

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES**

**par
MICHAËL TREMBLAY**

**EFFETS D'ÉCLAIRCIES PRÉCOMMERCIALES ET DE LA DERNIÈRE
ÉPIDÉMIE DE LA TORDEUSE DES BOURGEONS DE L'ÉPINETTE
(*Choristoneura fumiferana* (Clem.)) SUR LA CROISSANCE D'ÉPINETTES ET DE
SAPINS DANS LA RÉGION DU SAGUENAY-LAC-SAINT-JEAN**

FÉVRIER 2006



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Résumé

L'éclaircie précommerciale (EPC) consiste en l'abattage des tiges qui nuisent à la croissance des arbres d'avenir dans un jeune peuplement. Actuellement, au Québec, c'est la méthode sylvicole la plus utilisée pour permettre aux tiges d'atteindre leur plein potentiel de croissance. Pourtant, le rendement de ces peuplements éclaircis est encore peu connu. Cette intervention augmenterait la croissance des tiges et diminuerait théoriquement la vulnérabilité de l'arbre aux épidémies d'insectes. Cette hypothèse se base sur le fait que la vigueur des arbres en début d'épidémie influence la vulnérabilité et que l'EPC augmenterait la vigueur. Il n'y a toutefois pas de consensus sur la vulnérabilité des arbres traités face aux épidémies de TBE. L'étude a été réalisée dans la forêt boréale du Saguenay-Lac-Saint-Jean. L'objectif de cette recherche était de décrire la croissance des tiges de sapin baumier et d'épinette noire provenant de peuplements mélangés d'épinette/sapin et de peuplements monospécifiques d'épinette noire ayant subi une éclaircie précommerciale quelques années avant la dernière épidémie de TBE. Les EPC étudiées ont été réalisées en coupant principalement les feuillus, dans des peuplements composés de tiges plus âgées et de tailles supérieures aux tiges traitées aujourd'hui. Suite à ces observations, il semble qu'il soit plus juste de parler d'éclaircies non-commerciales. Les sites témoins étaient difficiles à trouver en raison du manque de connaissances sur la composition des sites avant l'intervention. De plus, les éclaircies retenues pour l'étude étaient dans des secteurs d'intenses activités forestières, elles ont été faites mur à mur dans les peuplements, contiguës à des obstacles naturels (lac, rivière, etc.) et à des coupes réalisées avant et après l'éclaircie. Les éclaircies réalisées dans ces sites ne semblent pas avoir augmenté l'accroissement en diamètre au

DHP et l'accroissement spécifique en volume (ASV) des tiges traitées. Les épidémies de TBE ont affecté les peuplements d'épinettes noires éclaircis ou non. Certains résultats suggèrent que la vulnérabilité des épinettes noires traitées du secteur Nord (secteur avec témoins) face à la dernière épidémie de TBE n'a pas été diminuée suite à l'intervention, puisque les courbes de croissance se comparent à celles des témoins. Par contre la vulnérabilité des tiges à la TBE dépendrait de leur vigueur avant l'épidémie. Cependant, ces résultats ont été obtenus à partir de tiges dominantes ayant survécu à l'épidémie de TBE. L'ensemble de ces résultats suggère que les effets bénéfiques de l'éclaircie sur la croissance ont été atténués par la dernière épidémie de TBE. Or, il faut demeurer prudent quant à la portée des résultats en raison du nombre de sites étudiés et de la difficulté à trouver des sites témoins. Les éclaircies réalisées une à trois ans avant une épidémie n'ont pas eu d'effet positif sur la croissance des tiges traitées. Le moment de l'intervention par rapport au passage d'une épidémie de TBE pourrait être déterminant pour l'efficacité de l'éclaircie sur la croissance des arbres. Ainsi, l'effet d'une intervention plus de temps avant ou même pendant l'épidémie demande à être vérifié. Finalement, les résultats confirment que les épidémies de TBE font partie de la dynamique forestière boréale et qu'elles doivent être prises en compte dans l'estimation des rendements attendus par les éclaircies. À la lumière de ces résultats, il ressort que dans l'avenir des placettes échantillons non traitées soient conservées près des secteurs éclaircis afin d'avoir des témoins pour des études ultérieures.

Remerciements

Je tiens premièrement à remercier mon directeur et mon co-directeur de maîtrise, messieurs Hubert Morin et Sylvain Parent pour m'avoir aidé, conseillé et guidé tout au long de mon projet. Je voudrais également remercier les étudiants et les assistants de recherche qui ont participé à mon projet de recherche durant les deux dernières années tant au niveau de l'échantillonnage sur le terrain que pour l'analyse des échantillons au laboratoire. Je voudrais particulièrement remercier Nathalie Fantin qui m'a aidé au niveau de l'analyse dendrochronologique, Jean-Guy Girard qui a coupé et sablé tous mes échantillons, Denis Walsh pour ses conseils au niveau de l'analyse statistique ainsi que monsieur Denis Henry du Ministère des ressources naturelles, de la faune et des parcs pour la recherche des peuplements de l'étude.

Finalement, j'aimerais remercier mes parents qui m'ont toujours appuyé dans mon projet d'étude.

Ce projet a été possible grâce à la participation financière du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies ainsi que du Fonds de la recherche forestière du Saguenay-Lac-Saint-Jean. La bourse d'excellence de la société AMISK m'a également été d'un grand support.

Table des matières

Résumé.....	ii
Remerciements.....	iv
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux.....	viii
Introduction.....	1
Matériel et méthodes.....	4
Recherche des peuplements	4
Description des secteurs et des sites étudiés	5
Caractérisation des sites	8
Récolte des tiges	9
Analyses de tiges	9
Accroissement spécifique en volume (ASV).....	11
Épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette	12
Analyses statistiques	12
<i>Comparaisons de la croissance avant et après l'EPC</i>	12
<i>Comparaisons entre les épinettes noires des sites témoins et éclaircis.....</i>	13
<i>Corrélations entre l'ASV avant et après l'épidémie de TBE</i>	14
Résultats.....	15
Caractéristiques des sites étudiés	15
Caractéristiques des tiges échantillonnées	15

Effets de l'EPC	18
<i>Réponse à l'éclaircie</i>	18
<i>Secteur Nord</i>	24
Effets de l'épidémie	28
<i>Épinette noire</i>	28
<i>Sapin baumier</i>	29
Corrélations entre l'ASV avant et après l'épidémie de TBE.....	29
Discussion	31
Caractéristiques des sites	31
Techniques d'éclaircies.....	31
Croissance suite à l'éclaircie et importance des épidémies de la TBE	32
Vulnérabilité des tiges à la TBE	35
Conclusion	38
Références.....	40

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des sites.....	6
Figure 2 : Courbes moyennes de l'accroissement annuel en diamètre au DHP en fonction des années pour les épinettes noires des sites éclaircis (BA et BB) et témoins (BD et BD2) du secteur Nord (a), d'un site éclairci (U) du secteur Sud (b) et du site éclairci (LH) du secteur Sud-Est (c).	19
Figure 3 : Courbes moyennes de l'accroissement spécifique en volume (ASV) en fonction des années pour les épinettes noires des sites éclaircis (BA et BB) et d'un témoin (BD) du secteur Nord (a), d'un site éclairci (U) du secteur Sud (b) et du site éclairci (LH) du secteur Sud-Est (c).	20
Figure 4 : Courbes moyennes de l'accroissement annuel en diamètre au DHP en fonction des années pour les sapins baumiers d'un site éclairci (BA) du secteur Nord (a), du site éclairci (LH) du secteur Sud-Est (b) et des sites éclaircis (U et P) du secteur Sud (c).21	
Figure 5 : Courbes moyennes de l'accroissement spécifique en volume (ASV) en fonction des années pour les sapins baumiers d'un site éclairci (BA) du secteur Nord (a), du site éclairci (LH) du secteur Sud-Est (b) et des sites éclaircis (U et P) du secteur Sud (c).22	
Figure 6 : Courbes moyennes de l'accroissement cumulé en diamètre au DHP (a) et de l'accroissement annuel en diamètre au DHP (b) des épinettes noires des sites témoins et éclaircis du secteur Nord.....	25

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des parcelles échantillons.....	16
Tableau 2 : Caractéristiques des tiges échantillonnées en 2002	17
Tableau 3 : Tests de <i>t</i> appariés par site entre les moyennes de l'accroissement annuel en diamètre au DHP pour une période de 10 ans avant et 10 ans après l'EPC pour les épinettes noires (a) et les sapins baumiers (b).	23
Tableau 4 : Résultats de l'analyse de variance factorielle à un facteur avec mesures répétées (ANOVAR) (a) et de l'analyse univariée de certaines années de croissance (b) pour l'accroissement annuel en diamètre au DHP des épinettes noires du secteur Nord selon l'intervention (Témoin et EPC).	26
Tableau 5 : Résultats de l'analyse de variance factorielle à un facteur avec mesures répétées (ANOVAR) (a) et de l'analyse univariée de certaines années de croissance (b) pour l'accroissement cumulé en diamètre au DHP des épinettes noires du secteur Nord selon l'intervention (Témoin et EPC).....	27
Tableau 6 : Corrélations entre l'ASV moyen d'une période de 10 ans avant l'épidémie de TBE et l'ASV moyen de 10 ans après l'épidémie de TBE pour l'épinette noire et le sapin baumier.....	30

