dans le réservoir des produits forestiers est analysée indépendamment de celle qu'il y a à consigner les changements dans la forêt.

Le Service canadien des forêts a conçu un certain nombre d'instruments pour aider à modéliser le bilan du carbone, notamment un modèle destiné au secteur forestier canadien et un autre au secteur des produits

forestiers. Ces modèles sont brièvement décrits, ainsi que certaines initiatives visant à les appliquer au niveau de l'unité d'aménagement forestier.

Le rapport se termine par une liste de certaines activités qui pourraient contribuer à stocker du carbone dans les forêts.

Principaux messages et recommandations

À l'intention des aménagistes forestiers :

1. La mesure du carbone et des flux du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier n'est pas une tâche difficile sur le plan technique, et elle peut se faire avec des données facilement accessibles à la plupart des aménagistes forestiers.
2. Même si les mesures préliminaires risquent d'être légèrement imprécises et qu'elles peuvent ne pas porter sur tous les réservoirs de carbone, cela n'affecte nullement leur utilité pour les aménagistes forestiers qui souhaitent intégrer une certaine connaissance des problèmes du changement climatique dans leurs évaluations, leurs plans, leurs activités de surveillance et leurs rapports.
3. Les aménagistes forestiers doivent rendre compte des meilleures données disponibles au lieu d'attendre que des données « parfaites » ne le deviennent. Faire rapport immédiatement constitue la meilleure façon d'obtenir l'engagement de peaufiner et d'améliorer les estimations préliminaires.
4. Plusieurs rapports, que l'on peut se procurer auprès du Centre de foresterie du Nord du Service canadien des forêts, contiennent suffisamment d'informations pour commencer. « Le bilan du carbone du secteur forestier canadien » (Kurz *et al.*, 1992, Rapport d'information NOR-X-326) donne un excellent aperçu du modèle de bilan du carbone du SCF, tandis que « A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra minerals soils » (Siltanen *et al.*, 1997) fournit les données nécessaires sur les profils pédologiques régionaux. Au nombre des autres rapports, il faut citer : « Une analyse rétrospective sur 70 ans des flux du carbone dans le secteur forestier canadien » (Kurz et Apps, 1999) et « Le bilan du carbone du secteur canadien des produits forestiers » (Apps *et al.*, 1999). On trouvera les facteurs de conversion du carbone à la figure 1. Les autres données dont on a besoin pour commencer (volume de bois, courbes d'accroissement en volume, données sur l'exploitation et les perturbations naturelles) sont disponibles localement.
5. Il existe plusieurs mesures de l'aménagement des forêts qui permettent d'accroître la capacité des forêts à stocker du carbone et qui concordent avec l'aménagement forestier durable. Les méthodes à long terme qui ont pour effet d'accroître le stockage global du carbone (mesuré en tonnes/hectare/an et établi en moyenne sur au moins un siècle) présentent plus d'intérêt que les méthodes qui se concentrent essentiellement sur l'accroissement du taux de séquestration à court terme.

À l'intention du Réseau de forêts modèles :

6. Le Réseau de forêts modèles est en fort bonne posture pour jouer un rôle de premier plan dans l'élaboration d'un modèle universel du bilan du carbone qui pourra facilement être utilisé par n'importe quel aménagiste forestier moyennant des données facilement disponibles. Le Service canadien des forêts possède déjà la plupart des éléments nécessaires à la création d'un modèle universel crédible et facile à utiliser, et le soutien et le concours du Réseau de forêts modèles pourrait contribuer à en faire une priorité.

[Page laissée blanche à dessein]

Table des matières

Résumé	i
Principaux messages et recommandations	iii
1. Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 But	2
2. Principaux concepts	2
3. Tâches	4
4. Méthodes	4
5. Forêts modèles et comptabilisation du carbone	5
6. Prise de mesures de base	6
6.1 Carbone dans la biomasse vivante	6
6.2 Carbone du sol	7
7. Estimation des flux du carbone	8
7.1 Comparaison des mesures de base successives	8
7.2 Mesure de base additionnée des variations estimatives des stocks	8
7.3 Mesure du flux seul (production nette du biome)	9
7.4 Conclusion	9
8. Carbone des produits forestiers	10
8.1 Calcul des contributions initiales au réservoir de carbone des produits forestiers	10
8.2 Rythmes de décomposition des produits forestiers	10
9. Modélisation du bilan du carbone	11
9.1 Modèle de bilan du carbone du SCF	12
9.2 Applications locales du Modèle de bilan du carbone du SCF	12
9.3 Modèle de bilan du carbone d'application universelle	13
10. Forêts, aménagement durable des forêts et changement climatique	13
11. Principaux messages et recommandations	14
12. Remerciements	15
13. Bibliographie	16

[Page laissée blanche à dessein]



1. Introduction

1.1 Contexte

Il est aujourd'hui couramment admis que le climat planétaire subit l'influence de l'activité humaine qui entraîne l'émission de certains gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les forêts et leur aménagement ont un rapport avec le dossier du changement climatique sous trois grands rapports :

- a) l'industrie forestière et ses infrastructures connexes émettent d'importantes quantités de gaz à effet de serre par leurs activités en amont (préparation des sites, sylviculture, exploitation, transport jusqu'aux scieries), leurs processus de fabrication et leurs activités en aval (transport jusqu'aux marchés et émissions résultant de la décomposition et du recyclage). Des mesures entraînant une réduction des émissions de gaz à effet de serre contribueront à atténuer les changements climatiques;
- b) les forêts sont d'importants réservoirs de carbone. Les composés du carbone comme le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et certaines molécules organiques sont les principaux gaz à effet de serre. Lorsque le carbone est stocké dans les forêts (dans la biomasse vivante, la biomasse morte ou les sols) ou dans les produits forestiers, il n'est pas dans l'atmosphère. La destruction des forêts à l'échelle planétaire est un facteur qui contribue beaucoup aux changements climatiques. En revanche, on a déterminé que la possibilité d'accroître le stockage du carbone dans les forêts (c.-à-d. en créant des « puits ») est un moyen possible d'atténuer les changements climatiques à court terme;
- c) les forêts sont vulnérables aux changements climatiques et y réagissent de différentes façons qui ne sont pas encore prévisibles de manière fiable. Il se peut qu'un allongement de la saison de croissance se traduise par un plus fort accroissement, lequel peut être partiellement ou entièrement neutralisé par une respiration accrue. Il se peut que le déplacement des zones climatiques permette aux forêts de s'établir dans

les régions actuellement déboisées (même si dans beaucoup de ces régions, les sols sont incapables de porter des forêts). Par contre, il se peut que le déplacement des zones climatiques accroisse la destruction des forêts ou même la désertification de certaines régions de la planète et que les incidences prévues comme la sécheresse et les catastrophes météorologiques augmentent la fréquence et l'ampleur des perturbations comme les incendies, les flambées d'insectes et les dégâts causés par les tempêtes.

Le présent rapport s'intéresse avant tout au deuxième de ces trois points, sans vouloir d'aucune façon restreindre l'importance des deux autres.

L'importance du « bilan du carbone » du secteur forestier canadien est reconnue dans les Critères et indicateurs de l'aménagement durable des forêts qui ont été conçus par le Conseil canadien des ministres des forêts. Le critère n° 4 reconnaît l'importance des contributions des écosystèmes forestiers aux cycles écologiques planétaires, et neuf des indicateurs traitent expressément des données dont on a besoin pour déterminer le bilan du carbone du secteur forestier.

Plusieurs facteurs distincts expliquent pourquoi il est important de mesurer le bilan du carbone du secteur forestier et d'en rendre compte. Le bilan du carbone permet de savoir si et comment les forêts accentuent ou atténuent les changements climatiques. Il permet de mieux comprendre les façons diverses et complexes dont les forêts réagissent au climat et l'influencent. Enfin, et surtout, le bilan permet aux aménagistes forestiers de tenir compte du stockage du carbone lorsqu'ils doivent évaluer différentes options d'aménagement.

