

Décomposition de la litière, biomasse et abondance d'éléments nutritifs dans des forêts de sapins baumiers de l'Ouest de Terre-Neuve

par

M.T. Moroni, C.M. Smeaton^a et B. Pike

Rapport d'information M-X-217F

^a Sir Wilfred Grenfell College, Memorial University of Newfoundland,
University Drive, Corner Brook (T.-N.) A2H 6P9

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts -
Centre de foresterie de l'Atlantique
C.P. 960, Corner Brook, (T.-N.) A2H 6P9
CANADA

2005

© Sa majesté la Reine du Chef du Canada 2005

ISSN 1195-3799
ISBN 0-662-79544-X
N° de catalogue Fo46-19/217F

Un nombre restreint d'exemplaires de cette publication peut être obtenu sans frais à l'adresse suivante :

Service canadien des forêts - Centre de foresterie de l'Atlantique
C.P. 4000
Fredericton (N.-B.) Canada E3B 5P7
Tél. : (506) 452-3500
Télec. : (506) 452-3525

Des microfiches ou des copies de cette publication sont en vente chez :

Micromédia ltée.
240, rue Catherine, bur. 305
Ottawa (ON) K2P 2G8
Tél. : (613) 237-4250
Ligne sans frais : 1-800-567-1914
Télec. : (613) 237-4251

This publication is available in English upon request.

Rédaction, dessin, et production : Caroline Simpson ELS

Résumé

Nous avons estimé la biomasse du sapin baumier dans des stations de qualité bonne, moyenne et médiocre, selon la classification des types forestiers de Damman, qui représentaient une chronoséquence de 0 à plus de 90 ans. En général, les stations bonnes et moyennes en produisaient davantage que les stations médiocres. Nous avons mesuré après 1 et 2 ans, dans des stations bonnes et médiocres de 0 à 5 ans (parterres de coupe à blanc) et de 30 à 40 ans, la décomposition de différents types de litière, entre autres : aiguilles de sapin baumier, racines fines, tiges d'herbacées, feuilles de plantes arbustives, mousses et couche organique. Les différences entre les stations pour la vitesse de décomposition varient selon le type de tissu sans qu'aucune tendance générale ne se dégage quant à un effet positif ou négatif de l'âge ou de la qualité des stations. Néanmoins, la décomposition de la litière a été significativement plus intense au cours de la première année. Les tiges des herbacées et les feuilles des plantes arbustives se sont décomposées le plus rapidement; les ramilles des plantes arbustives, le plus lentement. La décomposition du bois, des branches et des grosses racines du sapin baumier n'a été mesurée qu'après trois ans au sol. Les branches se sont décomposées significativement plus rapidement que le bois et les grosses racines, le classement de ces tissus étant comme suit : station médiocre récemment déboisée > station bonne récemment déboisée > station bonne de 30-40 ans > station médiocre de 30-40 ans. Nous avons mesuré les teneurs en azote et en phosphore des tissus de l'étage supérieur et du sous-étage dans une station bonne et une station médiocre de 30 à 40 ans. Dans le cas de l'azote, les tissus de l'étage supérieur, du sous-étage et de la couverture morte de la station médiocre en contenaient toujours moins que ceux de la bonne station, ce qui indiquerait que la première était carencée en azote. Pour l'azote, aucune tendance générale en fonction de la qualité des stations n'a été mise en évidence.

Mots clés : Azote, phosphore, biomasse, feuilles, végétation arbustive, racines, mousses, bois, branches, qualité de station, Damman.

Summary

Balsam fir biomass was estimated in a chronosequence, aged 0–>90 years, each within sites of good, medium, and poor quality, based on the Damman forest type classification system. Good and medium sites generally produced greater biomass than poor sites. Within good and poor quality sites aged 0–5 (clearcut) and 30–40 years, litter decomposition of balsam fir foliage, fine roots, herb shoots, shrub foliage, moss, and organic layer was measured after 1 and 2 years. Differences in decomposition between the good and poor sites, and between the clearcuts and the 30- to 40-year-old sites, varied with tissue type; there was no consistent trend in increased or decreased rates of decomposition with site quality or forest age. Litter decomposition was significantly higher in the first year; herb shoots and shrub foliage decomposed fastest, shrub twigs slowest. Balsam fir wood, branch, and coarse root decomposition was measured after 3 years only. Branch material decomposed significantly faster than wood or coarse root material, and rates of decomposition between sites for these tissues ranked: poor clearcut > good clearcut > good 30- to 40-year-old site > poor 30- to 40-year-old site. Overstorey and understorey tissue N and P concentrations were examined within a good and a poor 30- to 40-year-old site. Concentrations of N in overstorey, understorey, and forest floor tissue within the poor site were consistently lower than concentrations within the good site, indicating that the poor site was N deficient. There was no consistent trend with site quality for tissue P contents.

Keywords: biomass, branch, Damman, foliage, moss, nitrogen, phosphorous, root, shrub, site quality, wood

Table des matières

	Page
Introduction	7
Materiel et méthodes.....	9
Stations d'étude.....	9
Biomasse aérienne	9
Échantillonnage des tissus	10
Décomposition des tissus.....	10
Analyse statistique	11
Résultats	12
Décomposition	12
<i>Biomasse et teneur en éléments nutritifs des tissus du sapin baumier.....</i>	<i>15</i>
Discussion	16
Remerciements	19
Bibliographie.....	20