Introduction

L'éclaircie précommerciale (EPC) est une intervention sylvicole qui consiste en l'abattage des tiges qui nuisent à la croissance des arbres d'avenir dans un jeune peuplement (MRNFP 2003). En réduisant la compétition interindividuelle, elle provoque une augmentation de la croissance en diamètre des tiges (Barbour *et al.* 1992; Brissette *et al.* 1999; Doucet et Boily 1996; Karsh *et al.* 1994; Ker 1987; Morris *et al.* 1994; Piene 1982; Pothier et Margolis 1991; Pothier 2002; Rice *et al.* 2001; Vézina et Doucet 1969; Zhang *et al.* 1998), ce qui augmente leur taille moyenne et améliore la valeur commerciale du peuplement (MRN 2002; OIFQ 1996). Au Québec, l'EPC représente, en terme de superficie, l'une des interventions sylvicoles les plus indiquées en forêt boréale pour permettre aux tiges d'atteindre leur plein potentiel de croissance. De plus, selon le Rapport du comité scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité forestière (MRNFP 2004), les EPC auraient un effet presque immédiat sur le potentiel d'approvisionnement en ressources ligneuses, c'est-à-dire sur l'augmentation de la possibilité forestière.

Les forêts résineuses du Saguenay-Lac-Saint-Jean soutiennent depuis plusieurs décennies une industrie forestière importante. Dans cette région, les premières EPC datent du début des années 1970, mais ce n'est que vers 1987 que l'on constate un accroissement de cette intervention (Legris et Couture 1999). En 2002, environ 20 000 hectares de peuplements naturels, non plantés, étaient traités en EPC dans cette région. En dépit des superficies traitées à chaque année, la valeur réelle de cette intervention sur le rendement en matières ligneuses reste inconnue. De plus, une récente étude réalisée en forêt boréale

suggérait que l'EPC n'avait pas d'effet positif sur le volume marchand (Pothier 2002). Cependant, cette étude a été réalisée dans des peuplements de sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) protégés par des arrosages aériens lors de la dernière épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)).

Durant le dernier siècle, trois épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE), chacune d'une durée approximative de 10 ans, ont affecté de façon récurrente les populations de sapin baumier et d'épinettes (*Picea* sp.) du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Morin 1994; Morin et Laprise 1990). Il est donc fort probable qu'une épidémie ait affecté le rendement des EPC réalisées dans cette région. En effet, la défoliation intensive causée par les larves de TBE réduit de façon significative la croissance des tiges (Blais 1962) et peut entraîner la mort des individus affectés (Blais 1965; Maclean 1980; 1984). Bien que le sapin soit plus vulnérable que les épinettes (Blais 1957), certains sapins survivent et poursuivent leur croissance suite à cette perturbation (MacLean 1980).

Des études portant sur la vulnérabilité des arbres aux épidémies convergent vers l'hypothèse que la vulnérabilité des tiges à la TBE dépend de la vigueur de celles-ci au début de l'épidémie (Coyea et Margolis 1994; Lussier *et al.* 2002, Thibault *et al.* 1995). Le terme vulnérabilité se définit comme étant la probabilité qu'un individu succombe lors d'une attaque d'une gravité donnée (Westveld 1954). Il est généralement admis que le taux de croissance et le taux d'assimilation net (E ; croissance de la tige par unité de surface foliaire) sont des indicateurs de la vigueur d'un arbre (Coyea et Margolis 1994; Thibault *et al.* 1995; Waring *et al.* 1992). Par conséquent, comme l'EPC est reconnue pour augmenter

ces taux, une telle intervention pourrait diminuer la vulnérabilité à la TBE des tiges de sapin et d'épinette des peuplements éclaircis (Pothier 2002).

Actuellement, il n'y a pas de consensus sur la vulnérabilité à la TBE des tiges des peuplements éclaircis (MRN 2002; Pothier 2002). Les travaux effectués sur les différents types d'éclaircies dans des peuplements résineux ne s'accordent pas sur l'impact de la TBE sur les arbres traités (Batzer 1967; Bauce 1996; Crook *et al.* 1979; Maclean and Piene 1995; Piene 1989; Pothier 1998; 2002).

Le principal objectif de cette recherche était de décrire la croissance des tiges de sapin baumier et d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP.) provenant de peuplements ayant subi une éclaircie précommerciale quelques années avant la dernière épidémie de TBE dans la forêt boréale du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les hypothèses étaient que l'éclaircie augmentera la croissance des tiges d'une façon observable et mesurable; qu'après l'intervention, la croissance de ces tiges sera supérieure à celle des tiges des peuplements similaires non traités; et que l'éclaircie augmentera la vigueur des tiges, ce qui diminuera leur vulnérabilité à la TBE. Les tiges traitées quelque temps avant l'épidémie de TBE seront donc en moyenne moins affectées par l'épidémie.

Les méthodes utilisées consistent en des analyses dendrochronologique et des analyses de tiges. Ces méthodes permettent de réaliser une étude rétrospective de la croissance d'un arbre et de comparer le taux de croissance d'arbres individuels (Lussier *et al.* 1992; Zarnovican 1985). Ces méthodes ont permis d'évaluer rapidement la croissance des tiges depuis l'EPC et pendant la dernière épidémie de TBE.

Matériel et méthodes

Recherche des peuplements

La recherche des peuplements a été entreprise en collaboration avec le Ministère des ressources naturelles, de la faune et des parcs (MNRFP). Des peuplements mélangés d'épinette/sapin et monospécifiques d'épinette noire de la forêt boréale issus de vieilles éclaircies précommerciales étaient recherchés. Tous les peuplements de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean correspondant à ces critères ont été retenus. Au total, cinq peuplements qui se trouvaient dans trois secteurs distincts de la région ont été trouvés. Quatre peuplements ont été éclaircis en 1973, et un en 1971. Les éclaircies auraient été réalisées selon des directives plus ou moins strictes, au moyen de hachettes, en ciblant particulièrement les feuillus. La procédure n'était pas archivée et il était très difficile, voire impossible, de déterminer avec exactitude la structure et la composition relative en résineux de la forêt initiale. Les années des éclaircies correspondraient au début de la dernière épidémie de la TBE dans la région (Morin 1994; Morin et Laprise 1990). Ces peuplements n'ont pas été arrosés avec des insecticides pendant cette épidémie.

Pour chacune des éclaircies, un peuplement témoin a été recherché. Il devait se trouver à proximité et avoir les mêmes caractéristiques (dépôt, drainage, année d'origine, perturbation d'origine) que le peuplement éclairci. Ces sites témoins ont été difficiles à trouver en raison du manque de connaissances sur la composition des sites avant l'intervention et parce que les éclaircies retenues pour l'étude étaient dans des secteurs d'intenses activités forestières, elles ont été faites mur à mur dans les peuplements,

contiguës à des obstacles naturels (lac, rivière, etc.) et à des coupes réalisées avant et après l'éclaircie.

Pour cette recherche, les sites d'études correspondent aux peuplements éclaircis ainsi qu'aux peuplements témoins non éclaircis.

Description des secteurs et des sites étudiés

Un total de cinq sites éclaircis et deux sites témoins répartis dans trois secteurs de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean correspondaient aux critères de la recherche. Le secteur Nord est localisé à 70 km au nord du Lac Saint-Jean (49°22'N, 71°56'O) (Figure 1), dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc et dans l'unité de paysage régional Lac Connelly (Unité 98) (Robitaille et Saucier 1998). Le climat de ce secteur (station Mistassini, 121,9 m, 48°51'N, 72°12'O), pour les années 1985-2000, se caractérisait par une température moyenne annuelle de 1,4 °C et des précipitations moyennes totales de 306 cm, dont 68,2 cm sous forme de pluie et 237,8 cm sous forme de neige. Ce secteur a subi un feu pendant les années 1920. Dans ce secteur, quatre sites (sites BA, BB, BD, BD2) ont été trouvés dans un rayon de 1 km. Deux des sites (sites BA et BB) sont des peuplements éclaircis en 1973 (Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs du Québec (MRNFP), comm. pers., 2002). Le site BA a également subi une éclaircie commerciale en 1994 (MRNFP, comm. pers., 2002). Il s'est développé sur une terrasse fluviatile sablonneuse, sa topographie est plane et le drainage bon. Le site se compose d'épinettes noires, accompagnées de quelques sapins baumiers. Il y a plusieurs tiges de sapin tuées par

la TBE dans le site. Le site BB est dominé par l'épinette noire, accompagnée de quelques pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et de peupliers faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), formant un peuplement fermé. Ce peuplement s'est développé sur un till à texture sablo-limoneuse et sur une pente de 35 %, ce qui lui confère un bon drainage.