Pour que cette dernière possibilité puisse se réaliser toutefois, il faut à tout prix que la comptabilisation du carbone puisse être ramenée de l'échelle nationale et planétaire à l'échelle qui présente le plus d'intérêt pour un aménagiste forestier, soit l'unité d'aménagement forestier. Or, cela n'a pas encore été fait de manière systématique et universelle, d'où la possibilité qui s'offre au Réseau canadien de forêts modèles de faire preuve de leadership à cet égard.



1.2 But

Le but de ce rapport est de donner un aperçu des instruments existants ou en cours de conception qui permettent aux aménagistes forestiers de suivre les variations des stocks de carbone dans les forêts au niveau local. Ce rapport analyse également l'applicabilité du modèle de bilan de carbone du Service canadien des forêts au niveau de l'unité d'aménagement forestier, afin de permettre aux aménagistes forestiers de déterminer l'incidence que les décisions d'aménagement risquent d'avoir sur le stockage du carbone au niveau local.

2. Principaux concepts

Les définitions et les éclaircissements donnés dans cette section ont pour but de présenter quelques concepts clés, surtout dans les domaines où règne souvent un certain état de confusion. Aucune des définitions ne se veut une définition technique rigoureuse.

Carbone, CO₂ et CH₄ : lorsqu'on mesure le carbone dans les arbres ou les sols, on en exprime généralement le volume en unités de carbone. Lorsque le carbone qui se trouve dans la matière organique se décompose et pénètre dans l'atmosphère, il le fait essentiellement sous forme de dioxyde de carbone, ce qui explique que les émissions de gaz à effet de serre soient exprimées en tonnes de CO₂. Une tonne de carbone qu'on laisse se décomposer et retourner dans l'atmosphère produit 3,667 tonnes de CO₂. De même, la création d'un nouveau réservoir d'une tonne de carbone équivaut à une diminution de 3,667 tonnes de CO₂. Les conditions anaérobies (sans oxygène) comme celles que l'on trouve dans les forêts des terres basses ou les tourbières entraînent la production de méthane (CH₄) qui peut grandement contribuer au flux net des gaz à effet de serre. Le méthane est un gaz à effet de serre plus actif que le CO₂ (si l'on considère son incidence sur l'atmosphère, une tonne de CH₄ équivaut à environ 20 tonnes de CO₂).

Réservoirs de carbone forestier : on trouve du

carbone dans la biomasse vivante, la matière organique morte ou en décomposition, la matière organique du sol, les sols minéraux et les produits forestiers. Ces catégories sont souvent regroupées en plusieurs grappes, mais différentes méthodes de comptabilisation donnent des résultats différents. Certaines font la distinction entre le carbone aérien et le carbone souterrain alors que d'autres font la distinction entre la biomasse et le carbone du sol. Il ne semble pas y avoir de consensus parmi les scientifiques sur le moment précis où la matière ligneuse en décomposition passe de l'état de biomasse à celui de sol. Cela n'a sans doute guère d'importance pour un aménagiste forestier, même s'il vaut la peine de signaler que différents modèles de bilan du carbone utilisent différentes règles pour déterminer la façon dont le carbone provenant de la biomasse pénètre dans le réservoir pédologique.

On trouvera ci-après une analyse des différents niveaux de précision des systèmes de comptabilisation du carbone.

Production primaire nette : quantité totale de photosynthèse diminuée de la quantité totale de respiration des végétaux. La photosynthèse qui a pour effet de séquestrer du carbone atteint généralement son paroxysme durant la journée et durant l'été, même si une partie du carbone séquestré est réémis par la respiration des végétaux la nuit et l'hiver.

Production nette d'un écosystème : production primaire nette diminuée des pertes attribuables à la décomposition à mesure que la couche de feuilles mortes, les arbres morts, les racines et les branches tombées pourrissent et que l'arbre lui-même succombe à la pourriture.

Production nette du biome : production nette de l'écosystème diminuée des pertes attribuables aux perturbations, notamment aux perturbations naturelles comme les incendies, les insectes, la maladie et le chablis, de même qu'aux perturbations anthropique comme l'exploitation forestière et le déboisement.

Comptabilisation du secteur forestier : la



comptabilisation vraiment complète du carbone dans le secteur forestier représente sans doute un idéal abstrait. La comptabilisation complète du secteur majorera la production nette du biome, notamment le carbone qui vient s'ajouter au réservoir de carbone des produits forestiers de même que toute unité résultant de l'utilisation d'énergie verte en remplacement des combustibles fossiles. Il convient de soustraire de ce total le rythme de décomposition des produits forestiers de même que les apports énergétiques qui se font tout au long du cycle d'aménagement d'une forêt (voir point (a) à la rubrique 1.1 ci-dessus).

En général, un bilan du carbone suffisant pour un territoire forestier donné comporte à tout le moins la production nette du biome. On s'efforce d'y inclure les éléments d'un système de comptabilisation du secteur forestier, mais dans ce cas, il faut adopter un mode de comptabilisation équilibré au sujet des sources de carbone ainsi que des puits.

On présume souvent que l'objectif primordial de la comptabilisation du carbone est d'appuyer les objectifs des conventions internationales sur les changements climatiques et les rapports qui vont de pair. Cela n'est pas forcément le cas, mais pour éviter toute confusion, il importe de faire la différence entre les prescriptions radicalement différentes des deux principaux instruments juridiques qui ont un rapport avec les changements climatiques.

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques : les négociations sur la Convention-cadre ont abouti au Sommet de la Terre en 1992 et celle-ci a depuis lors été ratifiée par un nombre suffisant de pays (dont le Canada) pour entrer en vigueur. Les pays signataires ont pris l'engagement d'assurer la conservation et l'amélioration des puits et des réservoirs et d'établir et de publier des inventaires nationaux des émissions de gaz à effet de serre, notamment des activités anthropiques qui ont trait aux puits. La production de rapports est obligatoire et doit se conformer à certaines lignes directrices assez flexibles (GIEC, 1997) en ce qui concerne les changements d'affectation des terres et la

foresterie. Il faut signaler que la Convention-cadre ne comporte aucune cible contraignante de réduction des émissions.

Protocole de Kyoto : il s'agit d'un accord auxiliaire de la Convention-cadre qui a été approuvé en 1997 et signé mais pas encore ratifié par le Canada, et qui n'est donc pas encore en vigueur. Il établit des cibles auxquelles certains pays conviennent de se conformer au sujet de leurs émissions de gaz à effet de serre. Les pays doivent inclure dans leurs inventaires les variations des stocks de carbone entre 2008 et 2012 attribuables aux activités de boisement, de reboisement ou de déboisement survenues depuis 1990 (autrement dit, une infime proportion de la superficie de la forêt toute entière). Une disposition de cet accord prévoit que d'autres activités d'aménagement du territoire peuvent être incluses dans les inventaires nationaux. Les règles relatives à ces autres activités, de même que les définitions précises des termes boisement, reboisement et déboisement, ne seront pas connues avant novembre 2000 au plus tôt. Tant que ces négociations ne seront pas terminées, on ne peut pas être certain des activités forestières qui sont visées par le Protocole de Kyoto¹. Il importe de signaler que les méthodes de comptabilisation analysées dans ce rapport n'ont pas pour but de traiter des mesures qu'il faut prendre en vertu du Protocole de Kyoto.

