

**LE CYCLE DU CARBONE ET LA FORÊT :**  
**DE LA PHOTOSYNTHÈSE**  
**AUX PRODUITS FORESTIERS**

MICHEL CAMPAGNA, ing.f. M.Sc.

Direction de l'environnement forestier  
Service de l'évaluation environnementale

Québec, décembre 1996

© Gouvernement du Québec  
Ministère des Ressources naturelle  
Dépôt légal, Bibliothèque nationale du Québec, 1996  
ISBN 2-550-31020-9  
Code de diffusion : RN96-3106

## LE CYCLE DU CARBONE ET DE LA FORÊT : DE LA PHOTOSYNTÈSE AUX PRODUITS FORESTIERS

### SOMMAIRE

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est un des gaz à effet de serre qui contribue actuellement au réchauffement de la planète. Le carbone, qui est l'une des composantes de ce gaz, fait l'objet de nombreux échanges entre les divers constituants terrestres, atmosphériques et océaniques qui forment le cycle global du carbone.

La concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub>, qui était de 356 ppmv en 1993, augmente actuellement de 1,5 ppmv par an, ce qui correspond à une accumulation annuelle de carbone dans l'atmosphère de  $3,2 \pm 0,2$  GtC/an (gigatonnes de carbone/an). Cette accumulation est toutefois inférieure à la quantité émise par les activités humaines, qui totalisent  $7,1 \pm 1,1$  GtC/an. Selon les dernières estimations publiées par le *Intergovernmental Panel On Climate Change* (1995), la quantité de carbone émis par les activités humaines, qui n'est pas mesurée dans l'atmosphère, serait absorbée par les océans et les forêts. Les forêts apparaissent donc être une composante importante du bilan global du carbone.

Les processus d'échange de carbone entre l'atmosphère, la végétation et le sol sont la photosynthèse, la respiration autotrophe et la respiration hétérotrophe. La photosynthèse permet à la végétation d'absorber le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. La respiration autotrophe représente l'ensemble des processus métaboliques qui, chez les arbres, provoquent une libération de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. La respiration hétérotrophe est la libération de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère causée par les activités des organismes qui ne font pas de photosynthèse. La respiration hétérotrophe qui se déroule principalement dans le sol est due à l'activité microbienne qui transforme le matériel organique en CO<sub>2</sub>. L'importance relative de la photosynthèse vis-à-vis les diverses formes de respiration détermine si l'écosystème forestier est un puits, une source de carbone ou s'il est en équilibre avec l'atmosphère sur le plan des échanges de carbone. Un écosystème forestier est considéré comme un puits de carbone lorsque, pour une période donnée, la quantité de CO<sub>2</sub> absorbé par la photosynthèse est supérieure à la quantité libérée par la respiration autotrophe et la respiration hétérotrophe. Si la quantité de CO<sub>2</sub> libéré est supérieure à la quantité absorbée, l'écosystème forestier est, pour une période donnée, considéré comme une source de carbone. Les divers processus qui affectent les flux de carbone dans l'écosystème forestier comme la photosynthèse, la respiration autotrophe et la

respiration hétérotrophe connaissent des fluctuations selon les stades de développement de la forêt. La connaissance de l'évolution des divers flux de carbone dans un écosystème forestier est essentielle si on vise à optimiser les fonctions de puits et de réservoir de carbone de cet écosystème.

Plusieurs auteurs ont essayé de déterminer si globalement les forêts séquestrent ou libèrent du carbone au cours de leur existence, car les forêts et les sols forestiers sont des réservoirs de carbone très importants. Bien que les travaux de recherche apportent constamment de nouvelles découvertes sur ce sujet, il est possible de souligner quelques avis qui, sans être des certitudes, reflètent toutefois l'état actuel des connaissances.

**Selon la documentation scientifique:**

- les écosystèmes forestiers séquestrent beaucoup plus de carbone par unité de surface que bien d'autres écosystèmes terrestres ;
- une jeune forêt en croissance constitue un puits de carbone ;
- une forêt mature est un réservoir de carbone dont les fonctions de puits et de source de carbone sont équivalentes ;
- le remplacement d'une forêt mature par une jeune forêt provoque une libération de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère à cause de la décomposition et du brûlage des résidus de coupe et de production. Certains auteurs croient que cette libération de CO<sub>2</sub> pourrait être égale ou plus importante que l'augmentation temporaire de la fixation de CO<sub>2</sub> par la jeune forêt ;
- le sol forestier est un important réservoir de carbone ;
- augmenter les superficies forestières en reboisant est le meilleur moyen d'augmenter la séquestration du carbone par les forêts ;
- augmenter la croissance des arbres par la sylviculture peut augmenter ou non la séquestration de carbone par la forêt. Par exemple, l'éclaircie pourrait provoquer une

libération de CO<sub>2</sub> à un taux supérieur à la séquestration du carbone par les arbres résiduels à cause de l'augmentation de la décomposition de la litière et de l'humus;

- déterminer l'âge d'exploitabilité d'une forêt à partir de critères économiques provoque une sous-utilisation de la forêt à remplir pleinement son rôle de réservoir de carbone, car la quantité totale de carbone séquestré est à tout moment supérieure dans les forêts matures comparativement aux jeunes forêts, même si le taux de croissance nette des forêts matures est près et parfois en deçà de 0 ;
- la forêt séquestre de façon plus efficace le carbone que les produits forestiers ce qui en fait un meilleur réservoir de carbone ;
- les produits forestiers constituent des réservoirs de carbone pour une période variable puis, ils deviennent des sources de carbone lorsque débute leur décomposition. Dans tous les cas, ce réservoir ne représente qu'une fraction négligeable des réservoirs globaux formés par la végétation vivante et le sol.

Au Canada, des chercheurs (Kurz et Apps, 1996) ont étudié le bilan de carbone du secteur forestier canadien pour une période de soixante-dix ans, à partir d'un modèle qui considérait les flux et les réservoirs de carbone associés à la biomasse végétale vivante, aux sols, aux produits forestiers, aux sites d'enfouissement sanitaires, aux tourbières ainsi que les effets, sur la forêt, des perturbations naturelles et anthropiques. Ces auteurs mentionnent que durant une période de soixante-dix ans (1920-1989), la forêt boréale canadienne (trois zones éco-climatiques seulement : boréale est, boréale ouest et subarctique) a été un puits de carbone accumulant annuellement 118 Tg C/an (téragrammes de carbone/an). Ils rapportent que durant les soixante premières années (1920-1979), le taux de séquestration de carbone de la forêt était de 147 Tg C/an, alors que durant les dix dernières années (1979-1989), la forêt a agi comme une source de carbone en libérant 57 Tg C/an. Le taux de séquestration du carbone dépend en grande partie du régime des perturbations et, selon les chercheurs, les nombreuses perturbations naturelles des années 1969-1989 affecteront sûrement le bilan de carbone des futures décennies. En effet, ces perturbations ont augmenté les quantités de matière organique en décomposition et les superficies en régénération qui ont un taux initial de séquestration de carbone peu élevé.

## TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE .....	iii
TABLE DES MATIÈRES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	ix
LISTE DES FIGURES .....	xi
INTRODUCTION .....	1
1 LE CYCLE GLOBAL DU CARBONE ET L'AUGMENTATION DE LA CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE .....	3
2 LES FLUX DE CARBONE CHEZ L'ARBRE .....	6
2.1 La photosynthèse : le captage du dioxyde de carbone par l'arbre .....	6
2.2 La respiration autotrophe : l'émission de dioxyde de carbone par l'arbre .....	8
2.2.1 La photorespiration .....	8
2.2.2 La respiration .....	8
A La respiration de construction .....	9
B La respiration de maintenance .....	10
3 LE RÔLE DU CARBONE DANS LA VIE DE L'ARBRE .....	11
4 LE BILAN DE CARBONE POUR UN PEUPEMENT, UNE FORÊT ET LE SECTEUR FORESTIER .....	15
4.1 La productivité de l'écosystème forestier et des autres écosystèmes terrestres .....	15
4.2 L'évolution des divers flux de carbone dans l'écosystème forestier .....	17
4.3 Le bilan de carbone .....	19
4.3.1 Avis généraux sur le bilan de carbone des forêts .....	20
4.3.2 Avis sur le bilan de carbone du secteur forestier canadien .....	23
4.3.3 Flux et réservoirs de carbone pour des forêts de l'est du Canada .....	24
4.3.4 Le projet <i>BOREAS</i> (Étude de l'atmosphère et des écosystèmes boréaux) .....	28
4.3.5 La forêt et son rôle potentiel pour freiner l'augmentation de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone .....	29
4.3.6 Le taux de récolte des forêts et le bilan de carbone .....	32
4.3.7 Les produits forestiers et la séquestration de carbone .....	37
5 LES MODÈLES .....	40

VIII		
CONCLUSION.....		43
BIBLIOGRAPHIE .....		45
ANNEXE .....		49

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Bilan annuel moyen de CO <sub>2</sub> pour la période s'échelonnant de 1980 à 1989.....	4
Tableau 2	Taux de photosynthèse net de plantes agricoles, de plantes herbacées et d'arbres soumis à des conditions favorables de croissance.....	7
Tableau 3	Coûts de construction associés à la synthèse de quelques composés organiques .....	9
Tableau 4	Coûts de construction associés à la synthèse de structures végétales .....	9
Tableau 5	Écarts possibles dans l'allocation du carbone lorsque l'arbre subit des stress .....	14
Tableau 6	Production primaire nette (PPN), biomasse et contenu organique des sols de différents écosystèmes mondiaux.....	16
Tableau 7	Caractéristiques des peuplements choisis pour évaluer les flux et les réservoirs de carbone .....	24
Tableau 8	Contenu en carbone des diverses composantes qui constituent les arbres et les sols forestiers pour trois peuplements différents .....	25
Tableau 9	Quantités de carbone séquestré annuellement dans les diverses parties des arbres pour des peuplements de pins gris et d'érables à sucre.....	26
Tableau 10	Description de trois scénarios de récolte pour la période s'échelonnant de 1990 à 2039 .....	33
Tableau 11	Flux et bilan de carbone pour le secteur forêt, bilan pour le secteur des produits forestiers et bilan global pour le secteur forestier.....	34
Tableau 12	Répartition du carbone séquestré entre les réservoirs du secteur forêt et des produits forestiers .....	35
Tableau 13	Quantités de carbone exporté pour trois peuplements forestiers différents récoltés selon deux procédés d'exploitation.....	37
Tableau 14	Périodes de temps durant lesquelles divers produits forestiers sont des réservoirs et des sources de carbone.....	39



## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Réservoirs et flux de carbone qui constituent le cycle global du carbone.....	3
Figure 2	Évolution de la concentration atmosphérique du CO <sub>2</sub> .....	5
Figure 3	Priorité dans l'allocation normale du carbone aux diverses structures de l'arbre.....	12
Figure 4	Évolution des divers flux de carbone dans un écosystème durant le développement d'une forêt, de l'établissement à la maturité .....	17
Figure 5	Variations dans l'allocation du carbone entre diverses composantes végétales dans un peuplement du genre <i>Abies</i> .....	19

## INTRODUCTION

Ce document a pour but d'expliquer le rôle des forêts dans le cycle global du carbone. Sa structure permet aux lecteurs d'acquérir graduellement les connaissances requises pour apprécier la complexité du dossier et d'évaluer avec discernement les diverses conclusions tirées des nombreuses publications traitant du sujet. C'est ainsi que la première partie du document présente le cycle global du carbone dont la forêt est une composante. Le chapitre suivant traite de la photosynthèse et de la respiration autotrophe qui sont les processus d'échange de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) entre les plantes et l'atmosphère. Viennent ensuite les sections qui décrivent le bilan de carbone d'un arbre puis, celui d'un peuplement forestier, de la forêt en général et du secteur forestier (forêt et produits forestiers). Les sections suivantes évaluent le potentiel de la forêt à freiner l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>, l'impact de l'âge de la récolte sur le bilan de carbone du secteur forestier et l'importance du réservoir constitué par les produits forestiers. Finalement, un chapitre présente brièvement les limites des modèles qui servent à simuler l'évolution de la forêt.

## 1. LE CYCLE GLOBAL DU CARBONE ET L'AUGMENTATION DE LA CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est un des gaz à effet de serre qui contribue actuellement au réchauffement de la planète. Le carbone, qui est l'une des composantes de ce gaz, est l'objet de nombreux échanges entre les divers constituants terrestres, atmosphériques et océaniques qui forment le cycle global du carbone. La figure 1 illustre les réservoirs et les flux de carbone qui constituent le cycle global du carbone (adaptée de Houghton *et al.*, 1995).