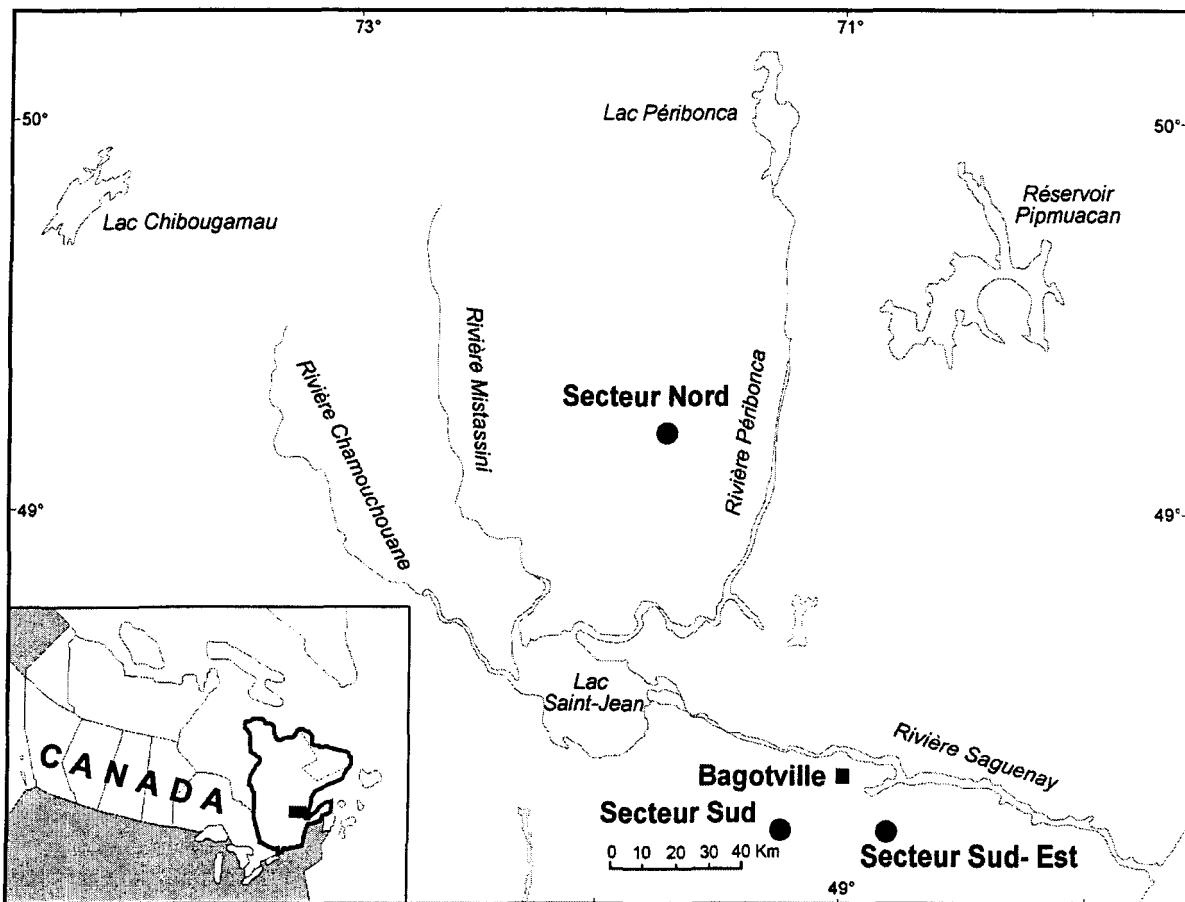


Figure 1 : Localisation des sites.

Les deux seuls sites témoins trouvés se localisent dans le secteur Nord (Figure 1). Le site BD2 a la même origine et il est adjacent au site BB. Il a les mêmes caractéristiques

de sol et de topographie que le site BB. Le peuplement est dominé par l'épinette noire, accompagnée du pin gris, de quelques peupliers faux-tremble et de bouleaux blancs (*Betula papyrifera* Marsh.) en sous-étage. Le site BD s'est développé sur un till mince sur roc à texture sablo-limoneuse et il se trouve au sommet d'une pente de 15%, il a donc un bon drainage. Le peuplement se compose d'épinettes noires, accompagnées par des pins gris et des bouleaux blancs en sous-étage.

Le secteur Sud se situe à une trentaine de kilomètre au sud de Chicoutimi, dans le nord de la réserve faunique des Laurentides, dans le secteur du Lac des Uries (47°59'N, 71°12'O) (Figure 1). Ce secteur fait parti du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc et de l'unité de paysage régional Lac aux Écorces (Unité 91) (Robitaille et Saucier 1998). Le climat de ce secteur (station Bagotville A, 159,1 m, 48°19'N, 71°00'O), pour les années 1971-2000, se caractérisait par une température moyenne annuelle de 2,3 °C et des précipitations moyennes totales de 407,7 cm, dont 66,1 cm sous forme de pluie et 341,6 cm sous forme de neige. Dans ce secteur, deux sites (sites P et U) issus de coupes ont été trouvés pour l'étude. Ils se sont développés sur un till à texture sablo-limoneuse. Le site P a subi une éclaircie précommerciale en 1971 (MRNFP, comm. pers., 2002). Sa topographie présente une légère pente (< 10%) et le drainage est bon. L'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) et le sapin baumier dominent la strate arborescente, accompagnés du bouleau blanc. La dernière épidémie de TBE a provoqué une grande trouée dans le peuplement, à l'intérieur de laquelle des tiges mortes de sapin étaient observées. Le site U est situé à moins de 10 km du site P. Il a subi une éclaircie précommerciale en 1973 (MRNFP, comm. pers., 2002). Sa topographie est plane et le

drainage moyen. Le sapin baumier domine la strate arborescente, accompagné de l'épinette blanche, de l'épinette noire et du bouleau blanc.

Le secteur Sud-Est se retrouve à Ferland-Boileau, dans le secteur du Lac Huard ($48^{\circ}05'N$, $70^{\circ}47'O$). Il s'intègre dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc et de l'unité de paysage régional Lac Batiscan et Lac des Martres (unité 92) (Robitaille et Saucier 1998). Le climat de ce secteur (station Ferland, 198,1 m, $48^{\circ}12'N$, $70^{\circ}49'O$), pour les années 1985-2000, se caractérisait par une température moyenne annuelle de 1,6 °C et des précipitations moyennes totales de 342,2 cm, dont 61,3 cm sous forme de pluie et 280,9 cm sous forme de neige. Un site (site LH) a été étudié dans ce secteur. Le peuplement provient d'une coupe totale et il a subi une éclaircie précommerciale en 1973 (MRNFP, comm. pers., 2002). Il s'est développé sur des sédiments fluviatiles récents à texture limono-argileuse, sa topographie est plane et le drainage moyen. Le sapin baumier et l'épinette noire dominent la strate arborescente, accompagnés de quelques peupliers faux-tremble et de bouleaux blancs.

Caractérisation des sites

Dépendamment de la superficie de chacun des sites, de une à cinq placettes circulaires de 11,28 m de rayon (0,04 ha) et espacées de 50 mètres environ l'une de l'autre ont été délimitées pour caractériser les peuplements trouvés. Dans ces placettes, le diamètre à hauteur de poitrine (1,30 m) a été mesuré et l'espèce a été notée pour tous les arbres de

plus de 2 cm de diamètre à hauteur de poitrine (DHP). Le profil du sol a été caractérisé dans chacun des sites (MRN 1994).

Récolte des tiges

Des transects ont été tracés de façon à couvrir la superficie de chacun des sites. Les tiges de sapin baumier et d'épinette noire dominantes ou co-dominantes étaient récoltées systématiquement à tous les 5 mètres environ, le long de ces transects. De 10 à 32 arbres par site ont été récoltés de cette manière. Le nombre de tiges échantillonnées variait entre les sites en raison de la superficie et de la composition en sapins et en épinettes qui différaient entre les sites. Les arbres sélectionnés étaient abattus et la hauteur totale, ainsi que le DHP étaient mesurés au centimètre près. La hauteur de la cime vivante, soit la hauteur de la première branche verte, était aussi mesurée au centimètre près. Sur chaque tronc, des disques étaient prélevés aux hauteurs suivantes : 0 m, 0,3 m, 0,6 m, 1 m, 1,3 m (DHP), 2 m et à tous les mètres jusqu'à la flèche terminale.