Introduction

Au cours des années 1970 et 1980, des données ont été recueillies dans toutes les parties du Canada sur la biomasse de l'étage supérieur, sur les teneurs en azote et en phosphore de tissus de l'étage supérieur et du sous-étage et sur la décomposition de ces tissus pour élaborer le modèle informatique de simulation FORCYTE (*Forest Cycling Trend Evaluator*, ou évaluateur des tendances des cycles forestiers) devant servir à examiner les conséquences à long terme de la récolte forestière intensive sur le stock d'éléments nutritifs et la productivité forestière (Kimmins et Scoullar, 1979). À Terre-Neuve, ces données ont été obtenues dans des chronoséquences de peuplements de sapins baumiers poussant dans des stations de qualité bonne, moyenne et médiocre, selon le système de classification des stations forestières de Damman (Damman, 1967). Ce système de classification écologique est basé sur les caractéristiques du sous-étage et le type de sol, deux indicateurs de la fertilité d'un site et de son potentiel pour la croissance des arbres (Damman, 1967; Meades et Moores, 1984). Le service des forêts de Terre-Neuve-et-Labrador (T.-N.-L.) souhaite aménager les forêts de la province de manière écologique en utilisant le système de classification de Damman comme référence pour identifier et délimiter les types écologiques forestiers (Moores *et coll.*, 1996). Toutes les études déjà publiées qui ont examiné les types forestiers de Damman ont concentré leur attention sur les forêts mûres, et aucune ne s'est intéressée à la décomposition de la litière en fonction du type de station de Damman. Peu de données ont été publiées sur les vitesses de décomposition des tissus dans les forêts de sapins baumiers, en particulier dans les peuplements récemment récoltés, et peu d'études se sont intéressées à la décomposition des mousses et des composantes du sous-étage dans les forêts boréales. Dans ce contexte, nos données contribueront à améliorer les connaissances sur la croissance et la décomposition forestières, en particulier sur l'influence du type forestier de Damman sur ces processus, aideront à l'aménagement écologique des forêts de sapins baumiers.

Dans la majorité des forêts boréales, le sapin baumier est une essence de fin de succession (Thompson *et coll.*, 2003). Sur la côte ouest de Terre-Neuve, il représente le type forestier dominant. La possibilité annuelle de coupe du sapin baumier dans l'île de Terre-Neuve s'élève à environ un million de mètres cubes, ce qui représente la moitié de la possibilité annuelle totale, le reste étant fourni par l'épinette noire (Ministère des Ressources forestières et des agrialiments de T.-N. 1996). Les forêts boréales renferment d'immenses réservoirs de carbone organique (C) dans les tissus vivants et morts (Kurz et Apps, 1999) qui échangent d'importantes quantités de carbone, en majeure partie sous la forme de CO₂, avec l'atmosphère par des mécanismes qui sont sensibles à l'aménagement des forêts (Schimel, 1995; Trofymow *et coll.*, 2002). En conséquence, il y a de plus en plus de pression pour que les forêts soient aménagées de manière à maximiser la production de fibres tout en limitant la libération de carbone dans l'atmosphère.

La décomposition de la litière est un processus très important des écosystèmes. Elle libère du CO₂ dans l'atmosphère, régule le transfert de carbone et d'éléments nutritifs dans le sol et détermine, par conséquent, la quantité disponible d'éléments nutritifs. La décomposition détermine également l'accumulation des matières végétales tombées au sol, laquelle représente à la fois un habitat pour certaines espèces et aussi un combustible.

Par ailleurs, la décomposition est fortement influencée par les conditions climatiques et la qualité de la litière (Aber *et coll.*, 1990; Almendros *et coll.*, 2000; Sanger *et coll.*, 1998; Moore *et coll.*, 1999). L'effet de la qualité de la litière, qui dépend beaucoup du type de tissu, est peu prononcé au cours des premières années de décomposition (Trofymow *et coll.*, 2002). Les études sur la décomposition dans les forêts ont porté principalement sur les composantes aériennes des arbres, comme le feuillage, l'écorce, les branches et le bois. Beaucoup moins d'études ont examiné la décomposition des racines, des mousses et de la végétation arbustive et herbacée du sous-étage, en dépit du fait que ces composantes représentent une large partie de la biomasse vivante. Par exemple, dans les forêts boréales où il est possible que les racines fines, ou radicelles, fournissent une plus large part du carbone du sol que la biomasse aérienne (Vogt *et coll.*, 1996), un pourcentage élevé de la productivité primaire nette leur est attribué (Agren *et coll.*, 1980; Grier *et coll.*, 1981; Keyes et Grier, 1981). Les mousses y sont également abondantes, se présentant souvent en épaisses couches au sol. Par exemple, dans des pessières noires mûres du transect nord de BOREAS, des teneurs similaires en carbone ont été mesurées pour les mousses vivantes et les composantes de l'étage supérieur (Harden *et coll.*, 1997). Au Québec, dans des peuplements non éclaircis d'épinettes noires, on a trouvé des couches de mousses vertes dont la masse atteignait 1 280 à 1 310 kg/ha et dont la production de biomasse correspondait à 33 à 50 % de celle des feuilles et des tiges de l'étage supérieur, et ce, avec un prélèvement annuel d'éléments nutritifs équivalant à 23 à 53 % de celui de l'étage supérieur (Weetman et Timmer, 1967). Il existe beaucoup d'études sur la décomposition des mousses dans les tourbières (ex. : Hobbie, 1996; Szumigalski et Bayley, 1996), mais peu sur leur décomposition dans les forêts. Pour offrir un bilan complet de la décomposition dans les forêts, il est essentiel de bien comprendre la dynamique de la décomposition non seulement des matières de l'étage supérieur mais aussi de celles du sous-étage et de la couverture morte.

L'abondance des éléments nutritifs est un facteur important de la croissance des arbres et de la classification des types forestiers de Damman (Damman, 1967). La pauvreté en azote, en particulier, limite souvent la croissance des forêts, par exemple au Nouveau-Brunswick (Krause, 1981) et à Terre-Neuve (van Nostrand, 1979). La teneur en azote et en phosphore des tissus est aussi un indicateur de leur qualité pour la décomposition (Berg, 1984), la vitesse initiale de décomposition étant supérieure pour les tissus riches en éléments nutritifs. On s'attend donc à ce que les teneurs en azote et en phosphore des tissus de l'étage supérieur et du sous-étage et les vitesses de décomposition de la litière soient plus faibles dans les stations de qualité médiocre, ou plus pauvres.

Les objectifs de cette étude sont : (1) examiner dans des stations forestières bonnes et médiocres récemment coupées à blanc et de 30 à 40 ans la décomposition de plusieurs types de tissus (feuillage d'arbres, feuillage de plantes arbustives, ramilles de plantes arbustives, tiges d'herbacées, tiges de mousses, couche organique, racines fines, grosses racines, bois et branches); (2) examiner la biomasse forestière dans une chronoséquence de stations forestières de bonne, moyenne et médiocre qualité de 0 à plus de 90 ans; (3) examiner dans une station bonne et une station médiocre de 30 à 40 ans les teneurs en azote et en phosphore de tissus de l'étage supérieur, du sous-étage et de la couverture morte.