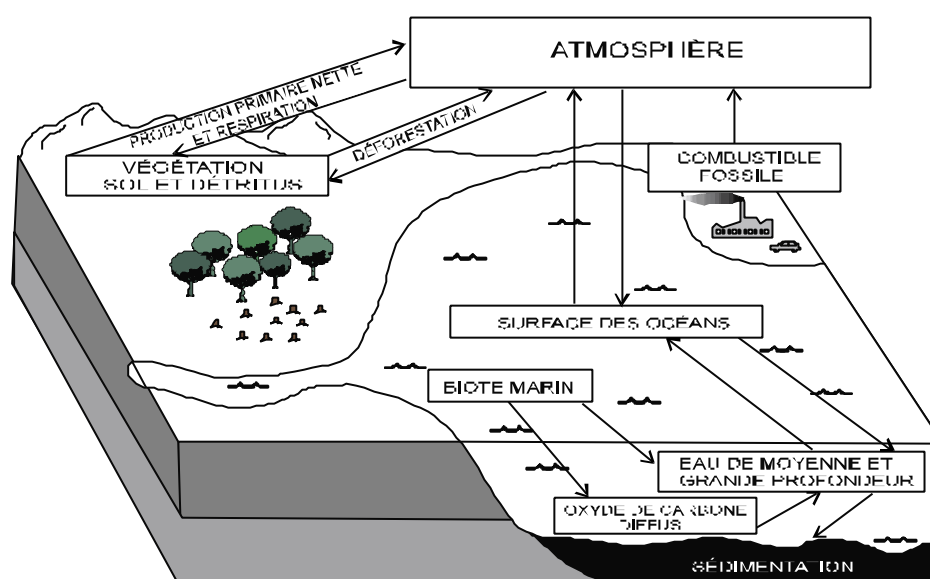


Figure 1. Réservoirs et flux de carbone qui constituent le cycle global du carbone

La concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$ , qui était de 280 ppmv (parties par million par volume) à l'époque pré-industrielle (1750-1800), est passée à 356 ppmv en 1993 et actuellement, elle augmente de 1,5 ppmv par an (Schimel *et al.*, 1995). Cette augmentation récente de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  est principalement due aux activités humaines (Watson *et al.*, 1990). En effet, pour la période 1980-1989, l'addition annuelle de carbone au cycle planétaire par la combustion de combustibles fossiles et la production de ciment fut en moyenne de  $5,5 \pm 0,5$  GtC/an (gigatonnes de carbone/an), alors que la contribution de la déforestation (forêt tropicale) fut de  $1,6 \pm 1,0$  GtC/an (Schimel *et al.*, 1995). Malgré l'importance de ces émissions ( $7,1 \pm 1,1$  GtC/an), l'augmentation annuelle de carbone atmosphérique n'a été que de  $3,2 \pm 0,2$  GtC/an

(Schimel *et al.*, 1995). Watson *et al.* (1990) estiment que l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> durant la dernière décennie correspond à  $48 \pm 8$  % des émissions totales pour cette période. La quantité de CO<sub>2</sub> qui ne s'accumule pas dans l'atmosphère serait, selon la documentation, absorbé par les océans et éventuellement, déposé au fond des profonds océans (Jarvis, 1989). Par contre, selon Watson *et al.* (1990), ce CO<sub>2</sub> est séquestré dans des proportions équivalentes dans les océans et le milieu terrestre. Comme le mentionne Vitousek (1994), le sort du carbone émis qui n'est pas mesuré dans l'atmosphère amène encore beaucoup de controverse. Le bilan global le plus récent publié par le *Intergovernmental Panel On Climate Change*, qui couvre la période 1980 à 1989, est présenté au tableau 1 (Schimel *et al.*, 1995).

TABLEAU 1

BILAN ANNUEL MOYEN DE CO<sub>2</sub> POUR LA PÉRIODE S'ÉCHELONNANT DE 1980 À 1989<sup>1</sup>

ÉMISSIONS	
Émissions provenant de la combustion des combustibles fossiles et de la production du ciment	5,5 ± 0,5 GtC/an
Émissions nettes provenant du changement de vocation des terres aux tropiques (déforestation)	1,6 ± 1,0 GtC/an
<b>TOTAL DES ÉMISSIONS</b>	<b>7,1 ± 1,1 GtC/an</b>

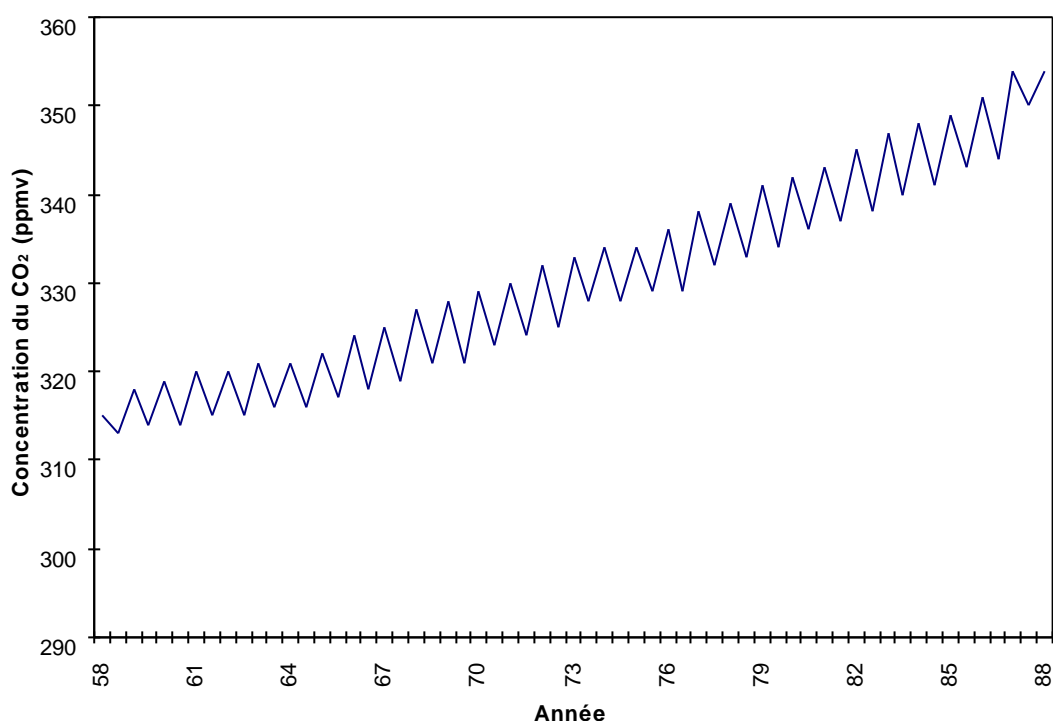
  

ACCUMULATION		ABSORPTION	
Accumulation dans l'atmosphère	3,2 ± 0,2 GtC/an	OCÉANS	
		Absorption par les océans	2,0 ± 0,8 GtC/an
		FORÊTS	
		Séquestration par le renouvellement des forêts (jeunes forêts en croissance dans l'hémisphère nord)	0,5 ± 0,5 GtC/an
		Croissance accrue des forêts due à la fertilisation en CO <sub>2</sub> , au dépôt d'azote et peut-être à des anomalies reliées au climat	1,4 ± 1,5 GtC/an

1. Les écarts-types ont été déterminés à partir d'un intervalle de confiance de 90%

Depuis 1957, la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> fait l'objet d'un suivi précis à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaii (Keeling *et al.*, 1989a dans Vitousek, 1994). La figure 2 présente d'ailleurs l'évolution de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> de 1958 à 1988 (adaptée de Schimel *et al.*, 1995). Vitousek, (1994) indique que l'augmentation

graduelle de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  suit un cycle qui comporte annuellement un maximum et un minimum. Ce cycle annuel est attribuable à l'activité saisonnière du biote terrestre de l'hémisphère nord (Keeling *et al.*, 1989a dans Vitousek, 1994). Jarvis (1989) ajoute que l'oscillation de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  est due en majeure partie aux forêts tempérées et boréales de l'hémisphère nord. En effet, Waring et Schlesinger (1985) indiquent que la baisse de la concentration de  $\text{CO}_2$  est attribuable à la photosynthèse durant la période de croissance et qu'ensuite, la concentration de  $\text{CO}_2$  augmente en hiver, car la respiration continue alors que la photosynthèse est arrêtée. Les mesures indiquent que ce phénomène se déroule également dans l'hémisphère sud, mais qu'il est nettement moins important à cause de la présence moindre de la végétation (Waring et Schlesinger, 1985).



**Figure 2. Évolution de la concentration atmosphérique du  $\text{CO}_2$  (ppmv)**

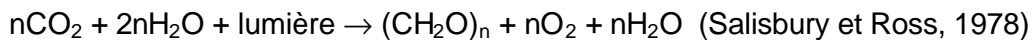
Il est donc apparent que les forêts influencent le cycle du carbone. Les processus d'échange de  $\text{CO}_2$  entre l'atmosphère, la végétation et le sol sont la photosynthèse, la respiration autotrophe (végétale) et la respiration hétérotrophe dans le sol (principalement microbienne, transforme le matériel organique en  $\text{CO}_2$ ) (Watson *et al.*, 1990).

## 2. LES FLUX DE CARBONE CHEZ L'ARBRE

### 2.1 La photosynthèse : le captage du dioxyde de carbone par l'arbre

La photosynthèse, qui est activée par le rayonnement solaire, permet à une plante de capter le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère afin de synthétiser des glucides. La photosynthèse utilise la radiation solaire visible (400 nm à 700 nm) qui représente environ 50 % de la radiation solaire globale (Waring et Schlesinger, 1985). De cette fraction, environ 85 % de l'énergie solaire est absorbée par les feuilles mais cette valeur peut varier considérablement selon leur structure et leur âge. Enfin, de la quantité de lumière absorbée par la feuille, seulement 5 % sert à la photosynthèse alors que le reste est perdu en chaleur (Salisbury et Ross, 1978).

L'équation chimique qui décrit la photosynthèse est :



La majorité de la photosynthèse se fait dans le feuillage mais il s'en fait aussi (très peu) dans les tiges, les branches (Waring et Schlesinger, 1985; Kozłowski *et al.*, 1991), l'écorce, les cotylédons, les bourgeons et les fruits (Kozłowski *et al.*, 1991).

Le taux de photosynthèse varie selon les espèces et les provenances, les feuilles d'ombre et de lumière, le moment de la journée et la saison de croissance. Ces variations dépendent d'interactions entre des caractéristiques végétales comme l'âge, la structure et l'exposition des feuilles, le développement de la cime, le comportement des stomates, la quantité et l'activité de Rubisco (ribulose biphosphate carboxylase-oxygénase) et les facteurs environnementaux comme l'intensité de la lumière, la température, la disponibilité de l'eau, la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et des polluants atmosphériques et des conditions du sol (Kozłowski *et al.*, 1991).

Nelson (1984) indique que les arbres ont des taux de photosynthèse nette qui sont semblables à ceux de plantes agricoles et de plantes herbacées (Tableau 2).

TABLEAU 2

TAUX DE PHOTOSYNTHÈSE NET DE PLANTES AGRICOLES, DE PLANTES HERBACÉES  
ET D'ABRES SOUMIS À DES CONDITIONS FAVORABLES DE CROISSANCE<sup>1</sup>

TYPE DE PLANTES	ESPÈCES OU HYBRIDES	CAPTAGE DE CO <sub>2</sub> (g CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> de feuillage s <sup>-1</sup> )
Plantes agricoles		8,34 à 16,68
Plantes herbacées		8,34 à 22,24
Feuillues	<i>Populus deltoides</i> x <i>Populus nigra</i>	12,30
	<i>Salix</i> (quelques espèces)	13,51 à 17,24
Résineux	<i>Pinus sylvestris</i>	9,73 à 10,52
	<i>Pinus rigida</i> <sup>2</sup>	14,46
	<i>Pinus taeda</i> <sup>2</sup>	11,11
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	9,73

1 - Adapté de Nelson, 1984

2 - Le taux mesuré chez les pins est probablement inférieur au maximum à cause de l'ombrage mutuel créé par les aiguilles.

La photosynthèse permet à l'arbre de capter le CO<sub>2</sub> pour ensuite synthétiser des glucides (CH<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>. C'est donc grâce à la photosynthèse que l'arbre peut exercer sa fonction de puits de carbone.

## 2.2 La respiration autotrophe : l'émission de dioxyde de carbone par l'arbre

Les arbres libèrent du CO<sub>2</sub> lors de la photorespiration et de la respiration. La photorespiration se déroule simultanément à la photosynthèse, alors que la respiration suit les activités métaboliques diurnes et nocturnes de l'arbre.