Analyses de tiges

Tous les disques ont été séchés et finement sablés. Les analyses étaient séparées en deux parties, une sur toutes les tiges récoltées pour laquelle le disque à la hauteur du DHP a été retenu. Pour l'autre partie, un sous échantillonnage a été réalisé afin de procéder à des analyses de tiges. Cinq tiges par espèce étaient choisies aléatoirement dans chacun des sites, à l'exception du site témoin BD2 pour lequel il a été impossible de récolter tous les

disques servant aux analyses de tiges avant le commencement de l'hiver à la fin 2004. Pour le site BA seulement deux sapins ont servi à l'analyse de tige parce qu'il y avait présence de caries sur les disques à la base des autres sapins récoltés sur le site.

Les cernes de croissance ont été dénombrés le long de quatre rayons tracés en croix pour les disques de 0 m, 0,3 m, 0,6 m, 1 m et 1,3 m, et de deux rayons opposés, pour ceux au-dessus de 1,3 m. La largeur des cernes de croissance a été mesurée sur tous les rayons avec des appareils de type MacDendro ou WinDendro (Guay *et al.* 1992). Lorsque qu'il y avait des cernes de croissance très petits sur un disque, les cernes étaient mesurés avec un micromètre optique de type Henson (précision de 0,01 mm). A partir de ces mesures, des graphiques montrant la variation de la largeur des cernes en fonction des années ont été construits. Une interdatation visuelle a été réalisée à partir de ces graphiques pour minimiser les erreurs de décalage d'années entre les rayons, les disques et les tiges causées par des cernes manquants ou discontinus (Stokes et Smiley 1968). Ces analyses visuelles étaient vérifiées statistiquement avec le programme COFECHA (Holmes 1983). Une fois l'interdatation terminée, il a été possible de procéder aux calculs des données d'analyses de tiges.

Pour cette étude, les données d'accroissement en diamètre au DHP et d'accroissement spécifique en volume (ASV) ont été retenues comme indices de croissance. Les données d'accroissement en diamètre étaient disponibles pour tous les arbres récoltés, alors que les données d'ASV l'étaient seulement pour les arbres sous échantillonnés pour l'analyse de tige complète.

Accroissement spécifique en volume (ASV)

L'ASV permet de comparer la croissance en volume d'arbres qui n'ont pas la même taille (Duff et Nolan 1957; Lussier *et al.* 1992; Morin et Gagnon 1992). L'ASV ($\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{an}$), estime le bois (cm^3) produit pendant l'année par unité de surface cambiale (cm^2). Cette mesure représente la productivité d'un arbre (Duff et Nolan 1957) et elle a déjà été utilisée pour évaluer la réponse de tiges suite à une éclaircie et à une épidémie de la TBE (Piene 1981). Elle se calcule en divisant l'accroissement annuel en volume par la surface cambiale moyenne avec l'équation suivante:

$$\text{ASV}_n = \frac{V_n - V_{n-1}}{\frac{1}{2} (S_n + S_{n-1})}$$

où V représente le volume, S , la surface cambiale, et n , l'année.

Le volume total de la tige se calcule en additionnant les volumes compris entre les différentes sections prélevées (Husch *et al.* 1982; Lussier *et al.* 1992). Cette mesure est donc l'estimation du volume total sec et sans écorce. La surface cambiale a été calculée pour chacune des sections et ces surfaces ont ensuite été additionnées afin d'obtenir la surface cambiale totale (Lussier *et al.* 1992). Les calculs ont été réalisés avec le logiciel SAS (SAS Institute Inc. 1988a, 1988b).

Épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Les années épidémiques de la TBE dans les sites ont été établies à l'aide de l'Atlas de défoliation de la tordeuse de Hardy *et al.* (1986) et des recherches effectuées sur le sujet dans la région (Blais 1965; 1983; 1985a; Krause et Morin 1999; Lussier *et al.* 1992; Lussier *et al.* 2002; Morin 1994; Morin et Laprise 1990). Ces années étaient ensuite repérées et les patrons de croissance des tiges étudiées afin de trouver des chutes d'accroissement en forme de U ou de V, caractéristiques des épidémies de TBE (Swetnam *et al.* 1985).

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont toutes été réalisées avec le logiciel JMP IN, version 5.1 (SAS Institute Inc. 2003).

Comparaisons de la croissance avant et après l'EPC

Afin de mesurer une réponse à l'éclaircie, une comparaison de la croissance avant et après l'éclaircie a été réalisée. Cette partie consistait en des études de cas où chaque site était analysé individuellement. Pour ce volet, l'accroissement annuel en diamètre au DHP et l'ASV des tiges de chaque espèce dans chacun des sites ont été retenus comme indices de croissance. Pour ces deux mesures, les moyennes de 10 ans avant et 10 ans après l'EPC ont été calculées. Pour les sites témoins (sites BD et BD2), comme il n'y a pas d'intervention, l'année de séparation entre la moyenne avant et après était l'année 1973, ceci permettait une comparaison avec les sites éclaircis en 1973 du secteur Nord. Les moyennes ont ensuite

étaient soumises au test de t apparié suivant un seuil de signification de $\alpha = 0,05$. Les données d'accroissement annuel en diamètre au DHP donne une vision moins globale de la croissance de la tige que les données d'ASV, mais elles sont présentées également, car le nombre d'échantillons était plus élevé pour cette mesure. Pour le site témoin BD2, il y avait seulement les données de l'accroissement annuel en diamètre au DHP de disponibles.

Comparaisons entre les épinettes noires des sites témoins et éclaircis

Ce volet consistait en une analyse comparative entre toutes les épinettes noires récoltées dans le secteur Nord, afin de déterminer s'il y avait une différence mesurable de la croissance entre les sites témoins et éclaircis. Les mesures utilisées pour cette analyse étaient l'accroissement annuel en diamètre au DHP et l'accroissement cumulé en diamètre au DHP. La première année d'observation était l'année 1946 qui était la première année où toutes les tiges avaient atteint la hauteur du DHP. La comparaison dans le temps de ces mesures entre les témoins et les sites traités a été vérifiée avec une analyse de variance factorielle à un facteur par mesures répétées (ANOVAR) (Nemec 1996). La variable indépendante était l'intervention sylvicole (éclaircie ou témoin). Une analyse univariée a été réalisée pour vérifier si l'accroissement des tiges des sites éclaircis et des sites témoins était significativement différent à certaines époques. Les années choisies se répartissaient à tous les cinq ans, de 1950 à 2000. Les années 1947 et 2002 étaient également considérées car il s'agissait de la première et de la dernière année étudiée, ainsi que 1973 qui est l'année de l'EPC pour les sites traités du secteur Nord. La probabilité de Huynh-Feldt (P_{H-F}) et

celle de Greenhouse-Geiser (P_{G-G}), plus conservatrice (Fernandez 1991, Scheiner et Gurevitch 1993), ont été retenues pour l'analyse au seuil de signification de $\alpha = 0,05$.

Corrélations entre l'ASV avant et après l'épidémie de TBE

Afin de vérifier si la vigueur des arbres avant l'épidémie diminue leur vulnérabilité à la TBE et en sachant que la croissance est un indice de la vigueur (Thibault *et al.* 1995), un test de corrélation a été réalisé. Il s'agissait de calculer l'ASV moyen d'une période de 10 ans avant l'épidémie de TBE (1962-1971 pour le site P et 1964 -1973 pour les autres sites) et l'ASV moyen de 10 ans après l'épidémie de TBE (1987-1996) pour chacune des tiges choisies pour l'analyse de tige complète. Ensuite, des corrélations ont été réalisées entre ces moyennes pour les épinettes noires et les sapins baumiers.

Résultats

Caractéristiques des sites étudiés

Le DHP moyen des tiges des sites du secteur Nord était de 12,9 et 13,2 cm pour les sites éclaircis et de 11,9 et 12,9 cm pour les témoins (Tableau 1). Il était de 9,6 et 16,5 cm pour les sites du secteur Sud et de 13,7 cm pour le site du secteur Sud-Est (Tableau 1). Les peuplements éclaircis se caractérisaient par une densité variant de 1075 à 4435 tiges/hectare, avec de 0 à 24 % de feuillus et une surface terrière totale de 25,2 à 46,7 m² ha⁻¹ (Tableau 1). Pour le secteur Nord, la densité et le pourcentage de feuillus des sites témoins étaient plus élevés en comparaison avec les sites éclaircis du même secteur, mais pas avec l'ensemble des sites éclaircis. Leurs surfaces terrières par contre étaient plus importantes que tous les sites éclaircis (Tableau 1). Notez cependant que la densité et la surface terrière du site traité BA ont été diminuées par une éclaircie commerciale en 1994.