Matériel et méthodes

Stations d'étude

Dix-huit stations dans la forêt de sapins baumiers de l'écorégion de l'Ouest de Terre-Neuve (Damman, 1983), sur un territoire délimité par les coordonnées suivantes, ont été choisies pour l'étude : 58°25' N et 48°75' O; 58°20' N et 48°50' O; 57°20' N et 49°22' O; 57°50' N et 49°15' O. Ces stations se caractérisent par une température annuelle moyenne de 3,0 à 5,1°C et une hauteur annuelle des précipitations variant de 987 à 1 352 mm. Pour chacune des six classes d'âge considérées (0–5 [parterre de coupe à blanc], 8–12, 18–25, 30–40, 40–50 et > 90 ans), une station de chaque qualité (bonne, moyenne et médiocre) a été choisie. Même si la classification de la qualité des stations de Damman repose principalement sur la végétation du sous-étage et le type de sol, plutôt que sur la croissance forestière, elle donne une indication du potentiel de croissance forestière (Damman, 1967; Meades et Moores, 1984). Les bonnes stations se caractérisent par une strate arbustive dominante riche en herbacées. La strate arbustive de nos bonnes stations était dominée par *Acer spicatum*, et la strate herbacée était constituée de *Rubus pubescens*, *Gallium triflorum*, *Cinna latifolia*, *Cornus stolonifera* et *Viola incognita*. Les stations de qualité moyenne étaient généralement colonisées par des fougères, dominées par *Dryopteris spinulosa* var. *americana*, présentaient une strate muscinale à hypnacées (dominée par *Pleurozium schreberi*), mais comptaient peu d'arbustes des espèces *Acer spicatum* et *Betula lutea*. Les stations médiocres se caractérisaient par un sous-étage dominé par les mousses, consistant principalement en *Pleurozium schreberi* avec quelques *Hylocomium splendens* (Damman, 1967; Meades et Moores, 1984). La couche organique dans les stations d'étude mesurait généralement 10 à 15 cm d'épaisseur. La biomasse des sapins baumiers a été déterminée dans une station de chaque qualité pour chaque classe d'âge. La décomposition de la litière a été mesurée dans les stations bonnes et médiocres de deux classes d'âge : parterres de coupe à blanc et peuplements de 30 à 40 ans. Les teneurs en éléments nutritifs de l'étage supérieur et du sous-étage ont été déterminées dans une station bonne et une station médiocre de 30 à 40 ans.

Biomasse aérienne

La biomasse aérienne a été estimée dans une station pour chaque combinaison qualité-classe d'âge en appliquant la méthode des quadrants centrés sur le point (Cottam et Curtis, 1956). Les distances de l'arbre dominant et le plus près à partir des points choisis au hasard, et les hauteurs et diamètres à hauteur de poitrine (1,3 m) des arbres, de concert avec des équations de régression de la biomasse (Lavigne, 1982), ont été utilisées pour estimer la biomasse aérienne et la densité de peuplement. Dans le cas des quadrants dépourvus d'arbres, un facteur de correction décrit par Warde et Petranke (1981) a été appliqué.

Échantillonnage des tissus

Des échantillons de tissus ont été prélevés dans les parties aériennes de la végétation de l'étage supérieur et du sous-étage selon la méthode des quadrants centrés sur le point (Cottam et Curtis, 1956) pour l'analyse des éléments nutritifs et l'étude de la décomposition en juin 1985. Dans chaque station, un transect de 100 m, à origine et direction aléatoires, a été choisi et, sur ce transect, 10 placettes d'échantillonnage circulaires, à rayon de 0,56 m, ont été établies autour de points situés à des intervalles de 10 m. Dans ces placettes, les parties aériennes des arbustes, arbrisseaux, herbacées et semis, ainsi que la litière, ont été prélevées, puis ont ensuite été séchées et pesées. Les couches musculaire et organique ont été échantillonnées dans une sous-placette de 25 sur 25 cm établie dans chacune des placettes à rayon de 0,56 m. La couche organique a été échantillonnée jusqu'à la surface supérieure du sol minéral, et les petites racines (diamètre $\leq 2,0$ mm) ont été séparées de la matière organique. Aux fins de l'étude de la décomposition, le feuillage du sapin baumier a été échantillonné à l'aide de pièges à litière installés dans des peuplements mûrs au cours de l'été 1984. Dans chacune des stations bonne et médiocre de 30 à 40 ans, 15 arbres ont été abattus et échantillonnés pour déterminer les teneurs en azote et en phosphore du feuillage de l'année et de sept ans (les plus vieilles aiguilles vivantes). Le feuillage de l'année a été prélevé dans les portions supérieure, moyenne et inférieure du houppier, y compris la pousse apicale et les pousses latérales. Le feuillage de sept ans a été prélevé dans toutes les parties du houppier. Dans 5 des 15 arbres, des échantillons des branches (de l'année, les plus vieilles et mortes), de l'aubier, du bois parfait et de l'écorce ont également été prélevés. Des sous-échantillons des tissus ont été séchés à 70°C jusqu'à atteinte d'un poids constant, puis ont été pesés, broyés et analysés pour déterminer la teneur en azote et en phosphore à l'aide de méthodes colorimétriques automatisées.

Décomposition des tissus

La décomposition a été étudiée sur place avec des tissus prélevés dans la station même seulement. Du filet en fibre de verre à mailles de 2 mm a été utilisé pour fabriquer des sacs à litière de 156,0 cm² dans lesquels ont été déposés, en quantités de 2 g, du feuillage de sapin baumier recueilli dans les pièges à litière, des tiges d'herbacées ou des tiges de mousses, ou encore, en quantités de 4 g, du feuillage des plantes arbustives, des ramilles de ces plantes ou des racines fines. D'autres sacs à litière de 25 cm² en filet de nylon à mailles fines ont été utilisés pour la couche organique qui y a été déposée en quantités de 7 g. Dix sacs à litière pour chacun des types de litière susmentionnés ont été placés dans les stations suivantes en juin 1985 : parterre de coupe de bonne qualité, parterre de coupe de qualité médiocre, bonne station de 30 à 40 ans et station médiocre de 30 à 40 ans. La moitié des sacs de litière ont été récupérés après un an; l'autre, après deux ans. Parallèlement, dans les quatre mêmes stations, ont été placés dix morceaux de bois de fût (0,5 à 8 kg), de branches (sans le feuillage; 20 à 70 g) et de grosses racines (> 10 cm; 9 à 47 g) de sapins baumiers qui ont été récupérés après trois ans. La litière récupérée a été séchée jusqu'à masse constante, puis pesée. La réduction de la masse de la litière dans le temps est utilisée comme mesure de la décomposition.