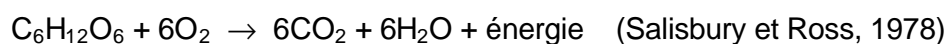
### 2.2.1 La photorespiration

La photorespiration provoque la libération de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à cause des propriétés de l'enzyme Rubisco. Cette enzyme, qui fixe le CO<sub>2</sub> atmosphérique lors de la photosynthèse, peut également fixer l'oxygène (O<sub>2</sub>) (Kozlowski *et al.*, 1991). Lorsque l'O<sub>2</sub> s'associe à l'enzyme au lieu du CO<sub>2</sub>, le carbone préalablement fixé est dirigé vers le cycle d'oxydation du carbone de la photorespiration qui mène à la libération de CO<sub>2</sub> (Jarvis, 1989; Kozlowski *et al.*, 1991). La photorespiration utilise de 30 % à 50 % du carbone fixé lors de la photosynthèse (Kozlowski *et al.*, 1991). La photosynthèse nette est donc la différence entre la photosynthèse et la photorespiration (Kozlowski *et al.*, 1991). Une concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> élevée réduit la photorespiration, car l'augmentation du ratio CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> qui s'ensuit favorise la fixation du CO<sub>2</sub> par l'enzyme Rubisco au détriment de l'O<sub>2</sub> (Jarvis, 1989 ; Melillo *et al.*, 1990 ; Kozlowski *et al.*, 1991).

### 2.2.2 La respiration

La respiration est le processus métabolique qui permet à l'arbre de libérer et d'utiliser l'énergie emmagasinée dans les glucides synthétisés durant la photosynthèse.

L'équation de la respiration est :



Il y a deux types de respiration chez les arbres : la respiration de construction et la respiration de maintenance. La respiration est beaucoup plus intense dans les parties de l'arbre en croissance active que dans les tissus matures et elle est très lente dans les tissus en dormance (Kozlowski *et al.*, 1991).

A. La respiration de construction



La respiration de construction utilise l'énergie des glucides comme le glucose pour créer des structures végétales ou d'autres composés organiques. La respiration de construction démarre avec le début de la saison de croissance et demeure très active tant et aussi longtemps que la plante croît.

Le tableau 3 présente les coûts de construction exprimés en grammes de glucose nécessaires pour synthétiser quelques composés organiques.

**TABLEAU 3**

**COÛTS DE CONSTRUCTION ASSOCIÉS À LA SYNTHÈSE DE QUELQUES COMPOSÉS ORGANIQUES<sup>1</sup>**

{PRIVE }COMPOSÉS CHIMIQUES SYNTHÉTISÉS	QUANTITÉ DE GLUCOSE REQUIS POUR LA SYNTHÈSE DE DIVERS COMPOSÉS CHIMIQUES
1 g de lipides	3,02 g de glucose
1 g de lignine	1,90 g de glucose
1 g de protéines	2,35 g de glucose
1 g de polysaccharides	1,18 g de glucose

1 - Adapté de Penning de Vries, 1975 dans Waring et Schlesinger, 1985

Connaissant la composition biochimique des diverses structures qui composent une plante, il est possible d'en estimer les coûts de construction (Tableau 4).

**TABLEAU 4**

**COÛTS DE CONSTRUCTION ASSOCIÉS À LA SYNTHÈSE DE STRUCTURES VÉGÉTALES<sup>1</sup>**

{PRIVE }TYPE D'ARBRE	COMPOSANTE VÉGÉTALE	COÛT DE CONSTRUCTION (g de sucrose/g de matière sèche produite)
PIN	Aiguilles	1,57
	Branches	1,49
	Écorce	1,60
	Racines	1,47
EUCALYPTUS	Phloème	1,45
	Cambium	1,22
	Aubier	1,36
	Bois de coeur	1,40

1 - Adapté de Chung et Barnes, 1977 dans Waring et Schlesinger, 1985

**B. La respiration de maintenance**

La respiration de maintenance sert à fournir l'énergie nécessaire aux multiples fonctions des cellules vivantes composant les diverses structures de l'arbre. Waring et Schlesinger (1985) indiquent que la respiration de maintenance double à toutes les augmentations de température de 10 °C. La quantité phénoménale de tissus qui servent au transport et à l'entreposage de substances dans l'arbre fait en sorte que les dépenses en énergie sont disproportionnées à comparer aux autres plantes où domine la production de feuillage et des semences. Les tissus contenant des concentrations élevées d'enzymes ont des coûts de maintenance plus élevés que des tissus servant à stocker de l'amidon et des glucides (Waring et Schlesinger, 1985). Après le suivi des activités métaboliques d'un arbre dans une plantation au Japon, Paembona *et al.* (1992) indiquent que la respiration de construction et la respiration de maintenance représentent en moyenne, 21 % et 79 % de la respiration totale, d'où l'importance de la respiration de maintenance. Kozlowski *et al.* (1991) indiquent que le taux de respiration n'est pas fortement relié aux besoins énergétiques et des glucides peuvent être gaspillés lorsque les températures nocturnes sont élevées.

La photorespiration, la respiration de construction et principalement la respiration de maintenance sont, pour les arbres, les processus métaboliques qui amènent une libération de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

### 3. LE RÔLE DU CARBONE DANS LA VIE DE L'ARBRE

Le budget énergétique d'un arbre comprend 3 composantes :

- l'apport énergétique fourni par les glucides produits par la photosynthèse ;
- les dépenses énergétiques associées à la respiration de construction et à la respiration de maintenance ;
- les économies énergétiques stockées dans les réserves (acides organiques, acides aminés, glucides, amidon, lipides et protéines) et dans des produits secondaires (tannins, pigments et régulateurs de croissance) (Waring et Schlesinger, 1985).

Quotidiennement, la production et l'utilisation de glucides sont influencées par de nombreux facteurs biotiques et abiotiques. La nuit, la respiration et l'absence de photosynthèse font en sorte que l'arbre émet du CO<sub>2</sub>. La respiration nocturne utilise environ 50 % de la production de la photosynthèse nette et une augmentation de la température d'environ 3 °C peut causer une augmentation significative de la respiration de maintenance (Kozlowski *et al.*, 1991). Dès les premières lueurs du jour, la photosynthèse débute et augmente jusqu'au point où le CO<sub>2</sub> absorbé par la photosynthèse équivaut au CO<sub>2</sub> libéré par la respiration (point de compensation). Le taux de photosynthèse augmente alors en relation avec l'intensité lumineuse jusqu'à un taux maximum (Waring et Schlesinger, 1985) qui est atteint lorsqu'un des nombreux autres facteurs biotiques et abiotiques, qui influencent la photosynthèse, en limitent le fonctionnement. Une fois le point de compensation dépassé, l'arbre capte plus de CO<sub>2</sub> qu'il en émet, ce qui se traduit par l'accumulation de glucides.

Les glucides produits par la photosynthèse servent, entre autres, à construire des feuilles ou des aiguilles, des branches, du bois de tronc, des racines et des organes reproducteurs (Waring et Schlesinger, 1985). Normalement, un équilibre existe quant à la proportion des diverses structures construites comme le feuillage, les tissus de support et de transport de la sève ainsi que les racines. La figure 3 illustre les priorités dans l'allocation normale du carbone aux diverses structures de l'arbre (Waring et Schlesinger, 1985).

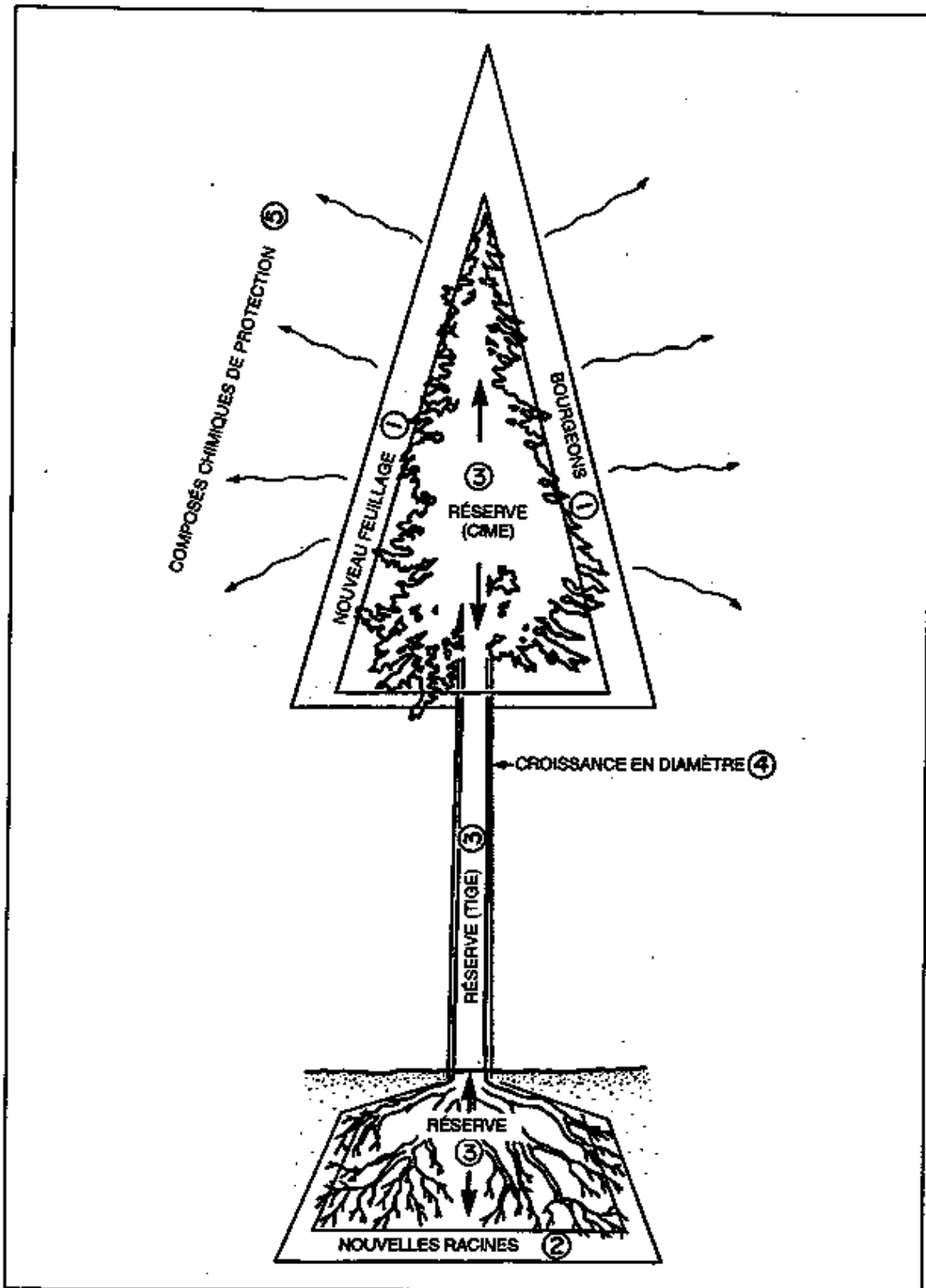


Figure 3. Priorité dans l'allocation normale du carbone aux diverses structures de l'arbre (adapté de Waring et Schlesinger, 1985)

Cette figure démontre que le carbone disponible est d'abord utilisé pour former des bourgeons, le nouveau feuillage et les nouvelles racines. S'il reste du carbone après cette étape, il est entreposé pour constituer des réserves. Ce n'est qu'après ça que le carbone résiduel est consacré à la croissance en diamètre de la tige et à la synthèse de composés chimiques de protection. La croissance du bois de tronc représente souvent moins de 20 % de la production totale annuelle de matière sèche. Lorsque les arbres produisent des organes reproducteurs, la demande en carbone est telle qu'elle peut limiter la croissance des autres structures (Waring et Schlesinger, 1985). La production, l'utilisation et l'entreposage des glucides varient également selon les diverses périodes d'activités végétales durant la saison de croissance. En effet, durant la saison végétative se succèdent certaines activités métaboliques dominantes. Au printemps, le développement du feuillage nécessite des réserves, car les besoins énergétiques des jeunes feuilles dépassent ce qu'elles produisent par la photosynthèse. Pour les feuillus, seules les réserves accumulées l'année précédente contribuent à ce processus alors que pour les résineux, les réserves et la photosynthèse des feuilles plus âgées servent à fournir l'énergie requise.

Les réserves sont donc particulièrement importantes pour les feuillus dont les activités de croissance débutent avant le déploiement complet du feuillage (Dougherty *et al.*, 1979 dans Kozlowski *et al.*, 1991). En général, le taux de photosynthèse du nouveau feuillage augmente jusqu'à ce que ce dernier soit pleinement déployé (Kozlowski *et al.*, 1991). Il y a par la suite une baisse graduelle du taux de photosynthèse. Le taux de photosynthèse dans les feuilles qui persistent plus d'un an diminue après la première année (Kozlowski *et al.*, 1991). Le taux de croissance des espèces à feuilles persistantes est davantage relié à la quantité de nouvelles feuilles qu'à la quantité totale de feuillage (Kozlowski *et al.*, 1991).

En plus de pourvoir aux besoins usuels des arbres, les glucides peuvent servir à soutenir des efforts ponctuels ou, à plus long terme, à répondre aux stress exercés par les divers facteurs environnementaux. Le tableau 5 présente les écarts possibles dans l'allocation du carbone lorsque l'arbre subit des stress (Waring et Schlesinger, 1985). Kozlowski *et al.* (1991) indiquent que les facteurs qui contrôlent la répartition des photosynthétats entre les diverses parties de l'arbre sont peu connus.