Que signifie tout cela pour les aménagistes forestiers? Ni l'une ni l'autre de ces conventions internationales n'a un rapport précis avec ce qui est décrit dans ce rapport. La Convention-cadre stipule seulement qu'il faut établir des rapports à l'échelle nationale, tandis que le Protocole de Kyoto est encore tellement loin de sa forme finale qu'il est impossible de dire ce que doivent comporter les

¹ Par exemple, on estime que l'incidence nette des activités de reboisement et de déboisement au Canada selon des scénarios de « maintien du statu quo » variera d'une source de Co₂ équivalant à 21 Mt/an à un puits de Co₂ équivalant à 10 Mt/an (Table du secteur forestier, 1998). Cet écart colossal repose entièrement sur différentes opinions sur ce qui a des chances d'être inclus dans le Protocole de Kyoto.



règles de comptabilisation. On peut néanmoins affirmer sans risque de se tromper que le mode de comptabilisation du carbone analysé dans ce rapport doit se faire au niveau local. Si le Canada veut promouvoir la conservation et l'amélioration des puits et des réservoirs forestiers, les activités sur le terrain à l'appui de cet objectif doivent être pour la plupart menées par les aménagistes locaux. Ceux-ci ont donc besoin de solides données qui leur indiqueront l'incidence de leurs activités d'aménagement. Un bilan du carbone précis est un instrument indispensable à cet égard.

Une dernière mise en garde s'impose, à savoir la différence qu'il faut faire entre un puits et un réservoir.

Puits et réservoirs : un puits est une activité qui soustrait (ou « séquestre ») du carbone à l'atmosphère et il est le contraire d'une « source ». Un réservoir en revanche, est la réserve effective de carbone proprement dit, stocké sous une forme qui le soustrait à l'atmosphère pendant une courte ou une longue période. La distinction entre ces deux termes revêt une importance cruciale. Une jeune forêt en pleine croissance, par exemple, est un bon puits de carbone car elle séquestre du carbone à une cadence élevée. Une vieille forêt en revanche constitue généralement un meilleur réservoir de carbone, car elle stocke un plus grand volume de carbone et qu'elle rend ce service même si sa croissance s'est stabilisée. Il en résulte qu'une vieille forêt peut être un bon réservoir forestier et un puits médiocre (ou même une source légère). Pour déterminer si une forêt est un puits ou non, on peut mesurer la quantité de carbone qui entre dans la forêt par rapport à celle qui en sort (GIEC, 2000). Pour déterminer si une forêt est un réservoir, on peut calculer le nombre de tonnes de carbone par hectare par an, établi en moyenne sur une échelle temporelle au moins aussi longue qu'une révolution complète. Les méthodes de comptabilisation du carbone décrites dans ce rapport peuvent servir aux deux calculs. Il faut signaler en passant que le Protocole de Kyoto reconnaît le rôle des puits forestiers alors que la Convention-cadre attache plus d'importance aux forêts en tant que réservoirs de carbone. Comme instruments

politiques donc, les deux conventions risquent d'agir à contre-courant. Si l'aménagement des forêts doit tenir suffisamment compte des échelles à long terme (> 100 ans) adaptées aux cycles des écosystèmes forestiers tout en contribuant à atténuer les changements climatiques, le rôle des forêts comme réservoirs de carbone à long terme revêt donc beaucoup plus d'importance que leur rôle de puits qui est d'une durée relativement plus courte.

3. Tâches

Essentiellement, trois tâches entrent en jeu dans la budgétisation du carbone.

1. Obtenir une mesure de base du volume de carbone dans une région donnée à un moment donné.
2. Mesurer les variations de cette quantité dans le temps.
3. Évaluer l'incidence probable de diverses activités d'aménagement sur la capacité de la forêt à tenir lieu de réservoir de carbone et intégrer ce savoir dans le processus décisionnel.

Chacune de ces tâches est analysée respectivement dans les sections 6, 7 et 8 de ce rapport.

4. Méthodes

On mène actuellement un volume colossal d'activités scientifiques diversifiées au sujet des forêts et de la comptabilisation du carbone, et diverses méthodes sont utilisées pour les mesures, la modélisation et la comptabilisation. De plus, ces méthodes s'appliquent à des échelles radicalement différentes, ce qui est un facteur important lorsqu'on tient compte de la comptabilisation du bilan du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier.

Mesure directe : il s'agit du niveau maximum de



précision qui comporte des recherches sur la photosynthèse des végétaux, les rythmes de décomposition, les profils pédologiques, etc. Les données provenant de ces études à petite échelle sont toutefois difficiles à appliquer aux estimations du carbone dans toute l'unité d'aménagement forestier, ce qui explique que cette méthode ne soit pas abordée dans ce rapport. La mesure directe vise plus à quantifier les puits de carbone et l'influence qu'exercent sur eux les conditions environnementales qu'à estimer les réservoirs de carbone.

Établissement d'inventaires : cela désigne l'utilisation des inventaires forestiers et d'autres données sur les puits (production nette de l'écosystème, carbone stocké dans les produits forestiers) calculés d'un côté du grand livre et les sources (perturbations, exploitation, décomposition des produits forestiers, autres émissions) calculées de l'autre. C'est la méthode la plus couramment utilisée dans l'établissement des bilans du carbone forestier à des échelles qui dépassent le niveau du peuplement. Bien sûr, la précision de cette méthode dépend de l'exhaustivité et de l'exactitude des données. Par ailleurs, même s'il existe des profils pédologiques pour la majeure partie du Canada qui font état des estimations de la teneur en carbone, d'autres méthodes sont nécessaires pour évaluer les incidences possibles des perturbations et de l'aménagement forestier sur les réservoirs de carbone du sol.

Téledétection : on utilise de plus en plus la téledétection pour obtenir des estimations globales des flux du carbone dans les forêts. La téledétection autorise une plus grande uniformité lorsqu'on essaie de regrouper les données provenant de plusieurs inventaires, en plus de combler les lacunes des inventaires. Toutefois, la téledétection n'offre pas encore un niveau de précision acceptable ou sécuritaire. En général, la téledétection sert essentiellement à évaluer globalement l'incidence que les changements climatiques risquent d'avoir sur les forêts dans le monde entier en suivant les principales perturbations, les variations de la saison de croissance et la production primaire nette. Au nombre des applications futures possibles,

mentionnons l'utilisation des données de téledétection pour construire des modèles à l'échelle, à partir de la mesure directe des flux du carbone prise dans un nombre relativement restreint de stations.

Ce rapport repose sur l'idée que la méthode privilégiée de comptabilisation du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier réside sans doute dans l'établissement d'inventaires avec prise de mesures directes pour peaufiner l'exactitude des hypothèses et le recours à la téledétection pour aider à combler les lacunes. Les aménagistes qui ne tiennent pas un inventaire forestier précis obtiendront difficilement de bonnes mesures de base, ce qui ne les empêchera pas forcément d'enregistrer les flux de carbone.

Il existe d'autres méthodes de mesure que celles qui sont décrites dans ce rapport. Il faut mentionner en particulier les mesures directes du flux moyennant l'utilisation de tours de flux, de chambres et d'aéronefs qui servent à la vérification des modèles. Le chapitre 2 du rapport spécial du GIEC sur l'affectation des terres, les variations d'affectation des terres et la foresterie contient un résumé concis des diverses méthodes et de leurs limites.

5. Forêts modèles et comptabilisation du carbone

Un tour d'horizon rapide du Réseau de forêts modèles révèle qu'on y mène relativement peu d'activités sur la budgétisation du carbone. Les quelques éléments qui suivent proviennent des recherches menées en vue d'établir un document de référence qui résume les réalisations des forêts modèles dans l'utilisation des indicateurs locaux, et d'autres sources.

La **Forêt modèle de Foothills** est sans conteste celle qui a mené le plus de recherches à ce sujet puisqu'elle a effectivement établi un modèle de bilan du carbone la concernant. Les résultats sont analysés brièvement à la section 8 ci-après.



Le modèle utilisé a été conçu et appliqué par le Service canadien des forêts. Ce projet de recherche a servi à démontrer qu'il est possible de mener de telles analyses à l'échelle opérationnelle. Toutefois, le modèle n'est pas encore suffisamment convivial pour pouvoir être utilisé sans aide par les aménagistes forestiers.