Analyse statistique

Aux fins de l'étude de la décomposition, pour déterminer les différences entre les stations et d'une année à l'autre pour les mêmes tissus ainsi que les différences entre les tissus au sein des stations, les moyennes des masses des tissus ont été comparées en appliquant la méthode de la plus petite différence significative lorsqu'une analyse de variance à un facteur avait indiqué une différence significative entre des moyennes ($p \leq 0,05$). Toutes les autres moyennes ont été comparées par simple classement.

Résultats



Décomposition

Après deux ans, pour la litière en sac, les ramilles de plantes arbustives et les mousses en sac étaient significativement moins décomposées que les autres tissus, sauf quelques exceptions. Une augmentation inexpliquée de la litière des mousses a été observée entre la première et la deuxième année. La décomposition des mousses après un an était comparable à celle des racines fines et des tiges d'herbacées et significativement plus faible que celle des ramilles de plantes arbustives. Pour toutes les combinaisons qualité-âge, exception faite de la matière organique à la station médiocre de 30 à 40 ans pour l'année un, les tiges d'herbacées et le feuillage des plantes arbustives se sont décomposés plus rapidement que les autres tissus. Le feuillage des arbres, la couche organique et les racines fines se sont décomposés à des vitesses similaires, intermédiaires par rapport aux autres tissus. Tous les tissus se sont décomposés davantage la première année que la deuxième (tableau 1).

Aucune tendance nette des vitesses de décomposition de la litière en sac en fonction des stations n'a été mise en évidence. Dans le cas des matières non en sac (bois de

Tableau 1. Proportion du poids initial des tissus restant après une et deux années de décomposition dans quatre forêts de sapins baumiers

Tissu	Stations bonnes		Stations médiocres	
	Parcure de coupe	30-40 ans	Parcure de coupe	30-40 ans
<u>Année 1</u>				
Feuillage de sapin	0,73 d	0,73 e	0,73 cd	0,71 d
Feuillage d'arbustives	0,51 b B	0,51 b B	0,46 b A	0,51 b C
Ramilles d'arbustives	0,31 e B	0,35 e A	0,34 C	0,32 e B
Tiges d'herbacées	0,33 b B	0,28 b A	0,31 e C	0,25 b A
Tiges de mousses	0,64 c BC	0,63 cd A	0,34 d C	0,59 cd B
Couche organique	0,65 c B	0,61 d C	0,65 b AB	0,64 bc A
Racines	0,67 c AB	0,61 c A	0,73 c BC	0,71 e C
<u>Année 2</u>				
Tiges de mousses	0,61 d A	0,4 de B [*]	0,65 c A	0,66 c A [*]
Ramilles d'arbustives	0,41 b B	0,45 b B	0,28 b A	0,41 b B
Feuillage de sapin	0,36 e B	0,38 c A	0,31 d C	0,31 d BC
Couche organique	0,38 b	0,24 b [*]	0,34 b	0,21 b [*]
Racines	0,34 e B	0,31 e B	0,31 c A	0,31 d C
Feuillage d'arbustives	0,66 d B	0,61 cd B [*]	0,64 c [*] A	0,61 c B
Tiges d'herbacées	0,55 c	0,62 c [*]	0,66 c [*]	0,63 c
<u>Année 3</u>				
Bois	0,65 b A	0,66 ab A	0,61 c A	0,68 b A
Branches	0,64 b B	0,64 b B	0,68 b B	0,66 b B
Grosses racines	0,64 b A	0,62 b C	0,65 c C	0,63 b C

Les lettres majuscules après les chiffres indiquent des différences significatives entre les mêmes colonnes et pour la même année.

Les lettres minuscules avant les chiffres indiquent des différences significatives au sein d'une même ligne.

Les chiffres entre (*) indiquent des différences non significatives entre les mêmes colonnes et pour la même année et pour les mêmes lignes et pour les mêmes colonnes et pour les mêmes lignes.

Tableau 2. Proportion du poids initial du bois, des branches et des grosses racines (>10 mm en diamètre) après 3 années de décomposition dans quatre forêts de sapins baumiers

Tissu	Qualité et âge des stations			
	Parterre de coupe médiocre	Parterre de coupe bonne	Station de 30-40 ans bonne	Station de 30-40 ans médiocre
Bois	0,51 c	0,55 b	0,55 ab	0,50 b
Branches	0,50 b	0,54 b	0,54 b	0,56 b
Grosses racines	0,55 c	0,54 b	0,52 b	0,53 b

Les lettres dans et sans abréviations indiquent des différences significatives.

Tableau 3. Biomasse (Mg/ha) des tissus et densité des tiges du sapin baumier en fonction de la qualité des stations

Type de station	Tissu	Biomasse (Mg / ha) selon l'âge du peuplement (années)					
		0-5	6-12	13-25	30-40	40-50	>50
Bonne	Feuillage	0,04	10,2	15,8	39,1	12,8	16
	Bois de fût	0,03	11,3	54,1	105,5	63,5	78,5
	Écorce du fût	0,01	2,9	10,3	20,7	12,4	14,2
	Branches	0,03	5,7	16,8	33,9	20,1	22,9
	Total	0,1	30,1	96,9	199,1	118,9	138,6
Moyenne	Feuillage	0,18	10,6	21,8	21,4	12	22,2
	Bois de fût	0,1	10	57,2	60,6	45,2	128,1
	Écorce du fût	0,05	3,2	11,3	12	8,6	23,2
	Branches	0,1	6,1	18,7	19,9	14	37,7
	Total	0,43	29,8	108,9	113,9	80,8	211,2
Médiocre	Feuillage	0,07	6,4	20	18,3	15,4	15,7
	Bois de fût	0,04	6,7	63,5	43,7	50,8	84,8
	Écorce du fût	0,02	1,9	12,5	8,9	9,7	15,4
	Branches	0,05	3,7	20,9	15,1	16,2	25,3
	Total	0,18	18,7	117	86	92,1	141,3
		Tiges /ha					
Bonne		1462	35 600	10 279	29 412	1997	757
Moyenne		9545	147 929	15 242	19 290	3635	2014
Médiocre		14 323	38 452	20 362	18 182	8737	2301

fût, branches et grosses racines), par contre, la décomposition a été supérieure dans les stations plus jeunes, et les différences sont significatives dans le cas des stations médiocres (tableau 2). Il est à noter que les différences du poids initial de la litière non en sac entraînent des différences importantes du rapport entre la surface décomposable et le volume, ce qui peut influencer sur les résultats. Cela a probablement contribué à la décomposition plus lente du bois de fût par comparaison aux branches et aux racines. Les conclusions devront donc être confirmées par d'autres expériences avec des tissus de masse uniforme.