TABLEAU 5

ÉCARTS POSSIBLES DANS L'ALLOCATION DU CARBONE LORSQUE L'ARBRE SUBIT DES STRESS<sup>1</sup>

COMPOSANTES VÉGÉTALES	CONDITIONS FAVORISANT LE DÉVELOPPEMENT DE LA COMPOSANTE VÉGÉTALE
Les organes reproducteurs	Stress hydrique modéré, croissance racinaire limitée ou restriction du transport dans le phloème
Feuillage	Ombrage, abondance d'azote et d'eau
Bois de tige	Environnement optimum, charge due à la neige ou à la force exercée par le vent
Racines fines	Disponibilité insuffisante de l'eau dans les niveaux supérieurs d'enracinement (près de la surface du sol), limitation d'azote et sols instables
Composés chimiques de protection et autres réactions défensives	Blessures

1 - Adapté de Waring et Schlesinger, 1985

**Le bilan de carbone**

pour un arbre varie quotidiennement selon les conditions biotiques et abiotiques durant la période d'activité métabolique.

Les glucides synthétisés lors de la photosynthèse servent d'abord à satisfaire les besoins métaboliques prioritaires de l'arbre, puis ils sont consacrés à des activités moins essentielles comme la croissance en diamètre de la tige.

#### 4. LE BILAN DE CARBONE POUR UN PEUPEMENT, UNE FORÊT ET LE SECTEUR FORESTIER

##### 4.1 La productivité de l'écosystème forestier et des autres écosystèmes terrestres

Des connaissances sur les flux du carbone à travers la végétation sont essentielles pour comprendre ce qui se passe actuellement dans les forêts et pour prédire les développements futurs (Ryan, 1991). Le captage, la séquestration et la libération de carbone par les forêts sont étroitement liés au dynamisme et à la vigueur de celles-ci. Les processus les plus importants impliquant le carbone dans l'écosystème terrestre sont : la photosynthèse, la respiration, la translocation, l'allocation, l'entreposage, le renouvellement des racines fines, la décomposition, l'influence des herbivores et la chute des feuilles ou autres (Landsberg *et al.*, 1991). La photosynthèse, la respiration et l'allocation des glucides, entre autres, sont indépendants et varient selon les conditions environnementales, les écosystèmes et l'âge des peuplements (Ryan, 1991). Malgré les difficultés associées à la mesure des divers processus précités, il est possible d'estimer les flux de carbone à partir des changements annuels de la biomasse des arbres (Kozlowski *et al.*, 1991). Les termes utilisés pour exprimer ces changements de biomasse sont :

La production primaire brute (PPB)

La PPB est la masse totale des composés organiques produits par la photosynthèse (Waring et Schlesinger, 1985).

La production primaire nette (PPN)

La PPN est la PPB moins la respiration autotrophe (végétale). En d'autres mots, c'est la masse de matière organique synthétisée par les plantes. La PPN inclut donc toutes les augmentations de la masse des tiges, des feuilles, des organes reproducteurs, des racines et la quantité de tissus végétal consommé par les herbivores ou qui meurt et devient des détritiques (Waring et Schlesinger, 1985).

## La production nette de l'écosystème (PNE)

La PNE est la PPB moins les respirations autotrophe et hétérotrophe. La notion de production nette de l'écosystème exclut les autres exportations de carbone de l'écosystème comme celles provoquées par les feux, l'exploitation forestière, l'érosion ou autres (Waring et Schlesinger, 1985).

L'évaluation des différents écosystèmes mondiaux à partir de variables comme le PPN permet d'apprécier la contribution des écosystèmes forestiers au cycle global du carbone. Waring et Schlesinger (1985) révèlent que les forêts et les sols forestiers sont d'excellents réservoirs de carbone en plus de supplanter tous les autres écosystèmes terrestres quant à la PPN à l'exception des marais et des marécages (Tableau 6).

**TABLEAU 6**

**PRODUCTION PRIMAIRE NETTE (PPN), BIOMASSE ET CONTENU ORGANIQUE  
DES SOLS DE DIFFÉRENTS ÉCOSYSTÈMES MONDIAUX<sup>1</sup>**

<b>TYPE D'ÉCOSYSTÈME</b>	<b>PPN MOYENNE (g C/m<sup>2</sup>/an)</b>	<b>BIOMASSE MOYENNE (kg C/m<sup>2</sup>)</b>	<b>BIOMASSE ORGANIQUE MOYENNE DANS LES SOLS (kg C/m<sup>2</sup>)</b>
Forêt tropicale	1000	22	10,4
Forêt tempérée	650	15	11,8
Forêt boréale	400	9	14,9
Prairies herbacées en zone tempérée	250	1	19,2
Terrains boisés et embroussaillés	300	3	6,9
Agriculture	325	0,5	12,7
Marais et marécage	1000	7	68,6

1 - Adapté de Waring et Schlesinger, 1985

La forêt boréale et la forêt tempérée séquestrent plus efficacement le carbone que bien d'autres écosystèmes terrestres mondiaux en plus de constituer d'excellents réservoirs de carbone.



#### 4.2 L'évolution des divers flux de carbone dans l'écosystème forestier

Malgré leur production primaire nette moyenne élevée, les écosystèmes forestiers n'affichent pas constamment de telles performances durant leur évolution. En effet, les divers processus qui affectent les flux de carbone dans l'écosystème forestier comme la photosynthèse, la respiration et la décomposition, connaissent des fluctuations selon les stades de développement de la forêt. En utilisant des indices comme, entre autres, la PPB et la PPN, il est possible d'illustrer et de comprendre la variation des flux de carbone (Figure 4).

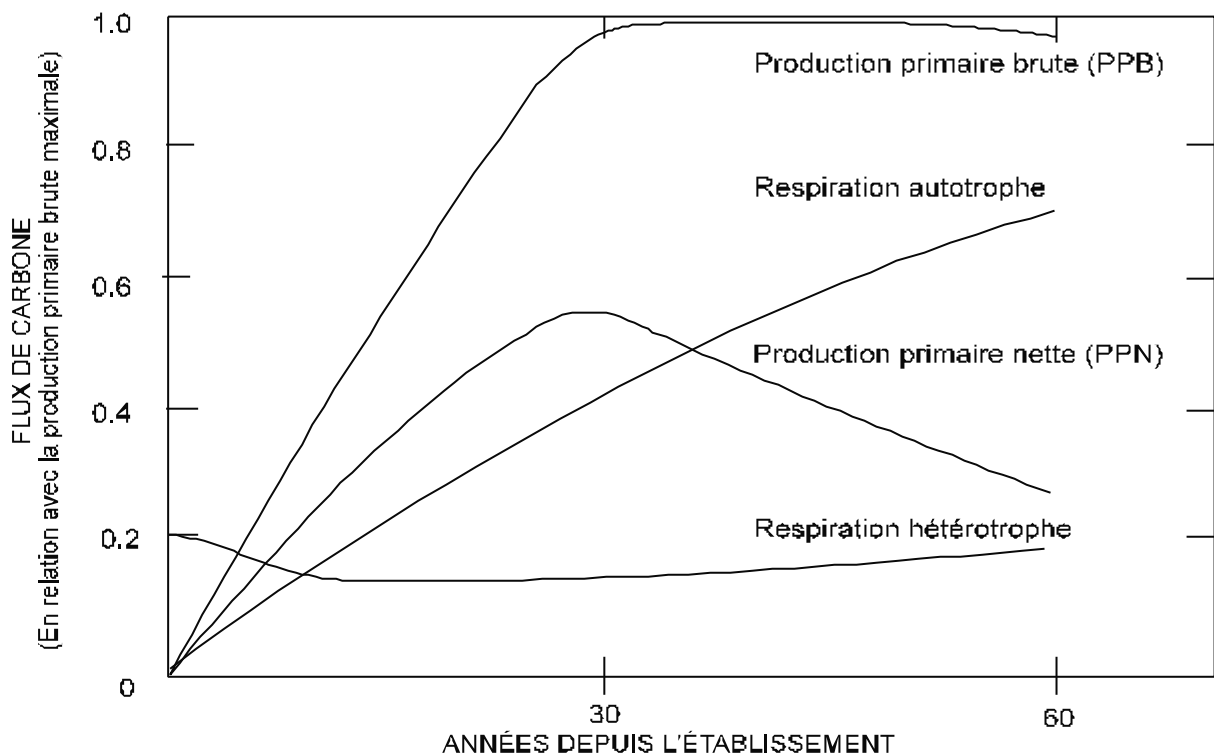


Figure 4. Évolution des divers flux de carbone dans un écosystème durant le développement d'une forêt, de l'établissement à la maturité (adapté de Waring et Schlesinger, 1995)

Dans cet exemple, la PPB atteint un maximum lorsque la forêt a environ 30 ans, ce qui correspond à la fermeture du couvert. La respiration autotrophe continue d'augmenter à mesure que la biomasse des tissus vivants augmente. La PPN atteint, elle aussi, un maximum avec la fermeture du couvert et elle décroît par la suite, justement à cause de l'augmentation de la respiration autotrophe. La respiration hétérotrophe, qui est élevée à la suite de la récolte de la forêt précédente, tend à diminuer légèrement avec la fermeture du couvert (Waring et Schlesinger, 1985). Par la suite, à mesure que la forêt vieillit, la création de trouées peut, de nouveau, faire augmenter la respiration hétérotrophe. Waring et Schlesinger (1985) indiquent qu'au moment de l'établissement d'un peuplement, une quantité disproportionnée de glucides est allouée à la production du feuillage. Par la suite, la proportion de glucides alloués à la biomasse de la tige augmente, alors que la quantité de glucides consentis à la production de branches et de feuillages diminue. Lorsque la surface foliaire se stabilise, la croissance de la tige et des branches compte pour environ 50 % de la production de biomasse épigée (au-dessus du sol). L'allocation du carbone entre les diverses structures de l'arbre varie donc selon le stade de développement du peuplement (Figure 5). Dans les peuplements plus vieux, une réduction dans la croissance de la tige et des branches est la conséquence d'une respiration plus grande des tissus (exemple : la respiration du hêtre européen âgé de 25 ans accapare 40 % du carbone issu de la production primaire brute, alors qu'à 85 ans elle est de 50 %) (Kozłowski *et al.*, 1991). Éventuellement, le carbone immobilisé dans les écosystèmes terrestres (production primaire brute) retourne à l'atmosphère par la respiration autotrophe, la décomposition et les feux (Waring et Schlesinger, 1985).

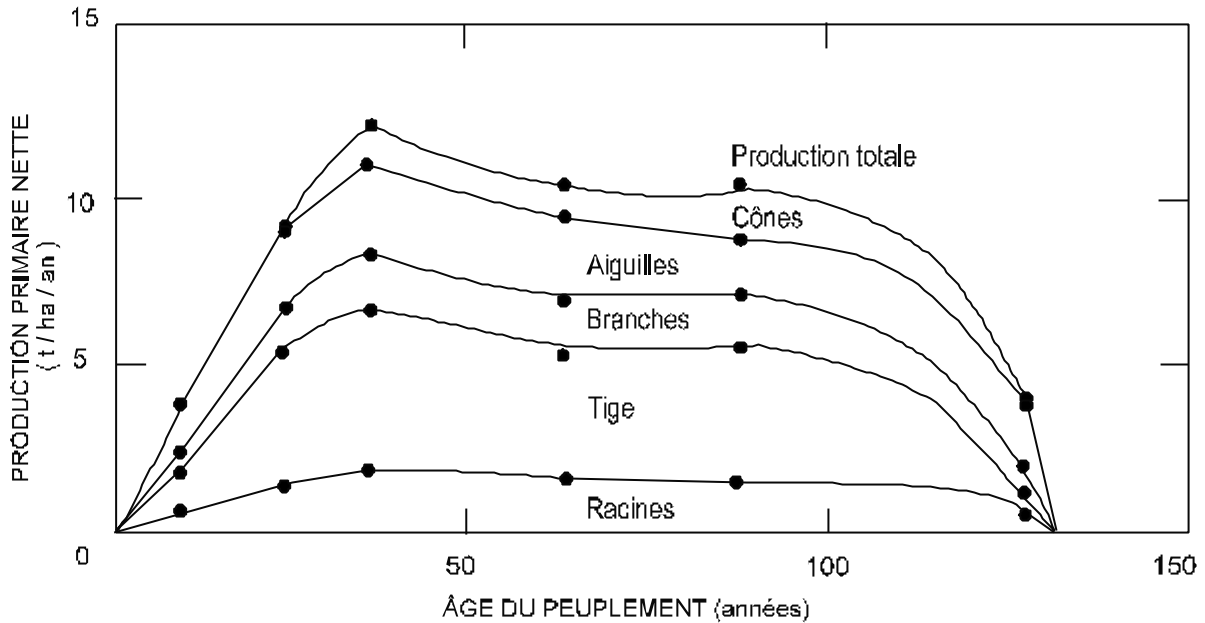


Figure 5 . Variations dans l'allocation du carbone entre diverses composantes végétales dans un peuplement du genre *Abies* ( adapté de Waring et Schlesinger, 1995)

La connaissance de l'évolution des divers flux de carbone dans un écosystème forestier est essentielle si on vise à optimiser les fonctions de puits et de réservoir de carbone.