La **Forêt modèle de Fundy** a six indicateurs dans la section de la matrice générale du Réseau de forêts modèles intitulée « Contributions au bilan du carbone global ». Toutefois, cette Forêt modèle estime que ces indicateurs ne sont pas fonctionnels au niveau local et qu'il vaut mieux en laisser le soin aux organismes provinciaux et fédéraux. La Forêt modèle de Fundy a proposé une collaboration avec la Forêt modèle de Foothills afin de vérifier et de peaufiner les hypothèses nationales sur le carbone du sol, mais elle n'a pas reçu un appui suffisant pour donner suite à cette proposition. Le problème semble dû au fait que le projet se situait à l'échelle « micro » alors que l'équipe de modélisation du bilan du carbone du SCF s'intéresse davantage à l'échelle « macro ».

La **Forêt modèle de l'ouest de Terre-Neuve** a deux indicateurs dans la section de la matrice générale des indicateurs du Réseau de forêts modèles intitulée « Contributions au bilan du carbone global ». Elle n'a cependant pas recueilli de données sur ces indicateurs. Elle est partie prenante à une proposition visant à étudier la possibilité de recueillir des données d'inventaire au moyen d'une méthode d'échantillonnage en grille de manière à respecter les prescriptions provinciales en matière de rapports tout en recueillant des informations utilisables à l'échelle de l'UAF. Elle a également manifesté de l'intérêt pour les résultats d'une étude nationale menée par le SCF dont le but est d'évaluer le potentiel offert par la télédétection pour mesurer la biomasse. Ces deux études nécessiteront un volume considérable de tests et d'évaluations avant de donner des résultats susceptibles d'être appliqués à l'échelle locale.

La **Forêt modèle du lac Abitibi** a inscrit trois indicateurs dans la section de la matrice générale des indicateurs du Réseau de forêts

modèles intitulée « Contributions au bilan du carbone global », mais n'a pas encore procédé à la collecte de données.

La **Forêt modèle de l'est de l'Ontario** est la première (et la seule) forêt modèle à rendre compte de son état actuel selon un vaste éventail d'indicateurs, même si son *Rapport sur l'état de la forêt* ne comporte aucune mesure du volume de carbone dans la forêt.

Aucune autre forêt modèle n'a inscrit d'indicateurs dans la catégorie « Contributions au bilan du carbone global ».

6. Prise de mesures de base

6.1 Carbone dans la biomasse vivante

Cette mesure est facile à prendre sous réserve que le volume de bois sur pied dans la forêt à un moment donné soit connu en vertu d'un inventaire forestier actualisé. Il faut alors convertir le volume de bois en un volume total de biomasse avant de le convertir en une masse de carbone ou CO₂. Les coefficients de conversion indiqués à la figure 1 reposent sur ceux qui figurent dans le *Manuel de référence des lignes directrices sur l'inventaire des gaz à effet de serre* du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat et qui ont été modifiés par Environnement Canada selon les données canadiennes. Malgré ces modifications, les coefficients de conversion ne sont en général que des approximations ou des moyennes. Il se peut qu'il existe des tableaux de conversion plus précis, axés sur certaines essences, classes d'âge et types de sol, lesquels devraient influencer la proportion de biomasse souterraine par rapport à la biomasse aérienne. Il n'en reste pas moins que ces chiffres peuvent servir de point de départ et qu'ils sont jugés acceptables selon les prescriptions relatives aux rapports nationaux et internationaux.



Figure 1 : Coefficients de conversion

1. Pour modifier le volume marchand afin d'y inclure le volume non marchand comme l'écorce, les les houppiers et les branchages :
multiplier le volume marchand par 1,454.
2. Pour estimer le volume souterrain :
multiplier le volume marchand par 0,396.
3. Pour obtenir le volume total de bois :
additionner 1 et 2.
4. Pour convertir le volume de bois (m³) en tonnes de biomasse de matière sèche :
multiplier le volume de bois par 0,43.
5. Pour convertir la biomasse de matière sèche en carbone :
multiplier la biomasse de matière sèche par 0,5.
6. Pour convertir le carbone en équivalent-CO₂ :
multiplier le carbone par 3,6667.

6.2 Carbone du sol

On trouve des données sur le carbone du sol des stations de tout le Canada dans une étude intitulée *Base de données sur le profil pédologique et le carbone organique dans les sols minéraux de la forêt et de la toundra canadiennes* (Siltanen *et al.*, 1997). Ces données reposent sur les profils établis au sujet de 1 462 stations réparties à travers le Canada. Les résultats sont généralisés au tableau 1 ci-après, qui a été extrait de ce rapport. L'emplacement des stations figure sur une carte d'accompagnement et le rapport est fourni avec une disquette qui contient des renseignements détaillés sur chacune de ces stations.

Il importe de signaler que ces profils pédologiques ne prédisent pas forcément avec exactitude le volume de carbone présent dans une station. Ils représentent toutefois les meilleures données dont

on dispose sur le Canada en général et passent pour être suffisamment précis pour permettre de budgétiser le carbone, le modéliser et rédiger des rapports, même s'il est indéniable qu'on pourrait facilement les améliorer en utilisant de meilleures données locales ou en prenant d'autres mesures directes dans une unité d'aménagement forestier particulière.

De nombreuses opérations forestières au Canada se déroulent dans des forêts imparfaitement drainées (basses terres) où prédominent les sols tourbeux (ou les sols organiques profonds). Dans ces conditions, les variations qui touchent la production de méthane (CH₄) et de CO₂ contribuent au bilan net des gaz à effet de serre. Pour l'heure, le Service canadien des forêts n'inclut pas systématiquement ce méthane ou la dynamique des tourbières dans le bilan du carbone, même s'il mène un programme dont le but est d'inclure les processus des tourbières (dans les forêts des basses terres) dans le modèle de bilan du carbone.

Tableau 1 : Teneur moyenne en carbone organique (kg m⁻²) par province écoclimatique

Province	Horizons ^a	Horizons organiques ^b
Arctique	8,4 ± 1,0 (76) ^c	3,4 ± 0,6 (25)
Subarctique	7,6 ± 0,5 (154)	3,9 ± 0,2 (150)
Boréale Ouest	5,4 ± 0,2 (374)	2,7 ± 0,1 (370)
Boréale Est	7,3 ± 0,3 (286)	3,8 ± 0,2 (286)
Tempérée froide	10,5 ± 0,8 (86)	2,0 ± 0,3 (86)
Tempérée modérée	7,0 ± 0,8 (3)	1,6 ± 0,4 (3)
Herbages	9,3 ± 1,6 (7)	3,0 ± 0,7 (7)
Subarctique de la cordillère	13,9 ± 1,9 (16)	2,2 ± 0,3 (16)
Cordillère	8,5 ± 0,3 (326)	2,7 ± 0,1 (321)
Intérieur de la cordillère	7,5 ± 0,7 (67)	1,8 ± 0,2 (67)
Cordillère du Pacifique	23,2 ± 1,9 (67)	4,6 ± 0,4 (67)

^a Tous les horizons sous la surface minérale.

^b Tous les horizons au-dessus de la surface minérale. Les profils de l'ensemble des données ne comportent pas tous des données sur les horizons organiques au-dessus de la surface minérale. Ce résumé ne porte que sur les profils qui mesurent ou estiment l'horizon organique. Cela peut se traduire par une taille de l'échantillon qui diffère de celle du résumé relatif à l'horizon minéral.

^c Erreur type moyenne ± de la moyenne (taille de l'échantillon).

(Source : Siltanen *et al.*, 1997)



7. Estimation des flux du carbone

Il existe trois façons de mesurer les flux du carbone dans une forêt donnée en fonction des variations des réservoirs de l'écosystème forestier :

- a) comparer les inventaires successifs;
- b) n'utiliser qu'un inventaire comme mesure de référence et mesurer les variations par rapport à cette mesure en additionnant les ajouts et les enlèvements;
- c) mesurer les ajouts et les enlèvements seuls sans mesure de référence.

Les trois méthodes sont brièvement analysées ci-après. Comme nous l'avons vu plus haut, on utilise des méthodes de mesure directe des flux (en employant des tours, des chambres et des aéronefs) pour vérifier les modèles et leurs estimations, mais ces méthodes ne sont pas abordées dans ce rapport.