Biomasse et teneur en éléments nutritifs des tissus du sapin baumier

Tableau 4. Teneur en éléments nutritifs des tissus de l'étage supérieur de sapins baumiers (*Abies balsamea*), du sous-étage et de la couverture morte dans une station bonne et une station médiocre de 30 à 40 ans

Tissu	Station bonne		Station médiocre			
	Acide (g kg ⁻¹)	P (g g ⁻¹)	Acide (g kg ⁻¹)	P (g g ⁻¹)		
Sapin baumier						
Feuillage	Nouveau :	haut	13,7	157	13,4	166
		milieu	13,7	150	12,1	165
		bas	13,5	148	11,5	163
		jeux	10,5	91	9,4	100
		Mort	13,1	94	10,3	85
Bois		Vivant	9,7	25	<0,6	< 25
		Mort	0,6	25	<0,5	< 25
Écorce		3,9	53	3,2	62	
Branches	Nouvelles		11,3	192	8	212
		Vieilles	4,7	72	4,3	90
		Mortes	1,9	25	1,5	< 25
Plantes arborescentes						
Feuilles	Vivantes		29,4	198	22,4	250
		Mort	10,8	92	7,8	48
Ramilles	Vivantes		6,8	66	3,7	36
		Mortes	9,9	150	Nb	
Plantes herbacées						
Tiges	Vivantes		1,9	156	Nb	
		Mortes	12,1	88	8,5	132
Mosses						
Tiges	Vivantes		12,7	214	8,7	185
		Mortes	13	146	8,4	120
Couch végétative		15,7	86	9,6	79	

La station médiocre s'est classée au premier rang pour la biomasse seulement pour la classe d'âge de 18 à 25 ans. Une grande variabilité a été observée pour la biomasse des arbres entre les classes d'âge, tant entre stations de même qualité qu'entre stations de qualité différente. Cette variabilité s'explique, du moins partiellement, par la variation, atteignant deux ordres de grandeur, de la densité des tiges, notamment très élevée dans le cas de la station moyenne de 8 à 12 ans, soit 148 000 tiges/ha (tableau 3). Pour tous les tissus examinés dans les forêts de 30 à 40 ans, la bonne station devançait la station médiocre pour la teneur en azote, mais aucune ne devançait systématiquement l'autre pour ce qui a trait au phosphore (tableau 4). La teneur en azote et en phosphore du sapin baumier dans les stations bonne et médiocre de 30 à 40 ans peut être estimée en prenant comme hypothèse que la biomasse décrite au tableau 3 a des teneurs en azote et en phosphore équivalant à celles des composantes vivantes, selon le tableau 4, ou à la moyenne des tissus jeunes et vieux lorsque les teneurs pour les deux sont disponibles. Il a ainsi été déterminé que la teneur en azote du sapin baumier dans les stations bonne et médiocre était respectivement de 610 et 348 kg/ha, les parts dans le feuillage, le bois de fût, l'écorce de fût et les branches étant respectivement de 78, 17, 1 et 4 % dans la station de bonne qualité et de 57, 8, 8 et 27 % dans la station de qualité médiocre. De même, la teneur en phosphore du sapin baumier était de 11,3 kg/ha dans la bonne station et de 6,4 kg/ha dans la station médiocre, les parts du feuillage, du bois de fût, de l'écorce du fût et des branches étant respectivement de 42, 23, 4 et 32 % dans la station de bonne qualité et de 38, 17, 9 et 36 % dans la station médiocre.

Discussion



Comme on pouvait s'y attendre, les diminutions de la masse des litières ont été plus élevées au cours de la première année de décomposition, sauf dans le parterre de coupe de qualité médiocre pour les tiges d'herbacées qui ont perdu approximativement 30 % de leur masse initiale au cours des deux années; il est possible dans ce cas que la décomposition moindre la première année résulte du dessèchement de la surface sous l'effet de l'augmentation du rayonnement solaire incident à la surface après l'enlèvement du couvert. Au cours de la phase initiale de la décomposition, la litière de bonne qualité est décomposée rapidement (Preston *et coll.*, 2000). Il y a également une réduction importante de la masse par lessivage des substances solubles, dont certaines qui retardent la décomposition, comme les tanins, ce qui a pour effet de favoriser davantage la décomposition (Trofymow *et coll.*, 2002). La composition chimique de la litière représente un bon prédicteur de la réduction de la masse des tissus lors de la phase initiale de décomposition, qui est exponentielle (Aber *et coll.*, 1990). Plus tard, les réductions de la masse des litières ayant différentes qualités au départ se ressemblent davantage, les vitesses de décomposition pouvant alors être déterminées par des constituants membranaires récalcitrants et la lignine (Melillo *et coll.*, 1982), normalement présents dans les litières ligneuses à décomposition lente sur lesquelles portait la présente étude.

La station de 30 à 40 ans de bonne qualité a présenté des teneurs plus élevées en azote pour les tissus de l'étage supérieur et du sous-étage que la station de la même classe d'âge de qualité médiocre. Les stations de bonne qualité ont le potentiel de produire une litière de qualité supérieure qui se décompose plus rapidement que la litière des stations plus pauvres. Toutefois, les vitesses observées de décomposition des tissus de l'étage supérieur et du sous-étage des stations de qualité bonne et médiocre sont similaires, exception faite des parterres de coupe (tableaux 1 et 2), ce qui indiquerait que la qualité des litières était également similaire. Par ailleurs, la litière de la bonne station présentait des teneurs en azote plus élevées (tableau 4), ce qui signifie que des quantités plus élevées d'azote sont recyclées par la litière et mises à la disposition des plantes pour leur croissance. Il existe généralement une corrélation positive entre la chute de litière, et plus particulièrement la chute de litière de feuilles, et la productivité forestière (Thomas, 1992), de sorte que la quantité d'éléments nutritifs recyclés est plus élevée dans les bonnes stations. Des changements locaux des régimes de température et d'humidité résultant de la récolte des arbres influent probablement sur la décomposition dans les parterres de coupe (Binkley, 1984). Les comparaisons de la décomposition de types particuliers de tissu dans différentes stations sont gênées par l'absence d'une source uniforme de litière, ce qui peut expliquer certaines variations, ou l'absence de variations, entre des stations pour des types particuliers de litière.