#### 4.3 Le bilan de carbone

Les forêts couvrent environ le tiers de la surface des continents (Kramer, 1981) et elles font environ les deux tiers de la photosynthèse globale (Watson *et al.*, 1990). L'importance des divers flux de carbone qui caractérisent le dynamisme des écosystèmes forestiers font en sorte que les forêts peuvent être, à certaines périodes, des puits ou des sources de carbone.

Plusieurs auteurs ont essayé de déterminer si globalement les forêts séquestrent ou libèrent du carbone au cours de leur existence, car les forêts et les sols forestiers sont des réservoirs de carbone très importants. Ce chapitre débute avec des avis généraux sur le bilan de carbone des écosystèmes forestiers. Par la suite, les travaux de Kurz et

Apps sur le bilan du carbone du secteur forestier canadien seront brièvement présentés. Une étude sur les forêts de l'est du Canada illustrera ensuite la complexité de dresser un bilan de carbone, compte tenu des nombreuses variables à considérer. Finalement, les résultats préliminaires des travaux de recherche réalisés dans le cadre du projet *BOREAS* (Étude de l'atmosphère et des écosystèmes boréaux) présentent des informations très intéressantes sur la forêt boréale.

#### 4.3.1 Avis généraux sur le bilan de carbone des forêts

Les jeunes peuplements captent plus de CO<sub>2</sub> que les peuplements matures, car étant jeunes et vigoureux, ils ont les taux de croissance nette les plus. Par contre, la quantité totale de carbone séquestré est à tout moment supérieure dans les forêts matures même si elles ont un taux de croissance nette près et parfois en deçà de 0 (Cutter Information Corp., 1992).

Au fil des ans, une forêt vieillit et approche la maturité. Sur le plan du bilan de carbone, un équilibre s'établit entre la respiration (autotrophe et hétérotrophe) et la photosynthèse. À ce moment, la biomasse totale du peuplement devient stable. Si la forêt n'est pas aménagée, les arbres finiront par mourir à des moments différents et ils seront remplacés naturellement. Par contre, si la forêt est aménagée et que les peuplements en voie d'atteindre la maturité sont récoltés puis, que les superficies exploitées sont remises en production, la biomasse totale de cette aire forestière sera constante mais la forêt sera continuellement en croissance (Jarvis, 1989).

Dans les forêts non exploitées, la mortalité naturelle et le renouvellement continue font en sorte que pour de grandes superficies, le captage net de CO<sub>2</sub> par la forêt (photosynthèse moins respiration autotrophe) égale le CO<sub>2</sub> émis par la décomposition de la matière organique (Melillo *et al.*, 1990).

Le cycle de la récolte et de la régénération des forêts permet actuellement aux forêts dans les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord d'accumuler annuellement du carbone. Même si le taux d'oxydation du bois coupé est difficile à déterminer présentement, Melillo *et al.* (1988 dans Melillo *et al.*, 1990) suggèrent que le carbone

séquestré dans le bois coupé est retourné à l'atmosphère par la décomposition et la combustion à un taux semblable à celui du captage par les forêts en régénération.

Si une forêt mature est remplacée par une jeune forêt, il y aura une augmentation temporaire du CO<sub>2</sub> fixé. Cependant, si on considère la libération de CO<sub>2</sub> que provoquent la décomposition et le brûlage des résidus de coupe et les résidus de production, le remplacement d'une forêt mature par une jeune forêt libère du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (Kozlowski *et al.*, 1991).

Dans un monde non perturbé, la PPN équivaut à peu près à la respiration hétérotrophe sur une base annuelle. Le bilan du carbone peut néanmoins être grandement affecté par les activités humaines (changement de vocation des terres)(Watson *et al.*, 1990).

Tout au long de sa vie, une forêt mature a libéré autant de CO<sub>2</sub> qu'elle en a fixé (Kozlowski *et al.*, 1991).

Une forêt en croissance constitue un puits de carbone alors qu'une forêt mature ou une vieille forêt est en équilibre avec l'atmosphère sur le plan des échanges de carbone. Si les forêts sont récoltées et les superficies reboisées périodiquement, le carbone fixé dans les arbres vivants est stocké pour une période plus ou moins longue dans les divers produits forestiers, les débris végétaux et le sol. L'exploitation forestière permet donc d'accumuler du carbone que pour une période limitée après laquelle un équilibre est atteint entre la fixation du CO<sub>2</sub> dans les forêts en croissance et la libération de CO<sub>2</sub> lors de la décomposition des produits forestiers et des débris végétaux au sol (Dewar, 1991).

Selon Harmon *et al.*, (1990), le remplacement d'une vieille forêt par un peuplement plus jeune libère du carbone dans l'atmosphère même si cette dernière est aménagée intensivement et a une production primaire nette supérieure à celle d'une vieille forêt (*old-growth*). Cette constatation serait valable pour la plupart des forêts dont l'âge de la récolte serait moindre que l'âge requis pour atteindre le stade de vieille forêt. Ces auteurs précisent que le facteur critique n'est pas le taux de séquestration du carbone par les arbres mais plutôt le réservoir de carbone constitué par la forêt, ce dernier étant beaucoup plus important pour les vieilles forêts.

On estimait que les forêts du monde contenaient jusqu'à 80 % du carbone épigée total et environ 40 % du carbone hypogée total (sous le niveau du sol). Les nouvelles estimations indiquent plutôt que la végétation contient 31 % du réservoir de carbone total de la forêt et que les sols et la tourbe contiennent 69 % du réservoir de carbone total de la forêt (Dixon *et al.*, 1994). Aux États-Unis, 60 % du carbone contenu dans l'écosystème forestier est sous le niveau du sol dans la matière organique y inclus les racines et dans les organismes du sol (Cutter Information Corp., 1992). Le sol forestier est donc un important réservoir de carbone auquel s'ajoute continuellement, durant la vie d'un peuplement, de la biomasse végétale par la mortalité et le renouvellement des diverses structures des arbres (feuilles, branches, tiges et racines). Il y a aussi les résidus de coupe qui s'ajoutent ponctuellement et dont l'importance varie selon l'intensité de la récolte et l'âge du peuplement récolté (Dewar, 1991).

Selon la documentation scientifique :

- une jeune forêt en croissance constitue un puits de carbone ;
- une forêt mature est un réservoir de carbone dont les fonctions de puits et de source de carbone sont équivalentes ;
- le remplacement d'une forêt mature par une jeune forêt provoque une libération de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère à cause de la décomposition et du brûlage des résidus de coupe et de production. Cette libération de CO<sub>2</sub> pourrait être égale ou plus importante que l'augmentation temporaire de la fixation de CO<sub>2</sub> par la jeune forêt ;
- le sol forestier est un important réservoir de carbone.

#### 4.3.2 Avis sur le bilan de carbone du secteur forestier canadien

Kurz *et al.*, (1992) ont révélé que le secteur forestier canadien avait été un puits de carbone pour l'année 1986. Le modèle utilisé considérait les flux et les réservoirs de carbone associés à la biomasse végétale vivante, aux sols, aux produits forestiers, aux sites d'enfouissement sanitaires, aux tourbières, ainsi que les effets, sur la forêt, des perturbations naturelles et anthropiques. Ces auteurs mentionnent, dans leurs plus récents travaux (Kurz et Apps, 1996), que durant la période comprise entre 1920 et 1989, la séquestration et l'émission du carbone par la forêt boréale ne donnent pas un bilan net égal à zéro. En effet, sur une période de 70 ans, la forêt boréale canadienne (trois zones éco-climatiques seulement : boréale est, boréale ouest et subarctique) a été un puits de carbone accumulant annuellement 118 Tg C/an (téragrammes de carbone/an). Les auteurs rapportent que durant les 60 premières années, le taux de séquestration de carbone de la forêt était de 147 Tg C/an alors que durant les dix dernières années, la forêt a agi comme une source de carbone en libérant 57 Tg C/an. Le taux de séquestration du carbone dépend en grande partie du régime des perturbations et selon Kurz et Apps (1996), les nombreuses perturbations naturelles des années 1969-1989 affecteront sûrement le bilan de carbone des futures décennies. En effet, ces perturbations ont augmenté les quantités de matière organique en décomposition et les superficies en régénération qui ont un taux initial de séquestration de carbone peu. Un bilan net égal à zéro n'est donc pas approprié pour les forêts où les perturbations naturelles jouent, sur des grandes superficies, un rôle important dans la dynamique végétale. Ces résultats sont donc contradictoires avec les conclusions de plusieurs études antécédentes qui suggèrent qu'en moyenne, sur des grandes superficies, les forêts qui ne sont pas affectées par des changements de vocation présentent un bilan équilibré au niveau des échanges de carbone avec l'atmosphère (Kurz et Apps, 1996).

L'ampleur et la fréquence des perturbations naturelles qui affectent la forêt boréale canadienne (feux, épidémies, etc.) influencent grandement le bilan de carbone du secteur forestier canadien.

### 4.3.3 Flux et réservoirs de carbone pour des forêts de l'est du Canada

Cette section présente une étude réalisée par Morrison *et al.* (1993) qui a permis d'évaluer les flux et les réservoirs de carbone de trois forêts naturelles matures de l'est du Canada. Les éléments pertinents à considérer sont les différences sur le plan des échanges du carbone qui caractérisent les peuplements. Les peuplements choisis étaient:

- une pinède à pins gris non perturbée issue d'un feu et située dans la région de Chapleau ;
- une pessière noire non perturbée issue d'un feu et située dans la région du Lac Nipigon ;
- une érablière inéquienne majoritairement composée d'érables à sucre et d'un peu de bouleaux jaunes et située dans la région de Sault Sainte-Marie.

Le tableau 7 présente quelques caractéristiques des peuplements étudiés.

**TABLEAU 7**  
**CARACTÉRISTIQUES DES PEUPELEMENTS CHOISIS POUR ÉVALUER LES FLUX ET LES**  
**RÉSERVOIRS DE CARBONE<sup>1</sup>**

CARACTÉRISTIQUES	PINÈDE À PINS GRIS	PESSIÈRE NOIRE	ÉRABLIÈRE
Âge nominal	62	110	> 250
Volume total brut (m <sup>3</sup> /ha)	222,9	178,3	238,2
Volume marchand brut (m <sup>3</sup> /ha)	184,4	164,6	219,8

1 - Adapté de Morrison *et al.*, 1993



Le tableau 8 présente le contenu en carbone des diverses composantes qui constituent les arbres et les sols forestiers.

TABLEAU 8

**CONTENU EN CARBONE DES DIVERSES COMPOSANTES QUI CONSTITUENT LES ARBRES ET LES SOLS FORESTIERS POUR TROIS PEUPELEMENTS DIFFÉRENTS<sup>1</sup>**

COMPOSANTES	CONTENU EN CARBONE (kg/ha)		
	Pinède à pins gris	Pessière noire	Érablière
<b>Arbres en vie</b>			
Feuillage	2 200	4 600	1 800
Fruits	500	1 700	200
Branches vivantes	4 800	7 800	22 300
Branches mortes	1 200	3 000	900
Bois de tige	48 000	44 500	61 000
Écorce de tige	4 900	7 000	9 500
Souches et racines	10 000	20 400	16 100
<b>TOTAL (arbres en vie)</b>	<b>71 600</b>	<b>89 000</b>	<b>111 800</b>
Végétation au sol	400	700	600
Arbres morts, tronc au sol	19 800	1 800	5 400
<i>Horizons organiques du sol (Forest floor)</i>	20 300	69 600	16 100
Sol minéral	48 900	90 200	214 300
<b>TOTAL (pour les peuplements)</b>	<b>161 000</b>	<b>251 300</b>	<b>348 200</b>

1 - Adapté de Morrison *et al.*, 1993

Le bois de tige constitue le plus important réservoir de carbone chez l'arbre pour tous les peuplements étudiés. Chez les résineux, les racines et la souche forment le deuxième plus gros réservoir de carbone, alors que pour l'érable à sucre ce sont les branches vivantes. Il est également intéressant de constater l'importance du carbone incorporé au sol minéral, surtout dans le cas de l'érablière à sucre où ce réservoir est vraiment dominant.

Le tableau 9 présente les quantités de carbone séquestré annuellement dans les diverses parties des arbres pour des peuplements de pins gris et d'érables à sucre.