Caractéristiques des tiges échantillonnées

Le DHP moyen par site des arbres échantillonnés dans les éclaircies se situait entre 14,9 et 19,1 cm pour l'épinette noire et entre 17,0 et 23,2 cm pour le sapin baumier (Tableau 2). Le DHP moyen par site lors de l'EPC des arbres échantillonnés, toutes essences confondues, variait de 9,5 à 16,1 cm (Tableau 2). L'âge moyen à 0,3m du sol des tiges lors de l'EPC était de 31,3 à 44,3 ans pour l'épinette noire et de 51,3 à 80 ans pour le sapin baumier (Tableau 2). Notez que cet âge n'est pas l'âge réel calculé au collet. Le pourcentage moyen de cime vivante des tiges par site était comparable entre les sites, se

situant entre 47,8 et 57,5 %, sauf pour un site éclairci (BB) et un témoin (BD) adjacent du secteur Nord qui était de 34,1 et 33,9 % respectivement (Tableau 2).

Tableau 1 : Caractéristiques des parcelles échantillons

Secteur	Nord				Sud		Sud-Est
	Site	BA	BB	BD	BD2	P	U
Coordonnées	49°23'40,5''N 71°55'55,1''O	49°22'23,5''N 71°56'14,3''O	49°22'23,8''N 71°56'10,0''O	49°22'23,5''N 71°56'13,9''O	48°02'22,1''N 71°14'22,5''O	47°59'42,4''N 71°12'50,5''O	48°05'07,7''N 70°47'20,3''O
Origine	Feu	Feu	Feu	Feu	Coupe	Coupe	Coupe
Intervention	EPC+EC	EPC	Témoin	Témoin	EPC	EPC	EPC
Année de l'EPC	1973	1973	—	—	1971	1973	1973
Essence (s) dominante (s)	EPN SAB	EPN	EPN	EPN	SAB EPB	SAB EPN	SAB EPN
DHP moyen (cm)	12,9 (5,4)	13,2 (4,1)	11,9 (5,0)	12,9 (4,6)	16,5 (10,0)	9,6 (4,9)	13,7 (5,5)
Densité (tige/ha)	1642	3188	4113	3275	1075	4435	1275
Pourcentage de feuillus	0	2,8	8,2	9,9	24	10,6	5,9
Surface terrière (m² ha⁻¹)	25,2	46,7	53,6	48,2	31,4	40,6	34,8
Altitude (m)	214	240	258	240	681	714	398
Drainage	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Moyen	Moyen

Notes : Moyenne (écart-type). Le site BA a subi une éclaircie commerciale en 1994. EPC= Éclaircie précommerciale; EC= Éclaircie commerciale; DHP= Diamètre à hauteur de poitrine; EPN= Épinette noire; EPB= Épinette blanche; SAB= Sapin baumier.

Tableau 2 : Caractéristiques des tiges échantillonnées en 2002

Secteur	Nord				Sud			Sud-Est	
	Site	BA		BB	BD	BD2	P	U	LH
		Intervention	EPC	EPC	Témoin	Témoin	EPC	EPC	EPC
Espèce		EPN	SAB	EPN	EPN	EPN	SAB	SAB	EPN
Nombre échantillonné		28	4	24	22	10	17	11	13
Analyse de tige		5	2	5	5	0	5	5	5
DHP (cm)		17,8 (3,2)	20,2 (2,5)	14,9 (2,0)	15,8 (2,8)	14,7 (2,0)	23,2 (3,4)	17,0 (1,4)	19,1 (2,9)
DHP année EPC* (cm)		11,9 (2,3)	13,8 (3,6)	9,5 (1,7)	10,6 (2,2)	9,8 (0,9)	15,6 (2,4)	10,8 (1,9)	10,1 (2,4)
Hauteur (m)		17,1 (1,5)	17,7 (1,3)	17,1 (1,4)	16,6 (2,0)	17,3 (1,4)	18,9 (1,3)	14,7 (1,1)	14,5 (1,1)
% cime vivante		47,8 (9,8)	57,4 (2,7)	34,1 (6,5)	49,2 (14,8)	33,9 (6,3)	52,6 (6,2)	57,5 (5,8)	56,9 (4,6)
Âge à 0,3 m en 2002		73,3 (7,5)	109,0 (37,5)	70,3 (1,8)	71,6 (2,1)	71,5 (1,0)	93,3 (16,0)	80,3 (3,7)	72,1 (3,5)
Âge à 0,3 m année EPC*		44,3 (7,5)	80,0 (37,5)	41,3 (1,8)	42,6 (2,1)	42,5 (1,0)	62,3 (16,0)	51,3 (3,7)	43,1 (3,5)
								64,2 (16,2)	31,3 (4,7)

Notes : Moyenne (écart-type). EPC= Éclaircie précommerciale; DHP= Diamètre à hauteur de poitrine; EPN= Épinette noire; SAB= Sapin baumier.

* L'année EPC correspond à l'année où l'éclaircie précommerciale a été réalisée dans les sites traités, soit 1971 pour le site P et 1973 pour tous les autres sites ainsi que les sites témoins du secteur Nord afin de les comparer avec les sites éclaircis de ce secteur.

Effets de l'EPC

Réponse à l'éclaircie

Les figures 2 et 4 présentent les courbes moyennes de la variation de l'accroissement annuel en diamètre au DHP des tiges d'épinette noire (Figure 2) et de sapin baumier (Figure 4) échantillonnées dans chacun des sites. Les figures 3 et 5 montrent les courbes moyennes de l'ASV pour les épinettes noires (Figure 3) et les sapins baumiers (Figure 5). Les lignes pointillées indiquent le moment de l'éclaircie. Aucune augmentation de l'accroissement suite à l'éclaircie n'est observable dans ces figures. Pour toutes les épinettes noires, la moyenne de l'accroissement annuel en diamètre au DHP et de l'ASV des 10 années avant l'EPC sont plus élevées que la moyenne des 10 années après l'EPC (Figures 2 et 3). Le résultat est similaire pour le sapin baumier (Figures 4 et 5). Pour l'épinette noire, ce résultat est significatif à propos de l'accroissement annuel en diamètre au DHP pour tous les sites incluant les deux sites témoins (Figure 2; Tableau 3a). Pour le sapin baumier, seul le site du secteur Nord (site BA) n'est pas significatif (Figure 4; Tableau 3b). Cependant, le nombre d'échantillons est peut-être insuffisant pour détecter une différence significative, car seulement quatre sapins ont été échantillonnés dans ce site (Tableau 2). Les moyennes sont donc supérieures avant l'éclaircie et il n'y a aucune augmentation mesurable de l'accroissement suite à l'intervention.