Les tiges d'herbacées et le feuillage des plantes arbustives ont affiché la plus haute qualité à l'échelle de toutes les stations, perdant jusqu'à 80 % de leur masse initiale en deux ans, et la perte a été relativement élevée les deux années. La décomposition des mousses après deux ans est l'une des plus faibles, par comparaison aux autres types de litière en sac, quoique leurs taux de décomposition après un an étaient intermédiaires, dépassant ceux du feuillage du sapin baumier, contrairement à ce qu'ont observé Szumigalski et Bayley (1996) qui ont trouvé les mousses plus résistantes à la décomposition que les

plantes vasculaires. Une augmentation inexplicée de la masse des mousses entre l'année un et l'année deux est probablement attribuable à la perte de tissu à travers les mailles de 2 mm des sacs de litière au moment de leur collecte après la première année de décomposition. Il pourrait de même y avoir eu perte de tissu la deuxième année, de sorte que la décomposition des mousses serait surestimée pour les deux années. Il importe donc d'utiliser des sacs de litière à mailles plus fines pour l'étude de la décomposition des mousses. En accord avec les observations de Berg (1984), les racines fines et le feuillage de l'étage supérieur se sont décomposés à des rythmes similaires. La décomposition des racines, qui est principalement influencée par leurs caractéristiques chimiques plutôt que par le climat (Silver et Miya, 2001), pourrait être responsable de la moitié de l'apport annuel de carbone dans les sols forestiers (Coleman et Crossley, 1995). Dans les études de la décomposition, les racines sont souvent enfouies, plutôt que laissées à la surface comme dans la présente étude, où elles sont exposées à des conditions différentes de celles de la surface et qui peuvent modifier la vitesse normale de décomposition des racines. Dans le cas de la couche organique, des vitesses de décomposition comparables à celles des racines et des tiges des mousses et à peine inférieures à celles du feuillage du sapin ont été observées, ce qui indiquerait que la couverture morte était constituée d'une bonne part de matières décomposables relativement jeunes.

Le déboisement augmente le rayonnement solaire incident au sol, ce qui a pour effet d'accroître la température du sol et, en conséquence, d'améliorer potentiellement les conditions d'humidité du sol et les vitesses de décomposition (Pritchett, 1979; Spurr et Barnes, 1980). Les modèles du bilan forestier de carbone supposent souvent que le déboisement augmente les vitesses de décomposition (ex. : Harmon *et coll.*, 1990; Kimmins *et coll.*, 1982; Kurz et Apps, 1999). Dans les stations d'étude, selon le type de tissu, le déboisement a eu un effet positif, négatif ou nul sur la décomposition. D'autres auteurs ont indiqué un effet nul (Binkley, 1984; Prescott *et coll.*, 2000), négatif (Blair et Crossley, 1988; Yin et Perry, 1989) ou positif (Prescott *et coll.*, 1993; Taylor *et coll.*, 1991) du déboisement sur la décomposition, ce qui indique la nécessité d'autres recherches sur la dynamique de la décomposition après une coupe forestière.

La biomasse mesurée des tiges est dans la gamme indiquée par les tables de croissance et de production préparées (inédites) par le service des forêts de Terre-Neuve, et les biomasses des branches et du feuillage dans la station de bonne qualité de 30 à 40 ans correspondent à la partie supérieure de la gamme des valeurs pour le sapin baumier indiquée par Lavigne *et coll.* (1996). Aucune augmentation de la biomasse forestière ou de la densité de peuplement en fonction de la qualité des stations n'a été observée dans la présente étude. D'autres auteurs ont tenté d'utiliser les types forestiers de Damman pour prévoir la croissance. Par exemple, Page (1976) a déterminé que le régime hydrique du sol (tel qu'indiqué par des paramètres du sol et de la couverture morte) constituait le principal prédicteur de la croissance, mais des équations à huit variables stationnelles étaient nécessaires pour obtenir des prévisions satisfaisantes, et beaucoup de variables exigeaient une analyse complexe en laboratoire, empêchant l'application opérationnelle de ces équations en aménagement forestier. Page (1976) a noté que, tout en étant écologiquement rationnels, les types forestiers de Damman ne fournissaient pas une

définition précise des classes de productivité forestière et ne pouvaient être appliqués aux stations perturbées. Plus récemment, des chercheurs ont commencé à examiner une gamme d'attributs forestiers, dans le cadre des types de stations forestières de Daman, qui pourraient servir d'indicateurs de la croissance et de l'aménagement des forêts (Roberts *et coll.*, 1996), mais ces travaux n'ont pas été terminés. L'amélioration de la qualité des stations s'accompagne d'un développement plus vigoureux de la végétation du sous-étage (Damman, 1967), ce qui a pour effet d'accroître la compétition entre le sous-étage et l'étage supérieur et peut donc réduire la croissance forestière et la densité de peuplement dans certaines stations.

Les jeunes peuplements non éclaircis de sapins baumiers comptent fréquemment des dizaines de milliers de tiges par hectare, par exemple 62 000 (Karsh *et coll.*, 1994), mais la valeur de 148 000 tiges/ha pour la station moyenne de 8 à 12 ans est très élevée, au-delà de toutes les valeurs publiées pour le sapin baumier. Aucune tendance d'accroissement de la densité des tiges en fonction de la qualité des stations n'a été observée. Dans les stations d'étude, la densité des tiges pour toutes les qualités de stations était élevée jusqu'à l'âge de 40 à 50 ans, puis elle chutait sous 9 000 tiges/ha sous l'effet de l'auto-éclaircie. L'augmentation de la qualité de station, même si elle ne transparissait pas dans la densité de la végétation du sous-étage et les vitesses de croissance, s'accompagnait d'une augmentation des teneurs en azote dans l'étage supérieur et le sous-étage, mais non d'un effet correspondant sur les teneurs en phosphore, ce qui indique que la station de qualité médiocre était assez riche en phosphore mais limitée en azote.