**TABLEAU 9**  
**QUANTITÉS DE CARBONE SÉQUESTRE ANNUELLEMENT DANS LES DIVERSES PARTIES DES ARBRES POUR DES PEUPELEMENTS DE PINS GRIS ET D'ÉRABLES À SUCRE<sup>1</sup>**

{PRIVE }COMPOSANTES	FIXATION NETTE DE CARBONE (kg/ha/an)	
	Pinède à pins gris	Érablière
<b>Arbres</b>		
Biomasse ligneuse <sup>2</sup>	1 790	1 190
Feuillage	731	1 756
Fleurs et fruits	150	134
Racines fines	529	2 506
<b>Total pour les arbres</b>	<b>3 200</b>	<b>5 505</b>
Végétation secondaire	non disponible	75
<b>TOTAL FIXÉ</b>	<b>3 200</b>	<b>5 800</b>

1 - Adapté de Morrison *et al.*, 1993

2 - Basée sur la croissance brute

L'analyse des quantités de carbone séquestré annuellement par le pin gris et l'érable à sucre fait ressortir des différences marquées sur le plan de l'allocation du carbone pour ces deux espèces. Selon Mooney *et al.* (1990 dans Melillo *et al.*, 1990), l'accumulation de biomasse est spécifique à chaque espèce et est liée aux conditions environnementales. Dans un premier temps, l'érable à sucre fixe une quantité totale de carbone beaucoup plus importante que le pin gris mais ce dernier produit plus de

biomasse ligneuse, d'où une plus grande séquestration de carbone. L'érable à sucre produit moins de matière ligneuse car l'allocation du carbone favorise nettement les feuilles et les racines fines dont la durée de vie est d'une saison de croissance ou moins.

Cependant, l'érable à sucre est plus longévive que le pin gris donc sa biomasse ligneuse (tige, branches et grosses racines) constitue à long terme, un meilleur réservoir de carbone.

Morrison *et al.* (1993) indiquent que les quantités totales de carbone fixé par la végétation vont éventuellement retourner au sol sous forme de débris végétaux, de remplacement des racines et finalement d'arbres morts. Ils ont également constaté que durant la période de l'étude, la mortalité a été compensée par la croissance.

Les différences évidentes dans l'allocation du carbone pour les diverses espèces d'arbres sont un élément très important à considérer si l'on désire que les travaux sylvicoles choisis optimisent à la fois la production forestière et la séquestration du carbone dans l'écosystème forestier (plantes et sol).

#### 4.3.4 Le projet *Boreas* (Étude de l'atmosphère et des écosystèmes boréaux)

Des résultats préliminaires provenant du projet *Boreas*<sup>1</sup> indiquent que la capacité photosynthétique des forêts des basses terres de l'écosystème forestier boréal de la Saskatchewan et du Manitoba est considérablement moindre que les forêts tempérées plus au sud. Au printemps, la séquestration du carbone par les conifères est limitée par des sols gelés ou froids, et durant l'été, par des températures élevées et l'air sec. C'est durant l'automne que l'on a observé le plus important captage de CO<sub>2</sub> par les conifères alors que probablement les sols sont chauds et que la température et l'humidité de l'air sont plus favorables. Des mesures effectuées au niveau du feuillage semblent indiquer que la fin de la saison de végétation est induite par le gel. Les résultats ont aussi démontré que les stomates réduisent drastiquement la transpiration lorsque le feuillage est exposé à l'air sec même si l'eau du sol est facilement disponible. Ce mécanisme permet de maintenir le taux d'évapotranspiration constant et à un très faible niveau. Ces dernières données confirment que la forêt n'agit pas comme une surface où l'évaporation se fait librement contrairement à ce qui est considéré lors des simulations réalisées avec des modèles numériques de prédiction du climat. Les auteurs affirment donc que ces modèles surestiment l'évapotranspiration pour la région étudiée.

Tirer des conclusions sur le rôle de l'écosystème forestier dans le bilan global du carbone à partir de la documentation existante est un exercice risqué si on considère l'évolution rapide des connaissances scientifiques qui proviennent de la réalisation de projets de recherche de grande envergure actuellement en cours.

---

<sup>1</sup> Les informations sur le projet *Boreas* proviennent du site officiel de *Boreas* sur le réseau Internet

#### **4.3.5 La forêt et son rôle potentiel pour freiner l'augmentation de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone**

Bien que le rôle et l'importance des forêts dans le bilan global du carbone soient toujours l'objet d'études, il apparaît que ces dernières séquestrent du carbone durant leur croissance et qu'elles sont, à maturité, d'excellents réservoirs de carbone où les échanges avec l'atmosphère sont en équilibre. Quant au secteur forestier (biomasse végétale vivante, sols, produits forestiers, sites d'enfouissement sanitaires et tourbières), il serait un puits ou une source de carbone selon la fréquence et l'ampleur des perturbations naturelles qui affectent les forêts. La forêt et le secteur forestier pourraient peut-être constituer des éléments efficaces pour séquestrer une fraction plus ou moins importante du carbone émis par les activités humaines. Le reboisement de terres agricoles abandonnées, le remplacement de vieilles forêts par des jeunes forêts vigoureuses et l'augmentation de la croissance des arbres par la sylviculture sont autant d'options qui pourraient peut-être augmenter la fonction de puits de la forêt. Voici divers avis à ce sujet.

Delcourt et Harris (1980) indiquent que le bilan de carbone est affecté par les changements dans l'affectation des terres. En effet, le défrichage et la culture de sols riches en matière organique participent à l'augmentation de CO<sub>2</sub> atmosphérique à cause de l'oxydation de la matière ligneuse et de la matière organique du sol (Jarvis, 1989). Selon Jarvis (1989), ces processus ont été la principale cause de l'augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère avant 1900.

L'une des solutions qui semble prometteuse pour séquestrer du carbone est de freiner la déforestation, et même d'augmenter les superficies forestières. Waring et Schlesinger (1985) mentionnent que des changements de l'importance relative des surfaces forestières par rapport aux prairies herbacées vont influencer le carbone entreposé par le milieu terrestre, car les forêts immobilisent beaucoup plus de carbone par unité de surface que les prairies herbacées.

D'une part, le fait d'établir des forêts sur des terres agricoles abandonnées permet une accumulation nette de CO<sub>2</sub> (Delcourt et Harris, 1980). D'autre part, le reboisement des terres n'ayant pas supporté de forêts, ou dont les forêts ont disparu depuis

longtemps à la suite de la coupe des arbres, offre des opportunités intéressantes pour séquestrer du carbone. Cependant, il faut considérer la possibilité d'émissions de  $N_2O$  si la fertilisation s'avère nécessaire et de  $CO_2$  si on perturbe le sol (Cutter Information Corp., 1992).

Jarvis (1989) doute que l'expansion des forêts puisse réduire l'augmentation de la concentration atmosphérique de  $CO_2$ .

Selon Dixon *et al.* (1994), les pratiques d'aménagement forestier peuvent favoriser la conservation et la séquestration de carbone. On peut :

- maintenir les réservoirs actuels de carbone en diminuant la déforestation et la dégradation des forêts ;
- augmenter les puits et les réservoirs actuels de carbone par certaines pratiques sylvicoles ;
- créer de nouveaux puits et réservoirs de carbone en augmentant les surfaces forestières ;
- remplacer les combustibles fossiles par des carburants issus de la matière ligneuse donc provenant d'une source renouvelable.

Bien que les travaux sylvicoles visent à augmenter la productivité des forêts, tous n'ont pas un effet bénéfique sur la fonction de puits de la forêt. En effet, selon Dewar et Cannell (1992), pratiquer l'éclaircie réduit la quantité totale de carbone séquestré surtout dans le réservoir constitué par la litière durant la rotation et lors de la récolte. Karjalainen *et al.* (1995) indiquent que réaliser une éclaircie peut augmenter la décomposition de la litière et de l'humus et par le fait même, provoquer la libération de  $CO_2$  à un taux qui dépasse la séquestration des arbres résiduels s'ils ne sont pas en nombre suffisant. Dans cette optique, des recherches sont nécessaires pour évaluer si l'aménagement intensif des forêts va affecter la structure du sol, l'érosion, les débris ligneux, la disponibilité des éléments nutritifs et la séquestration du carbone sous la surface du sol (Cutter Information Corp., 1992) en plus du réservoir de carbone contenu dans la biomasse végétale.

La sylviculture, bien qu'elle augmente la productivité des forêts et des plantations existantes, ne contribue pas à augmenter la superficie des forêts et ce dernier facteur est le plus important si l'on veut contribuer de façon significative à une augmentation globale de la séquestration du carbone par les forêts (Winjum *et al.*, 1992). Cependant, augmenter le taux de séquestration du carbone dans les parties commerciales des forêts pourrait amener une augmentation du taux de séquestration du carbone dans l'écosystème forestier en entier (Cutter Information Corp., 1992).

Hoen et Solberg (1994) mentionnent que séquestrer du carbone dans la matière ligneuse peut être intéressant pour plusieurs raisons. En effet, si les changements climatiques provoqués par l'activité humaine se concrétisent, les augmentations du carbone séquestré dans le bois ou les produits forestiers vont avoir un effet positif, quoique marginal pour réduire les quantités de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Si le réchauffement de la planète est petit, une augmentation des stocks forestiers va vraisemblablement avoir un effet positif, du moins en tant que valeur commerciale. À ces gains s'ajoutent aussi des bénéfices comme la réduction de l'érosion, l'amélioration de la qualité de l'eau, l'augmentation de la biodiversité, de l'esthétique et du potentiel récréatif des nouvelles superficies forestières (Cutter Information Corp., 1992).

Selon la documentation scientifique :

- augmenter les superficies forestières en reboisant est le meilleur moyen d'augmenter la séquestration de carbone par les forêts ;
- augmenter la croissance des arbres par la sylviculture peut augmenter ou non la séquestration de carbone par la forêt.

#### 4.3.6 Le taux de récolte des forêts et le bilan carbone

La forêt sur pied et les produits forestiers constituent des réservoirs de carbone qui sont reliés. En effet, l'exploitation forestière soutire annuellement au réservoir de carbone de la forêt une certaine quantité de carbone qui s'ajoute en partie au réservoir de carbone des produits forestiers. La quantité de matière ligneuse qui est récoltée chaque année est déterminée par divers facteurs. Une étude réalisée en Finlande a évalué, entre autres, l'impact de diverses intensités de récolte sur les réservoirs de carbone de la forêt et des produits forestiers. Les résultats obtenus ont permis de déterminer le niveau idéal de récolte favorisant la séquestration maximale de carbone du secteur forestier.

Les auteurs de l'étude ont considéré que le réservoir de carbone de la forêt ne contenait que le bois de tige seulement. À ce dernier s'ajoutait le réservoir de carbone constitué par les produits forestiers. Trois scénarios de récolte ont été analysés pour la période de 1990 à 2039 (Tableau 10) :

- le scénario 1 repose sur un niveau de coupe constant qui demeure inférieur à la croissance de la forêt. Il en résulte donc un accroissement du stock forestier ;
- le scénario 2 permet de récolter annuellement tout le bois commercial ;
- le scénario 3 consiste à récolter le maximum de matière ligneuse tout en visant, à long terme, un équilibre entre la croissance et la récolte.

Pour les fins de l'exercice, les auteurs considèrent que la capacité de transformation des usines n'est pas limitée et que le réservoir de carbone des produits forestiers est de zéro au début de la simulation.



**TABLEAU 10**  
**DESCRIPTION DE TROIS SCÉNARIOS DE RÉCOLTE**  
**POUR LA PÉRIODE S'ÉCHELONNANT DE 1990 À 2039<sup>1</sup>**

{PRIVE }ANNÉE	CROISSANCE (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an)	RÉCOLTE (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an)	DIFFÉRENCE (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an)	STOCK FORESTIER (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an)
1985-1990	79	55	24	1880
<b>Scénario 1</b>				
1990-1999	85	59	26	2049
2000-2009	92	58	34	2390
2010-2019	106	60	46	2851
2020-2029	123	59	64	3494
2030-2039	136	56	79	4289
<b>Scénario 2</b>				
1990-1999	76	116	-40	1392
2000-2009	71	77	-6	1334
2010-2019	82	61	21	1547
2020-2029	102	68	34	1891
2030-2039	118	85	33	2220
<b>Scénario 3</b>				
1990-1999	83	76	7	1859
2000-2009	84	90	-6	1798
2010-2019	88	93	-5	1750
2020-2029	93	97	-4	1712
2030-2039	97	97	0	1720

1 - Adapté de Karjalainen *et al.*, 1995

Pour la période considérée, le réservoir de carbone dans le bois de tige a plus que doublé dans le scénario 1 alors qu'il a augmenté de 20 % dans le scénario 2 et a diminué de 6 % dans le scénario 3 (Tableau 10). Même si le scénario 3 amène une diminution du réservoir de carbone du secteur forêt, le bilan de carbone global (c'est-à-dire forêt et produits forestiers) est positif pour les trois scénarios (Tableau 11).