7.1 Comparaison des mesures de base successives

La section 6 ci-dessus explique la façon d'utiliser les inventaires forestiers pour estimer la quantité de carbone que renferme une station. Cette estimation peut facilement porter sur deux inventaires successifs ou plus afin d'en dégager les tendances dans le temps.

Avantages : manifestement, il s'agit de la méthode la plus facile; si le territoire forestier dispose d'un inventaire forestier régulièrement actualisé, il s'agit tout bonnement d'appliquer les coefficients de conversion à deux ou plusieurs inventaires. L'autre avantage réside dans le fait que les registres historiques peuvent servir à construire les tendances en remontant dans le temps.

Inconvénients : si l'on utilise différentes méthodes dans des inventaires successifs, cela

risque d'introduire une erreur dans le calcul. Cette erreur risque d'être importante si les variations nettes de carbone dans les inventaires sont minimales par rapport à la quantité de carbone dans les inventaires. La méthode ne précise pas les principaux facteurs qui influencent les stocks de carbone dans un secteur donné, étant donné que toutes les pertes confondues résultant de l'exploitation, des perturbations naturelles et du déboisement sont regroupées ensemble. Par ailleurs, cette méthode ne fournit pas d'estimations des variations des stocks de carbone du sol. Ces estimations devront être établies séparément ou à l'aide de modèles.

7.2 Mesure de base additionnée des variations estimatives des stocks

En vertu de cette méthode, un seul inventaire sert de mesure de référence par rapport à laquelle on enregistre tous les écarts.

Ajouts : les ajouts de stocks de carbone aérien équivalent à la productivité nette de l'écosystème aérien; ces données figurent généralement dans les courbes d'accroissement en volume et sont résumées en estimations de l'accroissement moyen annuel. Il faut utiliser les coefficients de conversion de la figure 1 pour calculer les volumes de carbone. Il est fréquent que les courbes d'accroissement en volume ne remontent pas suffisamment loin dans le temps pour couvrir les premières années de développement d'un peuplement. Pour combler ces données manquantes, on peut tracer une courbe exponentielle allant de zéro à la première donnée simple. Même une ligne droite pourrait faire l'affaire; toute imprécision sera infime par rapport au volume de carbone global dans la forêt.

Pertes: les registres d'aménagement forestier contiennent généralement les données suivantes, qui sont toutes nécessaires :

- le volume de bois décimé par le feu, les insectes, les maladies et d'autres perturbations naturelles (en dehors du dépérissement normal du peuplement, lequel est saisi dans les courbes d'accroissement en



volume);

- le volume de bois récolté;
- le volume estimé des pertes attribuables au déboisement (construction de chemins, changement d'affectation des terres, barrages hydroélectriques et autres ouvrages d'aménagement, etc.). Il se peut que ces chiffres soient déjà saisis dans le volume exploité, auquel cas il n'est pas nécessaire de les comptabiliser ici même si la superficie déboisée aura pour effet de réduire la productivité future de l'assise territoriale.

Tous les chiffres ci-dessus sont généralement disponibles comme mesure du volume de bois. Les coefficients de conversion de la figure 1 doivent être utilisés pour estimer le poids du carbone ou du CO₂.

Ces calculs permettent une évaluation relativement précise des flux dans le réservoir de la biomasse sur pied. La mesure des variations des réservoirs de carbone du sol est un peu plus compliquée. Se reporter à la section 8 pour un bref aperçu du Modèle de bilan du carbone élaboré par le Service canadien des forêts. Voir également à la section 9 une analyse de la façon de suivre les flux du carbone par le biais des réservoirs de produits forestiers.

Avantages : cette méthode relativement précise, est essentiellement utilisée dans la plupart des modèles du bilan du carbone. Les données existent généralement.

Inconvénients : le Modèle de bilan du carbone du SCF n'est pas encore à la disposition générale des aménagistes forestiers et, même si les hypothèses qu'utilise le modèle sur la façon dont le carbone entre dans le réservoir du sol et s'en échappe sont disponibles, les calculs seraient extrêmement laborieux avec l'actuelle version axée sur la recherche.

7.3 Mesure du flux seul (production nette du biome)

Il est également possible de comptabiliser le carbone

sans mesure de référence, tout bonnement en consignait les effets nets des ajouts et des enlèvements et en en rendant compte comme la variation de stockage du carbone.

Avantages : cette méthode présente particulièrement d'attrait lorsque l'inventaire forestier de base affiche d'importantes lacunes. En effet, elle ne prétend pas offrir une mesure absolue du carbone (qui serait sans doute éminemment imprécise) mais elle mesure les variations des stocks de carbone sur des intervalles bien précis.

Inconvénients : les variations des stocks de carbone ne peuvent être indiquées qu'en termes absolus (en tonnes de carbone perdu ou gagné) et non pas en pourcentage du réservoir de carbone total. Cela peut être ou non, un inconvénient de taille.

7.4 Conclusion

La section précédente décrit, dans les termes les plus simples possible, le « coeur » de tout système de budgétisation du carbone.

En général, la plupart des aménagistes forestiers qui disposent d'un inventaire précis utiliseront principalement la méthode de mesure de base et de calcul du flux car c'est celle qui concorde le mieux avec les pratiques en vigueur ailleurs. Toutefois, la mesure du flux seul peut être une option attrayante dans les forêts qui ne disposent pas d'un inventaire forestier suffisant vu que cela répond aux prescriptions de base de la comptabilisation du carbone. La simple comparaison des mesures de base peut servir de calcul préliminaire ou, si l'on dispose d'informations suffisantes dans l'inventaire, elle peut servir à établir les tendances historiques brutes.

En conclusion, il n'y a rien de particulièrement complexe sur le plan technique ou de prohibitif dans la comptabilisation du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier (UAF).

Manifestement, un système de comptabilisation ne peut pas être plus précis que les données qu'il



contient. Même une UAF disposant de données actualisées risque d'afficher un certain nombre de lacunes, d'erreurs et d'incertitudes. Est-il cependant préférable d'attendre l'apparition de données parfaites ou vaut-il mieux se mettre de la partie et obtenir à relativement peu de frais et d'efforts les meilleures estimations que l'on peut extraire des données actuellement disponibles, et utiliser ces données préliminaires pour orienter les efforts afin d'améliorer et de peaufiner les estimations?

8. Carbone des produits forestiers

Les activités d'aménagement forestier peuvent avoir de profondes répercussions sur le volume de carbone stocké dans les produits forestiers, lequel dépend du volume de produits fabriqués, des types de produits fabriqués, de l'utilisation desdits produits et des méthodes employées pour s'en débarrasser ou pour les recycler. Le suivi des variations nettes du réservoir des produits forestiers oblige à tenir compte des facteurs décrits dans cette section qui sont intégrés dans les modèles de bilan du carbone du SCF (MBC-SCF2 et MBC-SPF) décrits à la section 9 ci-après.

8.1 Calcul des contributions initiales au réservoir de carbone des produits forestiers

Cela peut se faire de deux façons : selon le volume récolté ou selon la productivité des scieries.

La **méthode du volume récolté** peut être utilisée si l'on connaît l'utilisation prévue du bois récolté. En premier lieu, il faut appliquer le taux d'utilisation approprié au volume de bois récolté (le Modèle de bilan du carbone du SCF utilise 80 % à 85 % du volume de bois de tige marchand). On peut ensuite formuler un certain nombre d'hypothèses sur ce qu'il advient de ce bois. Le MBC-SPF décrit une série d'hypothèses au sujet de différents produits forestiers. Voici l'une des plus complexes en guise d'illustration :

« Des billes de sciage de résineux et des grumes de placage sont transformées en bois d'oeuvre ayant un rendement présumé de 45 %. Sur le bois d'oeuvre produit, 70 % est utilisé dans la construction et 30 % comme " autre bois ", y compris comme palettes, boiseries et bois d'emballage. Les produits dérivés des procédés de conversion appartiennent à trois catégories, selon la répartition suivante:

1. 10 % sert à la production de panneaux (que l'on ajoute au réservoir " autre bois ");
2. 45 % sert à la fabrication de copeaux à pâte;
3. le solde de 45 % est traité comme résidu, deux tiers étant brûlés comme déchets et un tiers comme source d'énergie. »

On pourrait formuler des hypothèses plus précises en fonction des utilisations locales, mais cela permet de se faire une idée du niveau de précision du Modèle du SCF.