Ces données ont été obtenues pour appuyer l'élaboration d'un modèle forestier national de simulation, et la démarche suivie se distingue de celle d'autres études visant à examiner l'influence de la qualité des stations sur certains attributs des forêts de l'Ouest de Terre-Neuve. La présente étude, contrairement à la pratique courante, n'a pas comporté de répétition des combinaisons de facteurs considérées ni limité la variation de la densité des tiges de l'étage supérieur, pas même au sein de chaque classe de qualité. En outre, elle n'a pas utilisé une source uniforme de litière pour toutes les stations, mais plutôt la litière présente à chaque endroit, dans les études de la décomposition.

En résumé, l'étude n'a mis en évidence aucune augmentation ou diminution systématique de la décomposition entre les parterres de coupe et les stations de 30 à 40 ans ou entre les stations bonnes et médiocres. En général, la biomasse de l'étage supérieur était plus élevée dans les stations bonnes et moyennes. La densité de peuplement ne diminuait pas de façon significative avant 40 à 50 ans et était particulièrement élevée, 148 000 tiges/ha, dans une station moyenne de 8 à 12 ans. Une bonne station devançait systématiquement une station médiocre pour les teneurs des tissus en azote; la station médiocre serait donc carencée en cet élément. Toutefois, comme les données ont été obtenues en vue d'élaborer un modèle national de la croissance forestière, elles devront être confirmées par l'étude d'autres stations en appliquant un protocole plus normal.

Remerciements

Les données présentées ont été obtenues d'abord pour étalonner le modèle FORCYTE (Kimmins, 1993). L'élaboration et l'étalonnage de ce modèle ont été financés par le

Groupe interministériel (fédéral) de recherche et d'exploitation énergétiques par le biais du Programme de l'énergie forestière (ENFOR). Les auteurs souhaitent remercier W.J. Meades, chef d'étude pour le projet d'étalonnage de FORCYTE à Terre-Neuve, le concepteur de FORCYTE J.P. Kimmins, pour son aide concernant les critères de sélection des stations et les méthodes d'échantillonnage, ainsi que les coordonnateurs de projet A. Carlisle, J. Chatarpaul et M.J. Apps. Les stations ont été choisies par A.R. van Kesteren, et l'échantillonnage a été supervisé par J.P. Moore de Northland Associates Ltd. Les auteurs tiennent également à remercier Michael Lavigne, Caroline Preston et Jagtar Bhatti pour leurs commentaires sur les versions antérieures du manuscrit.

Bibliographie

Aber, J.D., J.M. Melillo et C.A. McClaugherty. 1990. « Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics, and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry ». *Revue canadienne de botanique* **68**: 2201–2208.



- Agren, G.I., B. Axelsson, J.G.K. Flower-Ellis, S. Linder, H. Persson, H. Staaf et E. Troeng. 1980.** « Annual carbon budget for a young Scots Pine ». *Ecological Bulletins Stockholm* **32**: 307–313.
- Almendros, G., J. Dorado, F.J. Gonzales-Vila, M.J. Blanco et U. Lankes. 2000.** « ¹³C NMR assessment of decomposition patterns during composting of forest and shrub biomass ». *Soil Biology and Biochemistry* **32**: 793–804.
- Berg, B. 1984.** « Decomposition of root litter and some factors regulating the process: longterm root litter decomposition in a Scots pine forest ». *Soil Biology and Biochemistry* **16**: 609–617.
- Berg, B., M. Johansson, V. Meentemeyer et W. Kratz. 1998.** « Decomposition of tree root litter in a climatic transect of coniferous forests in northern Europe: a synthesis ». *Scandinavian Journal of Forest Research* **13**: 402–412.
- Binkley, D. 1984.** « Does forest removal increase rates of decomposition and nitrogen release »? *Forest Ecology and Management* **8**: 229–233.
- Blair, J.M., et D.A. Crossley Jr. 1988.** « Litter decomposition, nitrogen dynamics and litter microarthropods in a southern Appalachian hardwood forest 8 years following clearcutting ». *Journal of Applied Ecology* **25**: 683–698.
- Coleman, D.C., et D.A. Crossley. 1995.** *Fundamentals of Soil Ecology*. Academic Press, San Diego. 205 p.
- Cottam, G., et J.T. Curis. 1956.** « The use of distance measures in phytosociological sampling ». *Ecology* **37**: 451–460.
- Damman, A.W. 1967.** *The Forest Vegetation of Western Newfoundland. Site degradation associated with vegetation change* [thèse de doctorat]. University of Michigan, Ann Arbor (MI). 319 p.
- Damman, A.W. 1983.** « An ecological subdivision of the Island of Newfoundland ». Dans : South, G.R. (éditeur). *Biogeography and ecology of the island of Newfoundland*. Dr. W. Junk Publishers, Hague, Pays bas. p. 163–206.
- Environnement Canada.** www.ec.gc.ca.
- Grier, C.C., K.A. Vogt, M.R. Keyes et R.L. Edmonds. 1981.** « Biomass distribution and above- and below-ground productions in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems of the Washington Cascades ». *Revue canadienne de recherche forestière* **11**: 155–167.

- Harden, J.W., K.P. O'Neill, S.E. Trumbore et B.J. Stocks. 1997.** « Moss and soil contribution to the annual net carbon flux of a maturing boreal forest ». *Journal of Geophysical Research* **102**: 28805–28816.
- Harmon, M.E., W.K. Ferrell et J.F. Franklin. 1990.** « Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests ». *Science* **247**: 699–702.
- Hobbie, S.E. 1996.** « Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra ». *Ecological Monographs* **66**: 503–522.
- Karsh, M.B., M. B. Lavigne et J.G. Donnelly. 1994.** *Growth responses of the balsam fir and black spruce spacing trials*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts - Région de T.-N. Rapport d'information N-X-291. 35 p.
- Keyes, M.R., et C.C. Grier. 1981.** « Above- and below-ground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites ». *Revue canadienne de recherche forestière* **11**: 599–605.
- Kimmins, J.P. 1993.** *Scientific foundations for the simulation of ecosystem function and management in FORCYTE-11*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts - Centre de foresterie du Nord. Rapport d'information NOR-X-328. 88 p.
- Kimmins, J.P., et K.A. Scoullar. 1979.** *FORCYTE (Forest Cycling Trend Evaluator): a computer simulation model to examine the long-term consequences for site nutrient capital and productivity of intense forest harvesting*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts - Institut national de foresterie de Petawawa. 90 p.
- Kimmins, J.P., K.A. Scoullar et M.C. Feller. 1982.** *Forcyte -a computer simulation approach to evaluating the effects of whole tree harvesting on nutrient budgets and future forest productivity*. Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, B.C.
- Krause, H.H. 1981.** *Factorial experiments with nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in spruce and fir stands of New Brunswick: 10-year results*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts - Centre de foresterie de l'Atlantique. Rapport d'information M-X-123. 27 p.
- Kurz, W.A., et M.J. Apps. 1999.** « A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector ». *Ecological Applications* **9**: 526–547.
- Lavigne, M.B. 1982.** *Tree mass equations for common species of Newfoundland*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts - Centre de foresterie de T.-N., Rapport d'information N-X-213. 40 p.