TABLEAU 11

**FLUX ET BILAN DE CARBONE POUR LE SECTEUR FORÊT, BILAN POUR LE SECTEUR DES PRODUITS FORESTIERS ET BILAN GLOBAL POUR LE SECTEUR FORESTIER<sup>1</sup>**

	<u>SCÉNARIO 1</u>	<u>SCÉNARIO 2</u>	<u>SCÉNARIO 3</u>
<b>A</b>			
Augmentation brute moyenne du réservoir de carbone du secteur forêt (croissance du bois de tige)(Tg C/an)	22,0	18,2	18,2
<b>B</b>			
Exploitation forestière (Tg C/an)	10,3	15,0	16,8
<b>C</b>			
Ajout annuel de litière au sol incluant la mortalité de tiges et les résidus de coupe ( <i>litterfall</i> ) (Tg C/an)	1,8	1,7	1,8
<b>D<sup>2</sup></b>			
Bilan moyen net du secteur forêt (Tg C/an)	9,9	1,5	-0,45
<b>E<sup>3</sup></b>			
Bilan moyen net du secteur produits forestiers (Tg C/an)	3,9	5,6	6,6
<b>F<sup>4</sup></b>			
Bilan moyen net total du secteur forestier (secteurs forêt et produits forestiers) (Tg C/an)	13,9	7,1	6,2

1 - Adapté de Karjalainen *et al.*, 1995

Un bilan net positif signifie que la composante est un puits qui ajoute annuellement du carbone au réservoir global et un bilan net négatif implique la libération de carbone vers l'atmosphère.

2 -  $D = A - (B + C)$

3 - Le bilan moyen net du secteur des produits forestiers comprend tous les flux qui affectent les produits forestiers comme le recyclage, la production d'énergie, l'enfouissement sanitaire, la décomposition.

4 -  $F = D + E$  ( Le secteur forestier, F, est constitué du secteur forêt, D, et du secteur des produits forestiers, E)

L'analyse de ce tableau indique qu'en moyenne pour la période étudiée, le bilan de carbone pour le secteur forêt (D) est influencé d'abord par l'intensité de l'exploitation forestière (B) et puis, dans une moindre mesure par l'accroissement de la forêt (A).

Lors de la récolte, la quantité moyenne de carbone exporté de la forêt et transformé en produits forestiers (exportation de la partie commerciale de l'arbre) a été de 10,3 Tg de carbone/an pour le scénario 1, de 15,0 Tg de carbone/an pour le scénario 2 et de 16,8 Tg de carbone/an pour le scénario 3. Ce flux de carbone de la forêt vers les produits forestiers se traduit par un bilan net positif pour les trois scénarios pour le secteur des produits forestiers (E).

Bien que le bilan global (F) soit positif pour les trois scénarios, le scénario 1 permet tout de même de séquestrer annuellement 13,9 Tg de carbone, ce qui est 95 % plus élevé que le 7,1 Tg de carbone du scénario 2 et 124 % supérieur au 6,2 Tg de carbone du scénario 3 et ce, malgré le fait que l'augmentation brute moyenne du secteur forêt ne soit que légèrement différente entre les scénarios (scénario 1 est 21 % plus élevé que scénarios 2 et 3). Le scénario 1, qui favorise le secteur forêt au détriment du secteur des produits forestiers, est donc celui qui en moyenne permet de séquestrer le plus de carbone. Karjalainen *et al.* (1995) rapportent que le carbone est séquestré plus efficacement dans la forêt que dans les produits forestiers. Le tableau 12 présente la répartition du carbone séquestré dans les divers secteurs.

TABLEAU 12

**RÉPARTITION DU CARBONE SÉQUESTRÉ ENTRE LES RÉSERVOIRS  
DU SECTEUR FORÊT ET DES PRODUITS FORESTIERS<sup>1</sup>**

{PRIVE }Scénario	Réservoir du secteur forêt (bois de tige seulement)	Réservoir des produits forestiers en circulation	Réservoir des produits forestiers dans les sites d'enfouissement
Scénario 1	81 %	13 %	6 %
Scénario 2	61 %	27 %	13 %
Scénario 3	51 %	35 %	14 %

1 - Adapté Karjalainen *et al.*, 1995

Donc, le fait de récolter la matière ligneuse à des intensités équivalentes et parfois supérieures à la croissance annuelle de la forêt et de la transformer en produits forestiers semble une stratégie moins intéressante pour séquestrer du carbone que de laisser s'accroître le stock forestier sur pied. Toutefois, il faut noter que la simulation couvre une période de 40 ans seulement.

Dans le même ordre d'idée, Cooper (1983) affirme que les forêts aménagées pour produire le maximum de biomasse à rendement soutenu contiennent une quantité moyenne de carbone (calculée pour la durée de la rotation) qui équivaut à environ le tiers du carbone qui serait séquestré si on permettait à la forêt non aménagée d'atteindre le maximum de biomasse. Des rotations financièrement optimales réduisent encore davantage la biomasse contenue dans cette forêt (le cinquième et moins). Ces résultats ont été obtenus à partir d'un modèle qui estime la séquestration du carbone dans le tronc, les branches et les grosses racines et qui considère aussi le carbone impliqué dans le renouvellement des feuilles, des racines fines et les débris ligneux après la récolte.

Selon la documentation :

- la forêt séquestre de façon plus efficace le carbone que les produits forestiers ce qui en fait un meilleur réservoir de carbone ;
- déterminer l'âge d'exploitation d'une forêt à partir de critères économiques provoque une sous utilisation de la forêt à remplir pleinement son rôle de réservoir de carbone.

### 4.3.7 Les produits forestiers et la séquestration de carbone

Selon Kozlowski *et al.* (1991) de 40 % à 50 % de la biomasse sèche des plantes est du carbone qui provient de la fixation de CO<sub>2</sub>. Selon Alexeyev *et al.* (1995), un coefficient de 0,5 (50%) permet de déterminer adéquatement le contenu en carbone de la plupart des espèces d'arbres forestiers et des plantes sous couvert. Les divers produits forestiers (papier, carton, bois d'oeuvre, etc.) sont donc des réservoirs de carbone, mais leur durée de vie est très variable.

Lorsque des arbres sont récoltés, un faible pourcentage de la biomasse totale est transformée. En effet, les branches et le tronc qui n'ont pas une dimension minimale demeurent en forêt ainsi que le feuillage, les racines et la souche. De plus, la fraction commerciale de l'arbre qui est exportée lors de l'exploitation forestière varie selon les espèces récoltées. Morrison *et al.* (1993) ont évalué, selon deux procédés de récolte, la quantité de carbone exporté pour trois peuplements différents (Tableau 13).

TABLEAU 13

QUANTITÉS DE CARBONE EXPORTÉ POUR TROIS PEUPELEMENTS FORESTIERS DIFFÉRENTS  
RÉCOLTÉS SELON DEUX PROCÉDÉS D'EXPLOITATION<sup>1</sup>

TYPE DE COUPE	QUANTITÉ DE CARBONE EXPORTÉ (kg/ha)		
	Pinède à pin gris	Pessière noire	Érablière
Tronc entier	52 900 (33%) <sup>2</sup>	51 500 (20%)	70 500 (20%)
Arbre entier	61 600 (38%)	68 600 (27%)	95 700 (27%)

1 - Adapté de Morrison *et al.*, 1993

2 - Les chiffres entre parenthèses représentent le pourcentage de biomasse exportée par rapport à la biomasse totale du peuplement (Tableau 8).

Lors de la récolte par tronc entier, l'ébranchage et l'étêtage des tiges se font sur le parterre de coupe, alors que la récolte par arbre entier permet de réaliser ces deux opérations sur le bord du chemin forestier où s'accumulent les débris ligneux. Dans les deux cas, les débris ligneux demeurent en forêt.

Cette étude permet aussi de démontrer que la partie commerciale de la tige qui sera acheminée aux usines correspond au maximum aux données présentées pour la récolte par tronc entier (tronc sans les branches ni les feuilles, prêt pour la transformation). C'est donc moins de 33 % (pinède à pins gris) et de 20 % (pessière noire et érablière) de la biomasse totale du peuplement qui pourra être transformée en produits forestiers (Tableau 8). Karjalainen et Kellomäki (1991, 1993 dans Karjalainen *et al.*, 1995) estiment que le bois de tige ne représente que 15 % du carbone séquestré dans les forêts finlandaises et que les autres composantes végétales comptent pour 11 %. L'humus et la couche organique à la surface du sol s'approprient 73 % du réservoir de carbone alors que la végétation au sol ne contient que 1 % du total. La fraction de la tige qui deviendra éventuellement un produit forestier dépend du produit en question. Une étude finlandaise indiquent que 43,5 % et 38,4 % de la tige récoltée devient après transformation du bois de construction ou du contreplaqué respectivement (Karjalainen *et al.*, 1995). Un autre paramètre relié au type de produits forestiers est le temps qui s'écoule entre l'abattage de la tige et le début de la décomposition d'une part, et le temps requis pour la décomposition complète du produit d'autre part. Ces données permettent de déterminer combien de temps un produit forestier quelconque est un réservoir de carbone et à partir de quel moment et pendant combien de temps il est une source de CO<sub>2</sub> (Tableau 14).

Dixon *et al.* (1994) fait remarquer que le réservoir de carbone constitué par les produits forestiers durables (maison, ameublement) ne représente qu'une partie insignifiante du réservoir global total. En effet, la production globale totale de produits forestiers des 30 dernières années ne représente que 20Pg de carbone (petagrammes), ce qui est peu à comparer aux réservoirs globaux totaux qui sont de 359 PgC et de 787 PgC pour la végétation et les sols respectivement (Dixon *et al.*, 1994).

TABLEAU 14

**PÉRIODES DE TEMPS DURANT LESQUELLES DIVERS PRODUITS FORESTIERS  
SONT DES RÉSERVOIRS ET DES SOURCES DE CARBONE<sup>1</sup>**

Produit final après transformation	Temps écoulé entre l'abattage et le début de la décomposition (année)		Temps requis pour la décomposition complète du bois (année)	
	Pin/Épinette	Bouleau	Pin/Épinette	Bouleau
Écorces dans les sites d'enfouissement	0	0	8	8
Écorces en tant que sources d'énergie	0	0	1	1
Feuillage	0	0	11	7
Branches + tiges+ souches	0	0	100	100
Système racinaire	0	0	12	12
Bois de construction	80	80	80	80
Meubles et produits d'intérieur	20	20	50	50
Bois imprégnés	40	40	30	30
Pallettes	2	2	23	23
Pertes	0	0	1	1
Contreplaqué, panneaux composites	17	17	33	33
Bran de scie	1	1	2	2
Pâtes et papiers	1	1	2	2
Bois de chauffage	0	0	1	1

1 - Adapté de Hoen et Solberg, 1994

Les produits forestiers constituent des réservoirs de carbone pour une période variable puis, ils deviennent des sources de carbone lorsque débute leur décomposition. Dans tous les cas, ce réservoir ne représente qu'une fraction négligeable des réservoirs globaux formés par la végétation vivante et le sol.

## 5. LES MODÈLES

Pour déterminer le rôle des forêts dans le bilan global du carbone, il faut estimer les effets des variations environnementales et biologiques sur les flux de carbone dans les écosystèmes forestiers. Les estimations empiriques, bien que très utiles, ne sont pas suffisantes pour établir des prédictions. Les modèles qui sont basés sur les flux et les bilans du carbone des écosystèmes seront essentiels pour prédire les changements au niveau des plants et des communautés végétales à l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>.

Actuellement, la plupart des modèles sont conçus pour des conditions uniformes, mais puisque les forêts ne sont pas uniformes, des problèmes d'hétérogénéité surgissent en plus des mises à l'échelle des modèles pour des grandes superficies (Landsberg *et al.*, 1991). Puisque les dispositifs expérimentaux visant à déterminer l'effet de l'augmentation de CO<sub>2</sub> sur les forêts ne sont pas physiquement possibles, il faut recourir à des tests qui se concentrent sur des feuilles ou des petites plantes pendant des périodes variant de courtes à longues ou à des tests qui ont permis d'exposer des arbres en entier pendant de courtes périodes (Wong et Dunin, 1987 dans Jarvis, 1989). La mise à l'échelle des résultats de ces expériences à des forêts ou même à des peuplements commerciaux est très difficile (Jarvis, 1989). C'est ainsi que la mesure ponctuelle de la photosynthèse sur des bouts de tiges ou des feuilles individuelles renseigne très peu sur la production de biomasse d'arbres ou de peuplements (Kozlowski *et al.*, 1991).

Établir le bilan de carbone est très difficile, car plusieurs variables sont difficiles à mesurer comme entre autres, la photosynthèse et la respiration sur le terrain, la production de racines fines et la respiration de ces racines (difficile de séparer les respirations autotrophe et hétérotrophe). Même quand des mesures sont possibles, elles sont habituellement faites sur des petits échantillons, ce qui fait que la mise à l'échelle, temps et espace, est très difficile (Ryan, 1991).