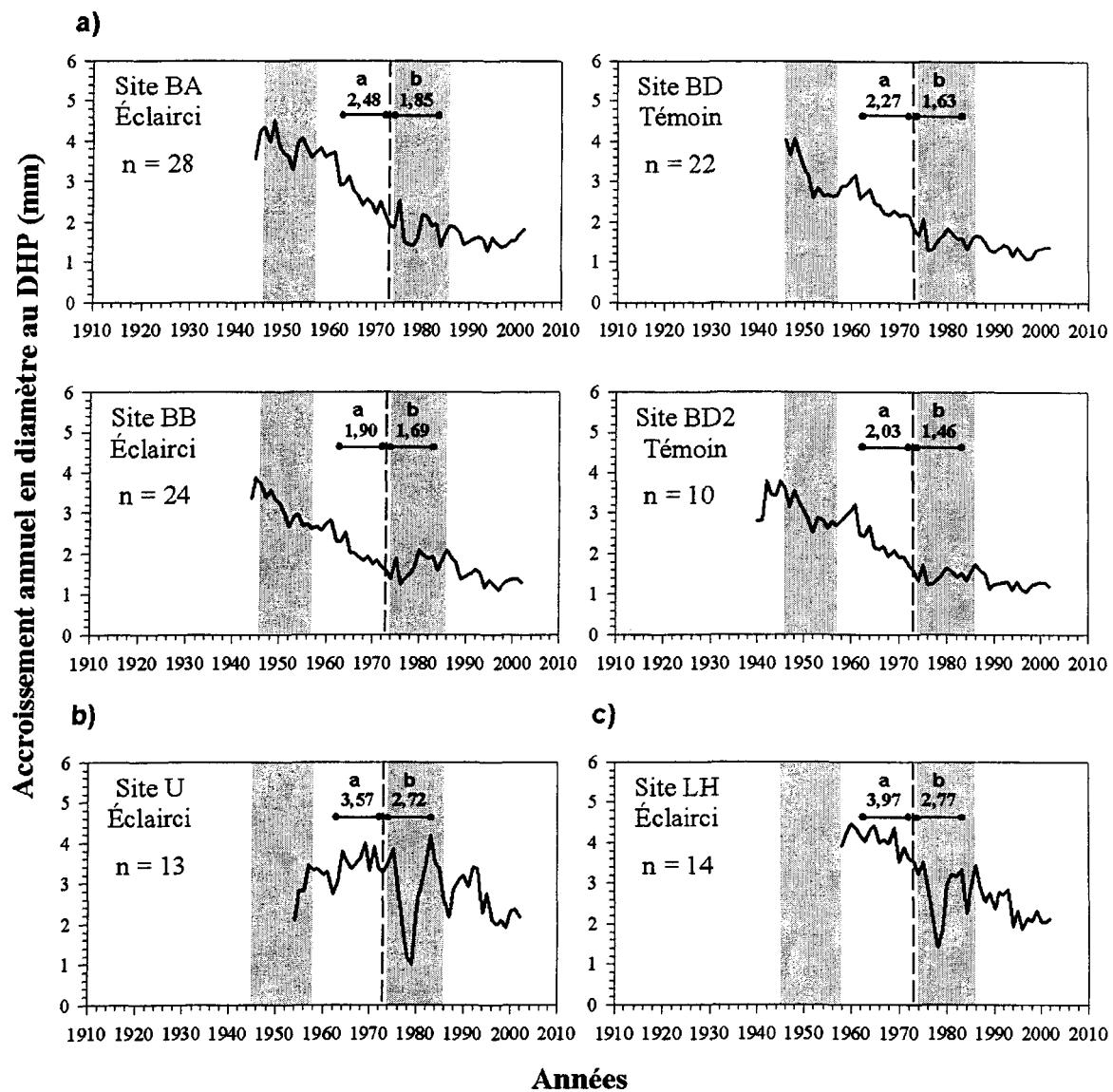


Figure 2 : Courbes moyennes de l'accroissement annuel en diamètre au DHP en fonction des années pour les épinettes noires des sites éclaircis (BA et BB) et témoins (BD et BD2) du secteur Nord (a), d'un site éclairci (U) du secteur Sud (b) et du site éclairci (LH) du secteur Sud-Est (c). Les zones grises indiquent les périodes de défoliation par la TBE. La ligne verticale pointillée montre l'année de l'EPC. Les valeurs inscrites avant et après la ligne pointillée sont les moyennes de l'accroissement annuel en diamètre au DHP pour une période de 10 ans avant et 10 ans après l'EPC. Des lettres différentes entre les deux moyennes représentent une différence significative selon le test de *t* apparié ($\alpha = 0,05$). n = nombre d'individus analysés par site.

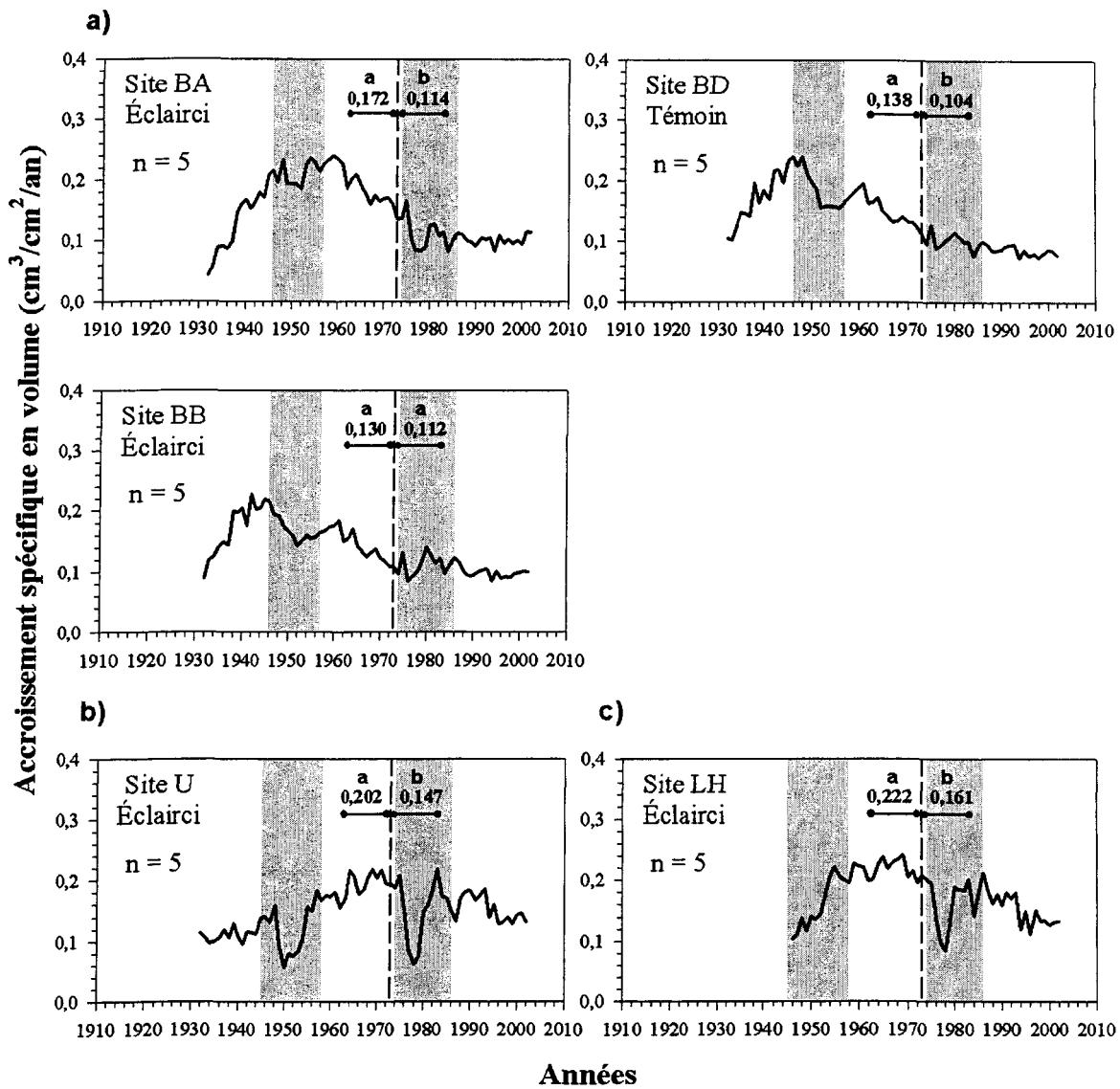


Figure 3 : Courbes moyennes de l'accroissement spécifique en volume (ASV) en fonction des années pour les épinettes noires des sites éclaircés (BA et BB) et d'un témoin (BD) du secteur Nord (a), d'un site éclairci (U) du secteur Sud (b) et du site éclairci (LH) du secteur Sud-Est (c). Les zones grises indiquent les périodes de défoliation par la TBE. La ligne pointillée montre l'année de l'EPC. Les valeurs inscrites avant et après la ligne pointillée sont les moyennes de l'ASV pour une période de 10 ans avant et 10 ans après l'EPC. Des lettres différentes entre les deux moyennes représentent une différence significative selon le test de *t* apparié ($\alpha = 0,05$). n = nombre d'individus analysés par site.