- Lavigne, M.B., J.E. Luther, S.E. Franklin et E.R. Hunt Jr. 1996.** « Comparing branch biomass prediction equations for *Abies balsamea* ». *Revue canadienne de recherche forestière* **26**: 611–616.
- Meades, W.J., et L. Moores. 1994.** *Forest site classification manual: a field guide to the Damman forest types of Newfoundland* (2^e édition). Entente sur la mise en valeur des ressources forestières Canada–Terre-Neuve, rapport 003. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts - Région de T.-N. 330 p.
- Melillo J.M., J.D. Aber et J.F. Muratore. 1982.** « Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics ». *Ecology* **63**: 621–626.
- Ministère des Ressources forestières et des Agriments. 1996.** « *20 Year Forestry Development Plan 1996-2015* ». Service des forêts de T.-N.-L., Gouvernement de T.-N.-L. 165 p.
- Moore T.R., J.A. Trofymow, B. Taylor, C. Prescott, C. Camire, L. Duchene, J. Fyles, L. Kozak, M. Kranabetter, I. Morrison, M. Siltanen, S. Smith, B. Titus, S. Visser, R. Wein et S. Zoltai. 1999.** « Litter decomposition rates in Canadian forests ». *Global Change Biology* **5**: 75–82.
- Moores, L.J., B. Pittman et G. Kitchen. 1996.** « Forest ecological classification and mapping: their application for ecosystem management in Newfoundland ». *Environmental Monitoring and Assessment* **39**: 571–577.
- Page, G. 1976.** « Quantitative evaluation of site potential for spruce and fir in Newfoundland ». *Forest Science* **22**: 131–143.
- Prescott, C.E., L.L. Blevins et C.L. Staley. 2000.** « Effects of clear-cutting on decomposition rates of litter and forest floor in forests of British Columbia ». *Revue canadienne de recherche forestière* **30**: 1751–1757.
- Prescott, C.E., B.R. Taylor, W.F.J. Parsons, D.M. Durall et D. Parkinson. 1993.** « Nutrient release from decomposing litter in Rocky Mountain coniferous forests influence of nutrient availability ». *Revue canadienne de recherche forestière* **23**: 1576–1586.
- Preston, C.M., et J.A. Trofymow. 2000.** « Variability in litter quality and its relationship to litter decay in Canadian forests ». *Revue canadienne de botanique* **78**: 1269–1287.
- Pritchett, W.L. 1979.** *Properties and management of forest soils*. Wiley and Sons, Toronto (ON).
- Roberts, B.A., E.F. Woodrow, D. Bajzak et S.M. Osmond 1996.** « A cooperative integrated project to classify forest sites in Newfoundland ». *Environmental Monitoring and*

Assessment **39**: 353–364.

- Sanger, L.J., P. Cox, P. Splatt, M. Whelan et J.M. Anderson. 1998.** « Variability in the quality and potential decomposability of *Pinus sylvestris* litter from sites with different soil characteristics: acid detergent fibre (ADF) and carbohydrate signatures ». *Soil Biology and Biochemistry* **30**: 455-461.
- Silver, W.L., et R.K. Miya. 2001.** « Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects ». *Oecologia* **129**: 407–419.
- Schimel, D.S. 1995.** « Terrestrial ecosystems and the carbon cycle ». *Global Change Biology* **1**: 77–91.
- Spurr, S.H., et B.V. Barnes. 1980.** *Forest Ecology*. Wiley and Sons, Toronto (ON).
- Szumigalski, A.R., et S.E. Bayley. 1996.** « Decomposition along a bog to rich fen gradient in central Alberta, Canada ». *Revue canadienne de botanique* **74**: 573–581.
- Taylor, B.R., C.E. Prescott, W.J.F. Parsons et D. Parkinson. 1991.** « Substrate control of litter decomposition in four Rocky Mountain coniferous forests ». *Revue canadienne de botanique* **69**: 2242–2250.
- Thomas, H. 1992.** « Canopy survival ». In N.R. Baker et H. Thomas (éd.), *Crop photosynthesis : Spatial and Temporal Determinants*, p. 11–41. Elsevier Sci. Publ. B.V., Amsterdam.
- Thompson, I.D., D.J. Larson et W.A. Montevecchi. 2003.** « Characterization of old “wet boreal” forests, with an example from balsam fir forests of western Newfoundland ». *Environmental Reviews* **11**: S23–S46.
- Trofymow, J.A., T.R. Moore, B. Titus, I. Morrison, M. Siltanen, S. Smith S, J. Fyles, C. Camiré, L. Duschene, L. Kozak, M. Kranabetter et S. Visser. 2002.** « Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: influence of litter quality and climate ». *Revue canadienne de recherche forestière* **32**: 789–804.
- Van Nostrand, R.S. 1979.** « Growth response of black spruce to N, P, and K fertilization ». *The Forestry Chronicle* **55**: 189–193.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt, P.A. Palmiotto, P. Boon, J. O’Hara et H. Asbjornsen. 1996.** « Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species ». *Plant and Soil* **187**: 159–219.
- Warde, W., et J.W. Petranka. 1981.** « A correction factor for missing point-centre quarter data ». *Ecology* **62**: 491–494.

Weetman, G.F., et V. Timmer. 1967. *Feather moss growth and nutrient content under upland black spruce*. Institut canadien de recherches sur les pâtes et papiers, Woodlands Research Index, n° 183. 38 p.

Yin, X., et J.A. Perry. 1989. « Influence of canopy removal on oak forest floor decomposition ». *Revue canadienne de recherche forestière* **19**: 204–214.