Les modèles utilisés pour prédire la réaction de la forêt à l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> se basent sur des mesures de processus et de variables faites sur des peuplements exposés au taux actuel de CO<sub>2</sub> et sur des mesures faites sur des semis ou de jeunes arbres acclimatés à des concentrations élevées de



CO<sub>2</sub> dans un environnement artificiel (Jarvis, 1989). Peu de plantes provenant de semences formées à des concentrations élevées de CO<sub>2</sub> ont été cultivées et aucune n'a été cultivée sur plusieurs générations à une concentration double de celle d'aujourd'hui. De même, il est fort probable qu'aucune expérience n'a été faite, ou la réponse des plantes au CO<sub>2</sub> quantifiée, avec des plantes qui sont acclimatées à des concentrations élevées de CO<sub>2</sub>. Au mieux, les plantes exposées pendant quelques semaines ou quelques mois à des concentrations élevées de CO<sub>2</sub> sont probablement acclimatées surtout dans le cas de certains organes, mais elles sont sans doute encore en phase d'acclimatation si on considère la plante entière comme un tout. Les populations naturelles où plusieurs générations se sont succédées durant les 100 dernières années, se sont vraisemblablement adaptées génétiquement à l'augmentation atmosphérique de CO<sub>2</sub> par des sélections progressives. Cependant, ceci est probablement moins vrai pour les forêts où il y a eu une ou deux générations durant cette même période de temps. La littérature scientifique ne mentionne pas ces éléments qui distinguent les réponses physiologiques immédiates, les réponses qui évoluent à cause de l'acclimatation et les réponses qui résultent de la sélection des génotypes les mieux adaptés sur plusieurs générations (Jarvis, 1989). Ces différences sont pourtant importantes à considérer, car il est probable que des processus différents soient impliqués.

Il est très important que les modèles qui permettent d'établir le bilan de carbone soient basés sur des processus physiologiques, car durant les prochaines décennies, les arbres seront exposés à des changements non seulement de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> mais aussi peut-être à des variations extrêmes de température ou de pluviométrie. Bien que des études à court terme aient statué sur les effets de l'augmentation de CO<sub>2</sub> sur la croissance de semis forestiers ou d'autres plantes, il demeure que la réponse des arbres et des forêts à des concentrations élevées de CO<sub>2</sub> et aux changements climatiques qui y sont potentiellement associés reste à définir.

## CONCLUSION

Bien que plusieurs avis scientifiques aient été émis depuis plus d'une décennie sur le rôle des forêts dans le cycle global du carbone, des incertitudes demeurent et les travaux en cours révèlent des éléments nouveaux qui contredisent quelquefois des hypothèses qui étaient considérées récemment très valables. Il semble toutefois se dégager quelques pistes qui peuvent guider les responsables de la gestion des forêts pour que les écosystèmes forestiers (sol-plantes) puissent conserver leur rôle de réservoir de carbone et même pour une période définie devenir des puits de carbone. En effet, selon la documentation :

- les jeunes forêts en croissance sont des puits de carbone ;
- les forêts matures sont des réservoirs de carbone dont les échanges de CO<sub>2</sub> avec l'atmosphère sont en équilibre ;
- les écosystèmes forestiers séquestrent beaucoup plus de carbone par unité de surface que la plupart des autres écosystèmes terrestres ;
- la fréquence et l'ampleur des perturbations naturelles peuvent affecter grandement le réservoir de carbone des écosystèmes forestiers ;
- la forêt séquestre de façon plus efficace le carbone que les produits forestiers ce qui en fait un meilleur réservoir de carbone ;
- le taux annuel de récolte, les pratiques sylvicoles et le reboisement des terres agricoles abandonnées peuvent influencer le rôle des forêts en tant que puits ou source de carbone.

Considérant les énoncés ci-haut, il serait intéressant de savoir si au Québec nous favorisons la fonction de puits ou de source de nos forêts.

Pour ce faire, il faudrait d'abord connaître, à partir d'études de peuplements représentatifs, les flux et les réservoirs de carbone des multiples types de forêts qui couvrent notre territoire. En effet, les forêts feuillues n'évoluent pas de façon identique aux peuplements résineux et les caractéristiques des espèces (longévité, allocation du carbone, etc.) qui les composent sont très différentes. Une fois les flux et les réservoirs quantifiés pour des forêts non aménagées, il serait pertinent d'évaluer les effets de nos pratiques sylvicoles sur le bilan de carbone des divers peuplements. Un autre point important à considérer est l'âge choisi pour récolter par coupe totale les peuplements équiennes. Il serait intéressant d'évaluer si nos pratiques actuelles favorisent ou non la séquestration et la conservation du carbone dans l'écosystème forestier.

Le reboisement des terres agricoles abandonnées pour augmenter les superficies forestières peut également servir à constituer de nouveaux réservoirs de carbone pour une période plus ou moins longue, selon la longévité et la croissance des espèces reboisées. Cependant, pour optimiser la séquestration du carbone, il faut considérer que le choix des espèces et la possibilité de les cultiver sur de courtes rotations, ou au contraire d'établir des espèces nobles longévives, auront un impact sur le bilan du carbone des superficies reboisées.

Gérer et aménager les forêts en optimisant, entre autres, la séquestration et la conservation du carbone est actuellement un défi majeur qui requiert des connaissances fondamentales sur le développement des écosystèmes forestiers.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALEXEYEV, V., R. BIRDSEY, V. STAKANOV et I. KOROTKOV, 1995. " Carbon in Vegetation of Russian Forests : Methods to Estimate Storage and Geographical Distribution " dans *Boreal Forests and Global Change*, Netherland, International Boreal Forest Research Association, Kluwer Academic Publishers, p. 271-282.
- CHUNG, H.H. et R.L. BARNES, 1977 dans Waring et Schlesinger, 1985.
- COOPER, C.F., 1983. \* Carbon Storage in Managed Forests + dans *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 13, p.155-166.
- CUTTER INFORMATION CORP., 1992. *Changing by degrees : Step to reduce greenhouse gases*, Arlington, MA, 370 p.
- DELCOURT, H.R. et W.F. HARRIS, 1980. \* Carbon Budget of the Southeastern U.S. Biota: Analysis of Historical Change in Trend from Source to Sink + dans *Science*, vol. 210, p. 321-322.
- DEWAR, R.C., 1991. \* Analytical Model of Carbon Storage in the Trees, Soils, and Wood Products of Managed Forests + dans *Tree Physiology*, vol. 8, p. 239-258.
- DEWAR, R.C. et M.G.R. CANNELL, 1992. \* Carbon Sequestration in the Trees, Products and Soils of Forest Plantations: an Analysis Using UK Examples + dans *Tree Physiology*, vol. 11, p. 49-71.
- DIXON, R.K., S. BROWN, R.A. HOUGHTON, A.M. SOLOMON, M.C. TREXLER et J. WISNIEWSKI, 1994. \* Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems + dans *Science*, vol. 263, p. 186-190.
- DOUGHERTY, P.M., R.O. TESKEY, J.E. PHELPS et T.M. HINCKLEY, 1979 dans Kozlowski *et al.*, 1991.
- HARMON, M.E., W.K. FERRELL et J.E. FRANKLIN, 1990. \* Effects on Carbon Storage of Conversion of Old-Growth Forests to Young Forests + dans *Science*, vol. 247, p. 699-702.
- HOEN, H.F. et B. SOLBERG, 1994. \* Potential and Economic Efficiency of Carbon Sequestration in Forest Biomass Through Silvicultural Management + dans *Forest Science*, 40(3), p. 429-451.
- HOUGHTON, J.T., L.G. MEIRA FILHO, J. BRUCE, H. LEE, B.A. CALLANDER, E. HAITES, N. HARRIS et K. MASKELL, 1995. *Climate Change 1994 : Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, Grant Britain, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press, 339 p.
- JARVIS, P.G., 1989. \* Atmospheric Carbon Dioxide and Forests + dans *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B*, vol. 324, p. 369-392.

- KARJALAINEN, T. et S. KELLOMÄKI, 1991 dans Karjalainen, Kellomäki et Pussinen, 1995.
- KARJALAINEN, T. et S. KELLOMÄKI, 1993 dans Karjalainen, Kellomäki et Pussinen 1995.
- KARJALAINEN, T. , S. KELLOMÄKI et A. PUSSINEN, 1995. \* Carbon Balance in the Forest Sector in Finland During 1990-2039 + dans *Climatic Change* 30, p. 451-478.
- KEELING, C.D. *et al.*, 1989a dans Vitousek, 1994.
- KOZLOWSKI, T.T., P.J. KRAMER et S.G. PALLARDY, 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*, San Diego, California, Academic Press, inc. 657 p.
- KRAMER P.J., 1981. \* Carbon Dioxide Concentration, Photosynthesis, and Dry Matter Production+ dans *BioScience*, vol. 31, p. 29-33..
- KURZ, W.A et M.J. APPS, 1996. \* Retrospective Assessment of Carbon Flows on Canadian Boreal Forests + dans *Forest Ecosystems. Forest Management and the Global Carbon Cycle*, MJ Apps et DT Price (Eds), NATO ASI Series 1: Global Environmental Change, Springer-Verlag, Heidelberg, s.p.
- KURZ, W.A, M.J. APPS, T.M. WEBB et P.J. McNAMEE, 1992. *The Carbon Budget of the Canadian Forest Sector : phase 1*, Alberta, Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Information Report NOR-X-326, 93 p.
- LANDSBERG J.J., M.R. KAUFMANN, D. BINKLEY, J. ISEBRANDS et P.G. JARVIS, 1991. \* Evaluating Progress Toward Closed Forest Models Based on Fluxes of Carbon, Water and Nutrients + dans *Tree physiology*, 9(1-2), p. 1-15.
- MELLILO, J.M. *et al.*, 1988 dans MELILLO *et al.*, 1990.
- MELLILO, J.M., T.V. CALLAGHAN, F.I. WOODWARD, E. SALATI et S.K. SINHA, 1990. \* Effects on Ecosystems + dans *Climate change. The IPCC Scientific Assessment*, Grant Britain, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press, p. 283-310.
- MOONEY, H.A. *et al.*, 1990 dans Melillo *et al.*, 1990.
- MORRISON, I.K., N.W. FOSTER et P.W. HAZLETT, 1993. \* Carbon Reserves, Carbon Cycling, and Harvesting Effects in Three Mature Forest Types in Canada + dans *New Zealand Journal of Forestry Science*, 23(3), p. 403-412.
- NELSON, N.D., 1984. \* Woody Plants are not Inherently Low in Photosynthetic Capacity + dans *Photosynthetica*, 18(4), p. 600-605.
- PAEMBONA, S.A., A. HAGIHARA et K. HOZUMI, 1992. \* Long-Term Respiration in Relation to Growth and Maintenance Processes of the Aboveground Parts of a Hinoki Forest Tree + dans *Tree Physiology*, vol. 10, p. 101-110.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., 1975 dans Waring et Schlesinger, 1985.
- RYAN, G.M., 1991. \* A Simple Method for Estimating Gross Carbon Budgets for Vegetation in Forest Ecosystems + dans *Tree Physiology*, 9 (1-2), p. 255-266.

- SALISBURY, F.B. et C.W. ROSS, 1978. *Plant Physiology 2nd ed.*, Belmont, California, Wadsworth Publ. Co., 657 p.
- SCHIMEL, D., I.G. ENTING, M. HEIMANN, T.M.L. WIGLEY, D. RAYNAUD, D. ALVES et U. SIEGENTHALER, 1995. \* CO<sub>2</sub> and the Carbon Cycle + dans *Climate Change 1994 : Radiative forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, Grant Britain, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press, p. 35-71.
- VITOUSEK, P.M., 1994. \* Beyond Global Warming: Ecology and Global Change + dans *Ecology*, 75(7), p. 1861-1876.
- WARING, R.H. et W.H. SCHLESINGER, 1985. *Forest Ecosystems: Concepts and Management*, Academic Press, Orlando, Florida, 340p.
- WATSON, R.T., H. RODHE, H. OESCHGER et U. SIEGENTHALER, 1990. \* Greenhouse gases and aerosols + dans *Climate Change : The IPCC Scientific Assessment*, Grant Britain, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press, p. 1-40.
- WINJUM, J.K., R.K. DIXON et P.E. SCHROEDER, 1992. \* Estimating the Global Potential of Forest and Agroforest Management Practices to Sequester Carbon + dans *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 64, p. 213-227.
- WOING, S.C. et F.X. DUNIN, 1987 dans Jarvis, 1989.

## **ANNEXE**

**UNITÉS DU SYSTÈME INTERNATIONAL<sup>1</sup>**

<b>SYMBOLE</b>	<b>ÉQUIVALENCE</b>
t	1 000 kg
M	$10^6$
G	$10^9$
T	$10^{12}$
P	$10^{15}$

1 - Adapté de Houghton *et al.*, 1995