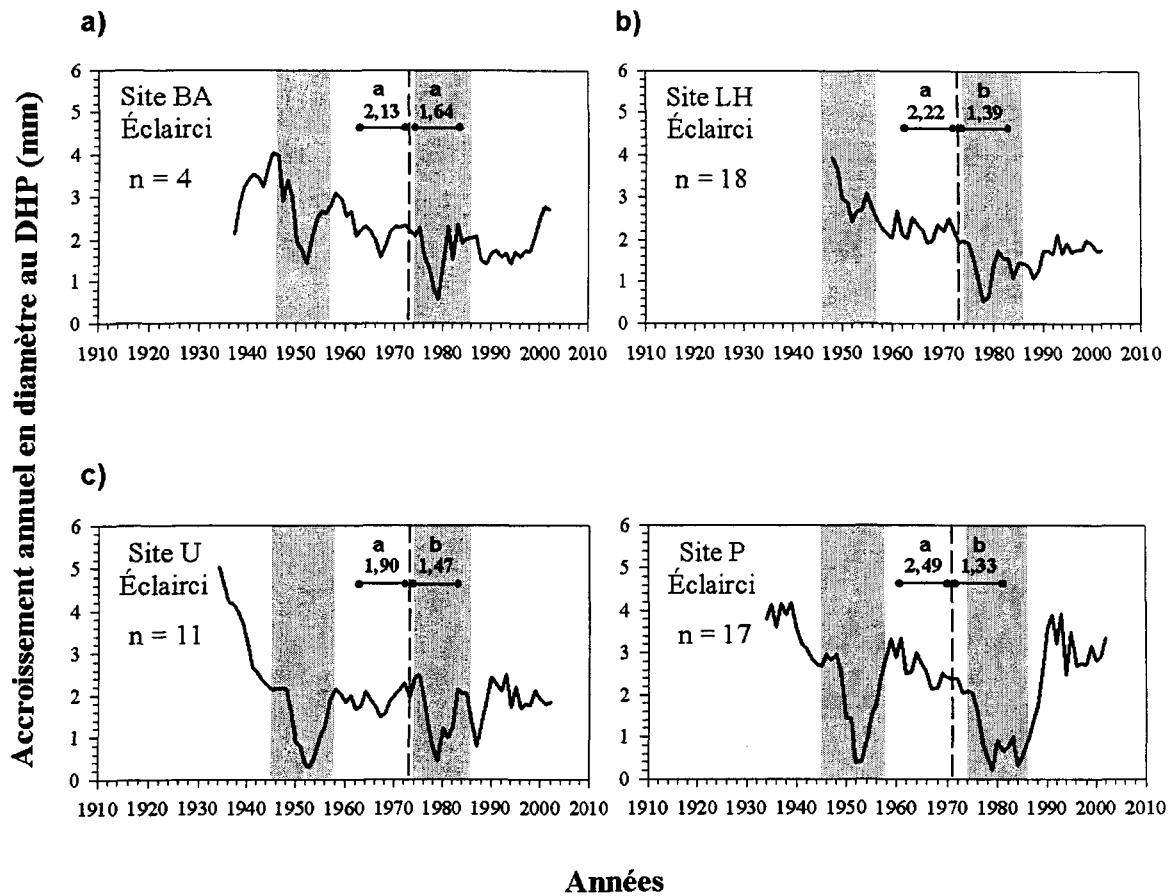


Figure 4 : Courbes moyennes de l'accroissement annuel en diamètre au DHP en fonction des années pour les sapins baumiers d'un site éclairci (BA) du secteur Nord (a), du site éclairci (LH) du secteur Sud-Est (b) et des sites éclaircис (U et P) du secteur Sud (c). Les zones grises indiquent les périodes de défoliation par la TBE. La ligne verticale pointillée montre l'année de l'EPC. Les valeurs inscrites avant et après la ligne pointillée sont les moyennes de l'accroissement annuel en diamètre au DHP pour une période de 10 ans avant et 10 ans après l'EPC. Des lettres différentes entre les deux moyennes représentent une différence significative selon le test de *t* apparié ($\alpha = 0,05$). n = nombre d'individus analysés par site.

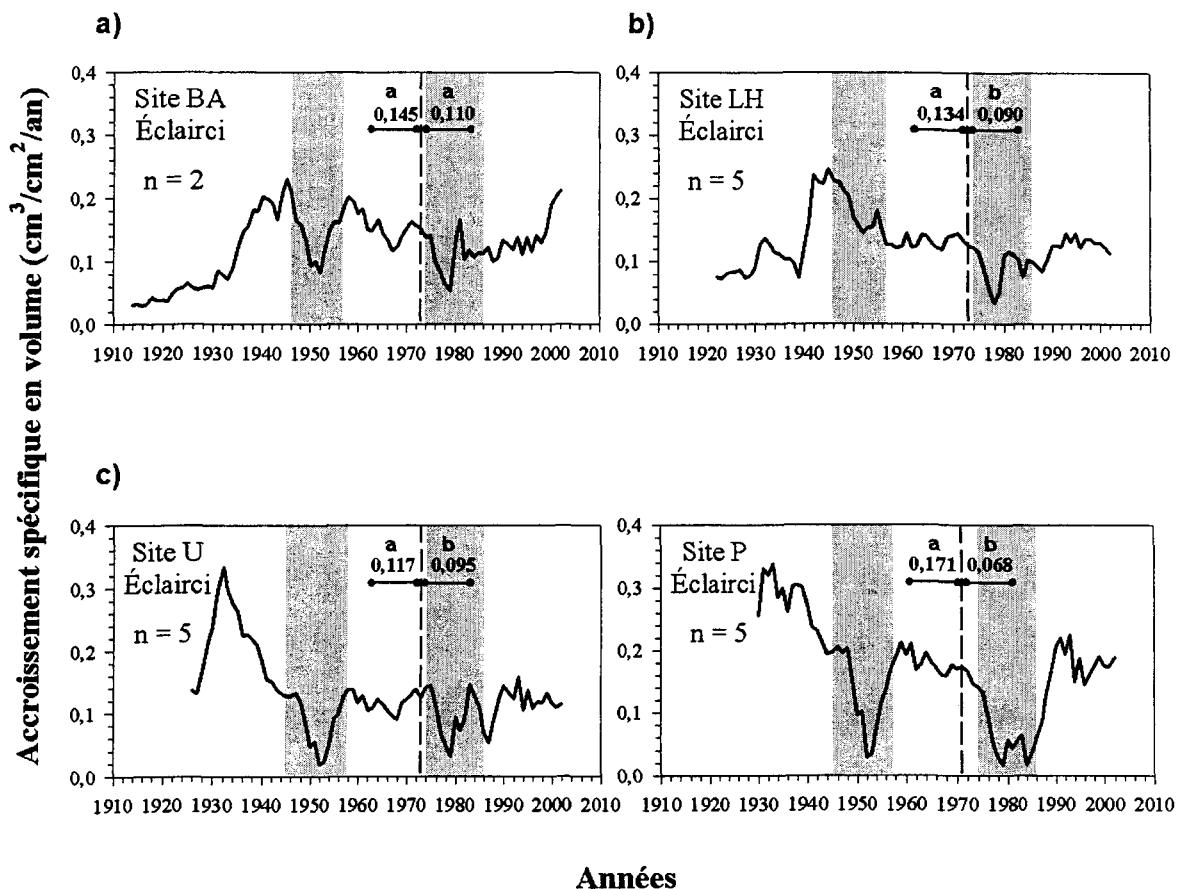


Figure 5 : Courbes moyennes de l'accroissement spécifique en volume (ASV) en fonction des années pour les sapins baumiers d'un site éclairci (BA) du secteur Nord (a), du site éclairci (LH) du secteur Sud-Est (b) et des sites éclaircis (U et P) du secteur Sud (c). Les zones grises indiquent les périodes de défoliation par la TBE. La ligne verticale pointillée montre l'année de l'EPC. Les valeurs inscrites avant et après la ligne pointillée sont les moyennes de l'ASV pour une période de 10 ans avant et 10 ans après l'EPC. Des lettres différentes entre les deux moyennes représentent une différence significative selon le test de t apparié ($\alpha = 0,05$). n = nombre d'individus analysés par site.

Tableau 3 : Tests de t appariés par site entre les moyennes de l'accroissement annuel en diamètre au DHP pour une période de 10 ans avant et 10 ans après l'EPC pour les épinettes noires (a) et les sapins baumiers (b).

a)

Épinette										
Secteur	Site	Traitement	Année	Moyenne		différence	Dl	$P> t $	$P>t$	$P<t$
				Avant	Après					
Nord	BA	EPC	1973	2,48	1,85	-0,63	27	<,0001	1,0000	<,0001
	BB	EPC	1973	1,91	1,69	-0,21	23	0,0115	0,9943	0,0057
	BD	Témoin	1973	2,27	1,63	-0,64	21	<,0001	1,0000	<,0001
	BD2	Témoin	1973	2,03	1,46	-0,57	9	0,0001	0,9999	<,0001
Sud	U	EPC	1973	3,57	2,72	-0,85	12	<,0001	1,0000	<,0001
Sud-Est	LH	EPC	1973	3,97	2,77	-1,20	13	<,0001	1,0000	<,0001

b)

Sapin										
Secteur	Site	Traitement	Année	Moyenne		différence	Dl	$P> t $	$P>t$	$P<t$
				Avant	Après					
Nord	BA	EPC	1973	2,13	1,64	-0,49	3	0,0614	0,9693	0,0307
	Sud	P	1971	2,49	1,33	-1,16	16	<,0001	1,0000	<,0001
		U	EPC	1,90	1,47	-0,43	10	0,0007	0,9996	0,0004
Sud-Est	LH	EPC	1973	2,22	1,39	-0,83	17	<,0001	1,0000	<,0001

Note : EPC= Éclaircie précommerciale

Secteur Nord

Les tiges d'épinette noire des deux peuplements éclaircis du secteur Nord ont été regroupées ensemble de façon à comparer leur accroissement avec les tiges provenant des deux sites témoins (Figure 6). Les résultats de l'analyse de variance à mesures répétées n'ont pas révélé de différence significative entre les tiges des peuplements éclaircis et les tiges des peuplements non éclaircies pour l'accroissement annuel en diamètre au DHP ($P=0,9687$, Tableau 4a) et pour l'accroissement cumulé en diamètre au DHP ($P=0,8659$, Tableau 5a). Ce qui veut dire que soit les patrons d'accroissement étaient similaires entre les épinettes noires des peuplements éclaircis et non éclaircis, soit le nombre de sites (2 éclaircis et 2 témoins) était insuffisant pour détecter une différence statistiquement significative. L'accroissement cumulé des tiges des sites éclaircis était légèrement supérieur aux tiges des sites non traités (Figure 6a). Pour l'accroissement annuel en diamètre, les tiges des sites éclaircis dominaient les tiges des sites témoins depuis la première année d'observation soit 1946, mais vers 1961 les deux courbes semblent se fusionner jusqu'en 1980 où les tiges des sites éclaircis reprenaient un léger avantage sur les tiges des sites témoins (Figure 6b). Cependant, l'analyse univariée n'a pas relevé de différence significative entre les deux groupes pour une quelconque période de croissance (Tableaux 4b et 5b). Donc, cette différence observée était peut-être anecdotique, peut-être aussi qu'il manquait des sites pour détecter une différence significative.