La **méthode de la productivité des scieries** consiste tout bonnement à consigner le volume de production des diverses scieries d'une UAF donnée. Cette méthode évite d'avoir à formuler les diverses hypothèses décrites plus haut, mais elle comporte des complexités qui lui sont propres. En premier lieu, il faut des coefficients pour convertir le poids de différents produits forestiers en poids de carbone. Par ailleurs, il faut répondre à un certain nombre de questions parfois complexes sur le flux de bois brut qui entre et sort d'une UAF donnée. Quel volume de bois récolté dans une forêt donnée est transformé dans cette unité et quel volume en est exporté? Quel volume du bois traité dans une ou dans plusieurs scieries dont on suit la production provient de l'unité d'aménagement forestier et quel volume provient d'ailleurs? Dans certaines unités, cette question peut être relativement simple alors que dans d'autres, il est beaucoup plus difficile d'y répondre.

8.2 Rythmes de décomposition des produits forestiers

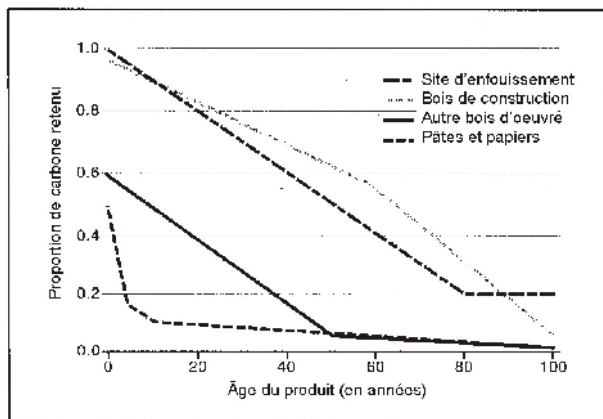
Les produits forestiers se décomposent selon



diverses cadences, le carbone retournant alors dans l'atmosphère. La figure 2 est extraite du rapport décrivant les hypothèses utilisées dans le Modèle de bilan de carbone du SCF (Kurz *et al.*, 1992). Elle atteste que différents produits forestiers ont une longévité différente et un taux d'utilisation préliminaire différent.

Le modèle présuppose que les billes à pâte sont transformées en papier moyennant un rendement moyen approximatif inférieur à 50 %, et qu'environ 50 % de ce qui est fabriqué est perdu dès la première année. Le modèle émet toute une diversité d'hypothèses différentes sur ce qu'il advient du carbone qui quitte le réservoir d'un produit donné (une partie se décompose, une partie est utilisée comme bioénergie, une partie est recyclée et une partie aboutit dans les sites d'enfouissement où 20 % de ce qui est enfoui conserve son carbone indéfiniment). Le bois de construction en revanche a un taux d'utilisation beaucoup plus élevé de même qu'une plus grande longévité et il faut 60 ans pour que les déperditions de carbone atteignent 50 %.

Figure 2 : Courbes de rétention du carbone correspondant à trois catégories de produits forestiers (bois de construction, autre bois d'oeuvre et produits de pâte) et aux produits forestiers dont on se débarrasse dans des sites d'enfouissement



(Source: Kurz *et al.*, 1992)

Le MBC-SPF tient compte de l'énergie et des autres émissions découlant de l'aménagement actif des forêts, notamment de la préparation du site, de la

plantation, de la fertilisation, de l'éclaircie commerciale, de l'abattage, du transport jusqu'aux scieries, de la transformation et du transport jusqu'aux marchés. Pour ce faire, il faut d'autres données sur les scieries et le secteur qui quantifie ces activités (et ces données, même si elles sont généralement exclusives, sont d'accès facile). Ces émissions peuvent avoir une incidence profonde sur le bilan net du carbone (total) de l'usine locale de même qu'à l'échelle nationale (Apps *et al.*, 1999).

9. Modélisation du bilan du carbone

Les modèles de bilan du carbone sont utiles et importants pour au moins trois raisons différentes :

- 1) ils permettent aux aménagistes d'établir des estimations éclairées sur les changements qui surviennent dans les réservoirs de carbone et qu'il est impossible de mesurer directement, en particulier les réservoirs de carbone du sol;
- 2) ils permettent aux aménagistes de comparer différents scénarios d'aménagement pour mieux comprendre l'impact des décisions d'aménagement sur le stockage du carbone dans les forêts;
- 3) ils permettent aux aménagistes de prédire ces valeurs dans l'avenir.

Ces modèles jouent un autre rôle qui retient de plus en plus l'attention des chercheurs qui se spécialisent dans le changement climatique, à savoir la prévision des incidences possibles ou probables du changement climatique sur les forêts, la santé des forêts et le stockage du carbone forestier. En effet, ces modèles peuvent comporter des scénarios qui tiennent compte des changements de grande envergure sur lesquels l'aménagiste forestier n'exerce aucun contrôle mais qui lui fournissent certains indices sur les stratégies d'adaptation possibles.

Comme toujours, un modèle ne peut pas être supérieur à ses éléments et aux hypothèses qu'il



contient. Même si les éléments et les hypothèses sont éminemment précis, on court toujours le risque de voir surgir des événements ou des changements imprévus en vertu desquels la réalité différera du modèle. Même si la capacité prévisionnelle d'un modèle peut être faible (surtout sur les horizons temporels d'au moins 100 ans qu'on utilise), celui-ci peut être très utile pour évaluer les options d'aménagement actuelles.

Quantité de modèles de bilan du carbone sont utilisés dans le monde entier. Chacun a des caractéristiques qui lui sont propres, chacun exige différents éléments et différentes hypothèses pour prévoir la dynamique future du carbone et chacun assure différents niveaux de couverture en termes de ce qui est inclus et de ce qui ne l'est pas.

On trouvera dans cette section une brève présentation du modèle de bilan de carbone mis au point par le Service canadien des forêts. Cela ne veut pas dire qu'il s'agisse du seul ou du meilleur modèle existant, mais s'il est analysé ici, c'est qu'il a toutes les chances d'être accessible aux aménagistes forestiers de tout le Canada. Le modèle a été mis à l'épreuve et utilisé dans un certain nombre de situations différentes au Canada, et il continue d'être peaufiné en fonction des conditions propres au Canada.

9.1 Modèle de bilan du carbone du SCF

Le cadre de modélisation du bilan du carbone est décrit en détail dans plusieurs rapports que l'on peut se procurer auprès du Service canadien des forêts (p. ex., Kurz *et al.*, 1992; Kurz et Apps, 1999; Apps *et al.*, 1999). En bref, « le modèle estime les stocks et les flux de carbone dans/entre la biomasse forestière, les sols et les produits en utilisant les données extraites des inventaires forestiers, de la stratification des écosystèmes, des relevés pédologiques et d'autres statistiques gouvernementales et industrielles. Le modèle simule l'accroissement annuel d'une forêt et la décomposition du sol de types forestiers

représentatifs en se basant sur des relations empiriques. Il permet de calculer les effets de perturbations (principalement les feux de forêt, les infestations d'insectes et la récolte) sur la structure d'âge des forêts et sur les rejets de carbone dans l'atmosphère et la couverture morte sur un cycle quinquennal » (Price *et al.*, 1997).

Dans sa version la plus récente, le cadre de modélisation du SCF comporte deux éléments: le Modèle de bilan du carbone - Secteur canadien des forêts 2 (MBC-SCF2 qui rend compte des variations des stocks de carbone dans l'écosystème forestier, c.-à-d. PEN et NBP) et le Modèle de bilan du carbone - Secteur des produits forestiers (MBC-SPF qui rend compte des variations dans le carbone stocké dans les produits forestiers ainsi que de la consommation et de la production d'énergie (bioénergie) dans le secteur forestier). Le cadre du MBC a été conçu à l'origine et utilisé pour estimer les bilans du carbone du secteur forestier du Canada en général. Le modèle incite à croire que les forêts du Canada ont été un puits de carbone important entre 1920 et le début des années 1970, après quoi elles sont devenues une source nette, perdant environ 69 Mt C par an entre 1985 et 1989 (Table du secteur forestier, 1998). Ce changement est attribuable principalement à la fréquence accrue des feux de forêt et des infestations d'insectes qui ont débuté dans les années 1970 (Kurz et Apps, 1999).

9.2 Applications locales du Modèle de bilan du carbone du SCF

Le cadre du MBC (MBC-SCF2 et MBC-SPF) a été modifié pour pouvoir être appliqué au territoire de la **Forêt modèle de Foothills** afin d'y utiliser des données locales plutôt que nationales. Le modèle ainsi modifié a été utilisé pour simuler et comparer le stockage du carbone sur plus de 250 ans, soit de 1958 à 2238, en fonction d'un certain nombre de scénarios différents, en comparant différents scénarios d'aménagement (notamment un scénario de « forêt non aménagée, avec aucune exploitation ») et en vérifiant la sensibilité des différentes



hypothèses utilisées pour faire tourner le modèle. L'étude démontre que l'aménagement d'une forêt pour la production de bois peut se traduire par un stockage de carbone supérieur à ce qui se passe dans un écosystème forestier naturel sous réserve que le régime d'aménagement obéisse à une révolution plus longue que le cycle des perturbations naturelles. Le « scénario de base » du modèle repose sur un cycle de perturbations naturelles de 50 ans dans la région de Foothills, même si des recherches plus récentes (et les résultats du modèle proprement dit) incitent à croire qu'il s'agit sans doute d'une sous-estimation importante (Price *et al.*, 1997).

Le modèle générique a également été utilisé dans un certain nombre de **forêts hypothétiques** couvrant chacune 100 000 hectares et comportant des paysages représentatifs du littoral et de l'intérieur de la C.-B. ainsi que de la forêt boréale en Ontario (Kurz *et al.*, 1998). Dans chaque cas, on a procédé à une comparaison entre une « forêt non aménagée » soumise à un cycle de perturbations naturelles d'une durée se situant entre 80 et 400 ans et une forêt aménagée dont l'âge d'exploitabilité varie de 100 à 400 ans. Au risque d'une sursimplification des choses, le modèle a permis de constater que lorsque l'âge d'exploitabilité est le même que le cycle de perturbations naturelles, on note une baisse modérée du stockage du carbone, essentiellement parce que la récolte se fait de préférence dans des vieux peuplements alors que le feu s'attaque à tous les peuplements qui dépassent une densité seuil minimum. Lorsque l'âge d'exploitabilité est nettement plus court que le cycle de perturbations naturelles (comme dans les forêts du littoral de C.-B.), le régime d'aménagement peut réduire de jusqu'à 42 % le stockage du carbone.

9.3 Modèle de bilan du carbone d'application universelle

Les travaux mentionnés ci-dessus prouvent que le Modèle de bilan du carbone du SCF est applicable au niveau de l'UAF. Le modèle proprement dit n'est

toutefois pas considéré comme « convivial » et il ne peut pas être utilisé dans une forêt particulière sans la participation active de ses concepteurs. Cependant, moyennant des modifications relativement modestes on pourrait en tirer une version « clés en main » qui pourrait facilement être utilisée par d'autres (Apps, communication personnelle).

10. Forêts, aménagement durable des forêts et changement climatique

En définitive, la modélisation du bilan du carbone n'aura véritablement de sens pour les aménagistes forestiers que s'ils disposent de mesures pratiques pour s'attaquer au dossier du changement climatique. Même s'il existe effectivement quantité de mesures, il importe d'émettre quelques mises en garde sur le rôle limité que les forêts peuvent jouer pour atténuer le changement climatique.

Saturation : Le rôle général que les forêts peuvent jouer pour atténuer le changement climatique est limité par le territoire disponible et le maximum pratique de carbone qui peut être stocké dans ce territoire (Schlamadinger et Marland, 2000). Cela veut dire que les activités d'aménagement forestier offrent au mieux une stratégie de transition vers un authentique avenir à faible teneur en carbone; mais en attachant trop d'importance aux puits forestiers, on risque de retarder les résultats de mesures à long terme plus efficaces.

Instabilité : Le stockage du carbone dans les forêts est sans doute réversible à cause d'activités naturelles et anthropiques futures, qu'il faut distinguer des activités qui contribuent à réduire la consommation de combustibles fossiles



(GIEC, RSATCF, 2000). C'est pour cette raison qu'il ne faut pas croire qu'une tonne de carbone séquestrée équivaille à une tonne d'émissions en moins.

Il y a des chances pour que le Protocole de Kyoto (même si ses conditions n'ont pas encore été définies) permette d'obtenir des crédits au titre des activités qui présentent un avantage au cours de la première période d'engagement (2008-2012) mais qui n'offriront pas forcément cet avantage à long terme. Mentionnons à titre d'exemple l'établissement de plantations à croissance rapide, capables de séquestrer d'importants volumes de carbone à court terme (quelques décennies), même si c'est précisément la croissance rapide de ces plantations qui les rend particulièrement vulnérables aux problèmes de saturation et d'instabilité.

Il existe néanmoins toute une variété d'activités d'aménagement forestier qui offrent d'authentiques possibilités d'améliorer la capacité des forêts et des produits forestiers à stocker le carbone à plus long terme (>100 ans). Citons entre autres :

- l'aménagement en fonction d'un âge d'exploitabilité plus long, ce qui a pour effet d'accroître le pourcentage global de forêts à volume élevé sur le territoire;
- la coupe de jardinage ou l'éclaircie précommerciale qui a pour effet d'enlever certains produits forestiers tout en laissant un volume important sur place;
- la protection des forêts contre le feu, la maladie et les insectes;
- l'établissement d'aires protégées;
- la diminution du déboisement pour des fins de conversion des terres et de construction de chemins;
- les activités sylvicoles qui ont pour effet d'accroître et de protéger le carbone du sol;

- l'implantation de nouvelles forêts, principalement de plantations brise-vent et d'autres terres converties en couverture forestière permanente;
- la promotion des forêts urbaines;
- la modification de la gamme des produits forestiers en faveur de produits plus longévifs.

Parmi les autres mesures, mentionnons la diminution directe de la consommation de combustibles fossiles, en favorisant l'utilisation des arbres comme source d'énergie verte et en améliorant le rendement énergétique dans toute la chaîne des produits forestiers, depuis l'établissement d'un peuplement jusqu'à l'exploitation, le transport, la fabrication, la mise en marché, la consommation, le recyclage et l'élimination des produits. Bon nombre des activités d'aménagement forestier mentionnées ci-dessus engendrent des recettes d'exploitation, même si elles ne maximisent pas forcément les recettes directes par hectare. La plupart d'entre elles ont des retombées secondaires sur le plan social, économique non ligneux et sur celui de la biodiversité. Toutes font partie de l'« amalgame » de mesures que les aménagistes forestiers peuvent envisager pour passer à l'aménagement durable des forêts, et toutes offrent la possibilité d'avantages environnementaux à long terme en vertu d'une augmentation du stockage du carbone.

11. Principaux messages et recommandations

À l'intention des aménagistes forestiers :

1. *La mesure du carbone et des flux du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier n'est pas une tâche difficile sur le plan technique, et elle peut se faire avec des données facilement accessibles à la plupart des aménagistes*



forestiers.

2. *Même si les mesures préliminaires risquent d'être légèrement imprécises et qu'elles peuvent ne pas porter sur tous les réservoirs de carbone, cela n'entame nullement leur utilité pour les aménagistes forestiers qui souhaitent intégrer une certaine connaissance des problèmes du changement climatique dans leurs évaluations, leurs plans, leurs activités de surveillance et leurs rapports.*
3. *Les aménagistes forestiers doivent utiliser les meilleures données disponibles au lieu d'attendre que des données « parfaites » ne le deviennent. Un premier bilan constitue la meilleure façon d'obtenir l'engagement de peaufiner et d'améliorer les estimations préliminaires.*
4. *Plusieurs rapports, que l'on peut se procurer auprès du Centre de foresterie du Nord du Service canadien des forêts, contiennent suffisamment d'informations pour commencer. « Le bilan du carbone du secteur forestier canadien » (Kurz et al., 1992, Rapport d'information NOR-X-326) donne un excellent aperçu du modèle de bilan du carbone du SCF, tandis que « A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra minerals soils » (Siltanen et al., 1997) fournit les données nécessaires sur les profils pédologiques régionaux. Au nombre des autres rapports, il faut citer : « Une analyse rétrospective sur 70 ans des flux du carbone dans le secteur forestier canadien » (Kurz et Apps, 1999) et « Le bilan du carbone du secteur canadien des produits forestiers » (Apps et al., 1999). On trouvera les facteurs de conversion du carbone à la figure 1 ci-dessus (page 5). Les autres données dont on a besoin pour commencer (volume de bois, courbes d'accroissement en volume, données sur l'exploitation et les perturbations naturelles) sont disponibles localement.*

5. *Il existe plusieurs activités d'aménagement des forêts qui permettent d'accroître la capacité des forêts à stocker du carbone et qui concordent avec l'aménagement forestier durable. Les méthodes à long terme qui ont pour effet d'accroître le stockage global du carbone (mesuré en tonnes/hectare/an et établi en moyenne sur au moins un siècle) présentent plus d'intérêt que les méthodes qui se concentrent essentiellement sur l'accroissement du taux de séquestration à court terme.*

À l'intention du Réseau de forêts modèles :

6. *Le Réseau de forêts modèles est en fort bonne posture pour jouer un rôle de premier plan dans l'élaboration d'un modèle universel du bilan du carbone qui pourra facilement être utilisé par n'importe quel aménagiste forestier moyennant des données facilement disponibles. Le Service canadien des forêts possède déjà la plupart des éléments nécessaires à la création d'un modèle universel crédible et facile à utiliser, et le soutien et le concours du Réseau de forêts modèles pourrait contribuer à en faire une priorité.*

12. Remerciements

L'auteur de ce rapport remercie de son appui le Comité consultatif stratégique sur les indicateurs locaux du Réseau canadien de forêts modèles qui lui a octroyé des subventions de voyage pour l'aider à faire ses recherches dans le cadre de ce rapport. David Price (Service canadien des forêts) a apporté une contribution particulièrement précieuse en expliquant bon nombre des paramètres du Modèle de bilan du carbone du SCF, de même que Mike Apps (Service canadien des forêts) et Werner Kurz (Essa Technologies Ltd). Taumey Mahendrappa (Service canadien des forêts) a fourni d'utiles renseignements sur ses recherches dans les Maritimes, tandis que Darrell Harris (Service des forêts de Terre-Neuve) a expliqué en détail l'utilisation des inventaires



forestiers. Mike Apps, Ed Banfield, Jag Bhatti, Zhong Li et David Price ont lu la première version de ce rapport et ont fourni de précieux conseils, même si l'auteur reste seul responsable des erreurs qui ont pu s'y glisser. Enfin, l'auteur tient à remercier Brian Bonnell (Service canadien des forêts) de ses encouragements pour entreprendre un tel projet et de son aide pour le mener à bien.

13. Bibliographie

- (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Apps, M.J., W.A. Kurz, S.J. Beukema, and J.S. Bhatti. 1999. Carbon budget of the Canadian forest product sector. *Environmental Science and Policy* 2: 25-41.
- Apps, Michael J. and Marsden, Jenni (eds.) (2000) The Role of Boreal Forests and Forestry in the Global Carbon Budget (Abstracts). Canadian Forest Service, May 2000.
- Binkley, C.S., M.J. Apps, R.K. Dixon, P. Kauppi, and L-O. Nilsson. 1998. Sequestering carbon in natural forests. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 27: S23-45.
- Canadian Council of Forest Ministers (1997) Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management in Canada: Technical Report. Natural Resources Canada, 1996.
- Forest Sector Table (1998) Foundation Paper: A Survey of the Forest Sector and Forest Sector Options. Natural Resources Canada, October 1998.
- Forest Sector Table (1999) Options Report: Options for the Forest Sector to Contribute to Canada's National Implementation Strategy for the Kyoto Protocol. Natural Resources Canada, November 1999.
- IPPC. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Organization for Economic Cooperation and Development and International Energy Agency.
- IPCC (2000) Special Report on Land Use, Land-use Change and Forestry, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.
- Kurz, W.A., Apps, M.J., Webb, T.M. and McNamee, P.J. (1992) The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase I. Natural Resources Canada Information Report NOR-X-326, 1992.
- Kurz, Werner A. And Apps, Michael J. (1999) A 70-Year Retrospective Analysis of Carbon Fluxes in the Canadian Forest Sector. *Ecological Applications* 9(2), pp 526-547.
- Kurz, Werner A., Beukema, Sarah J. and Apps, Michael J. (1998) Carbon Budget Implications of the Transition from Natural to Managed Disturbance Regimes in Forest Landscapes. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 2, pp 405-421.
- Kurz, Werner A. (1999) Assessing Options for Measurement of Verifiable Changes in Carbon Stocks from reforestation, Afforestation, and Deforestation and Other Potential Forestry Activities. Prepared by Essa Technologies Ltd. For the Sinks Table, June 22, 1999.
- Mahendrappa, M.K. and Pitt, C.M. (2000) Organic Horizon Thickness: An Indicator of Sustainable Forest Management in the Maritime Provinces. Final Report on Criteria and Indicators Group 4 - Carbon Sequestration in the Forests. Submitted to the Fundy Model Forest. March 2000,.
- Price, David T., Apps, Michael J., Kurz, Werner A., Wesbrook, Michael, and Curry, R. Sean (1994) A "Model Forest Model": Steps Toward Detailed Carbon Budget Assessments of Boreal Forest Ecosystems. *World Resources Review*, Vol. 6,



No. 4, 1994, pp 461-476

Price, David T., Mair, Ralph M., Kurz, Werner A., and Apps, Michael J. (1996) Effects of forest management, harvesting and wood processing on ecosystem carbon dynamics: a boreal case study. *NATO ASI Series*, Vol I 40 pp 279-292

Price, D.T., Halliwell, D.H., Apps, M.J., Kurz, W.A., and Curry, S.R. (1997) Comprehensive assessment of carbon stocks and fluxes in a Boreal-Cordilleran forest management unit. *Canadian Journal of Forest Research* 27: pp 2005-2016

Price, David T., Apps, Michael J., and Kurz, Werner A. (1998) Past and Possible Future Carbon Dynamics of Canada's Boreal Forest Ecosystems. From G.M. Kohlmaier, M. Weber and R.A. Houghton (eds), Carbon Dioxide

Mitigation in Forestry and Wood Industry, 1998, Springer, Berlin Heidelberg, pp 63-88.

Robinson, G.C., Peterson, E.B., Smith, S.M. and Nagle, G.S. (1999) Estimating the carbon sequestration associated with reforestation in western Canada. Submitted by Nawitka Renewable Resource Consultants to the Forest and Sinks Tables, June 11 1999.

Schlamadinger, B. and Marland, G. (2000) Land Use and Global Climate Change: Forests, Land Management, and the Kyoto Protocol. Pew Center on Global Climate Change, June 2000.

Siltanen, R.M., Apps, M.J., Zoltai, S.C., Mair, R.M. and Strong, W.L. (1997) A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils. Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 1997.