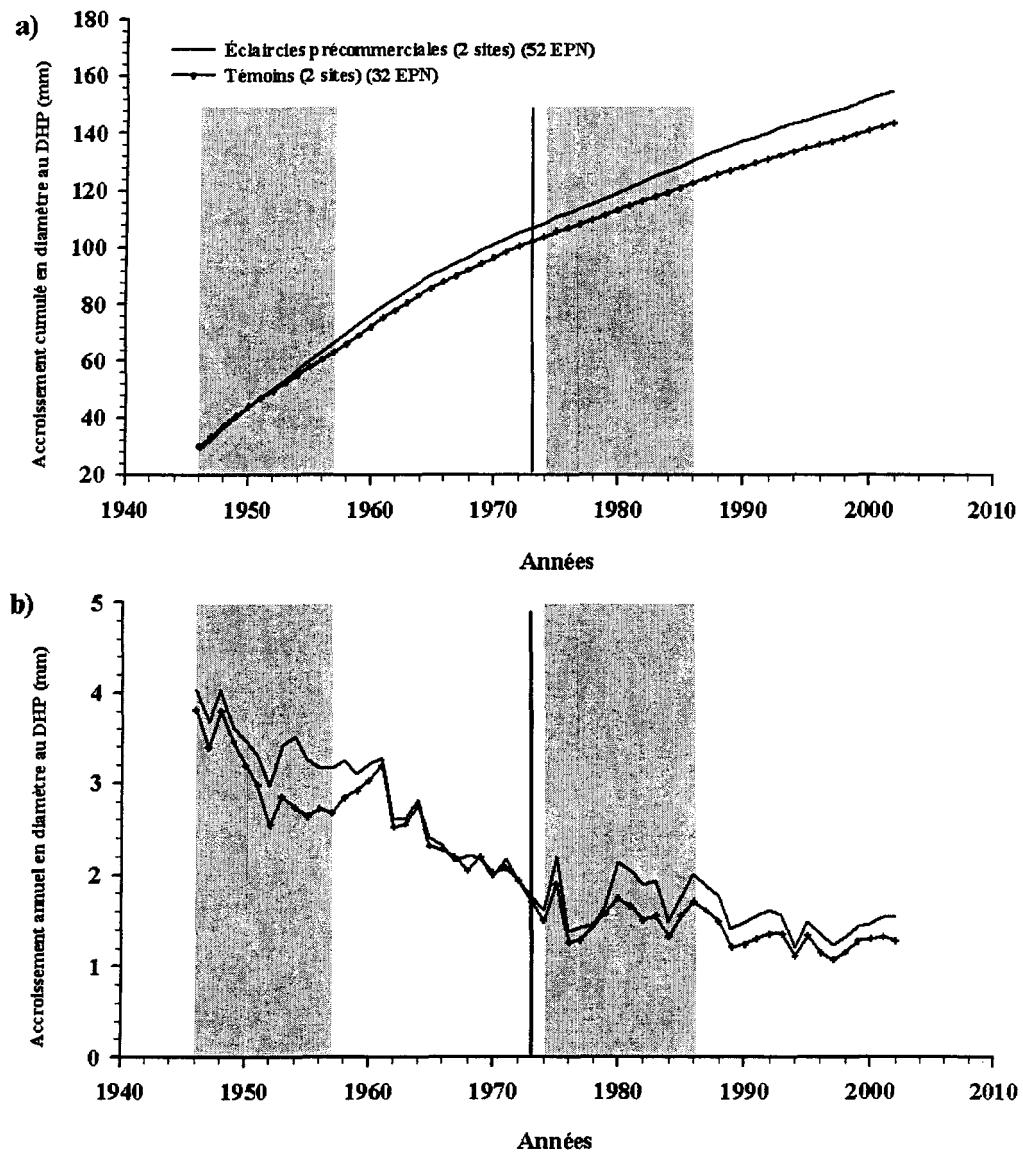


Figure 6 : Courbes moyennes de l'accroissement cumulé en diamètre au DHP (a) et de l'accroissement annuel en diamètre au DHP (b) des épinettes noires des sites témoins et éclaircis du secteur Nord. La ligne verticale indique l'année de l'EPC. Les zones grises montrent les périodes de défoliation par la TBE.

Notes : DHP= diamètre à hauteur de poitrine; EPN= Épinette noire.

Tableau 4 : Résultats de l'analyse de variance factorielle à un facteur avec mesures répétées (ANOVAR) (a) et de l'analyse univariée de certaines années de croissance (b) pour l'accroissement annuel en diamètre au DHP des épinettes noires du secteur Nord selon l'intervention (Témoin et EPC).

(a) ANOVAR						
Source	dl	Valeur	F	P > F	PG-G	PH-F
Intergroupe						
Intervention	1	0,4898118	0,9796	0,4266		
Intragroupe						
Temps	56	8,26E+13	59,0839	<,0001	0,0065	<,0001
Temps x Intervention	56	1,45E+12	0,6371	0,9687	0,5353	0,6776
(b) Analyse univariée pour certaines années de croissance						
Source	Année	dl	Valeur	F	P > F	
Intervention	1947	1	2,2934489	4,5869	0,1655	
Intervention	1950	1	0,0627412	0,1255	0,7570	
Intervention	1955	1	0,7147750	1,4296	0,3544	
Intervention	1960	1	0,0138195	0,0276	0,8832	
Intervention	1965	1	0,7665104	1,5330	0,3413	
Intervention	1970	1	2,4262426	4,8525	0,1585	
Intervention	1973*	1	0,4866886	0,9734	0,4278	
Intervention	1975	1	1,1746370	2,3493	0,2650	
Intervention	1980	1	0,1472750	0,2946	0,6417	
Intervention	1985	1	0,0004115	0,0008	0,9797	
Intervention	1990	1	0,0000735	0,0001	0,9914	
Intervention	1995	1	0,0429959	0,0860	0,7970	
Intervention	2000	1	0,0195655	0,0391	0,8615	
Intervention	2002	1	0,0379015	0,0758	0,8089	

* Année de l'éclaircie précommerciale

Tableau 5 : Résultats de l'analyse de variance factorielle à un facteur avec mesures répétées (ANOVAR) (a) et de l'analyse univariée de certaines années de croissance (b) pour l'accroissement cumulé en diamètre au DHP des épinettes noires du secteur Nord selon l'intervention (Témoin et EPC).

(a) ANOVAR						
Source	dl	Valeur	F	P > F	PG-G	PH-F
Intergroupe						
Intervention	1	0,133974	0,2679	0,6563		
Intragroupe						
Temps	56	7,61E+12	322,4678	<,0001	0,0027	<,0001
Temps x Intervention	56	5,85E+10	0,7654	0,8659	0,4759	0,5296
(b) Analyse univariée pour certaines années de croissance						
Source	Année	dl	Valeur	F	P > F	
Intervention	1947	1	0,3089410	0,6179	0,5142	
Intervention	1950	1	0,1901083	0,3802	0,6003	
Intervention	1955	1	0,4689568	0,9379	0,4350	
Intervention	1960	1	0,3484070	0,6968	0,4917	
Intervention	1965	1	0,2387319	0,4775	0,5610	
Intervention	1970	1	0,1776343	0,3553	0,6116	
Intervention	1973*	1	0,1583656	0,3167	0,6303	
Intervention	1975	1	0,1609526	0,3219	0,6277	
Intervention	1980	1	0,1919322	0,3839	0,5987	
Intervention	1985	1	0,2883747	0,5767	0,5269	
Intervention	1990	1	0,3888516	0,7777	0,4709	
Intervention	1995	1	0,4471779	0,8944	0,4441	
Intervention	2000	1	0,4823090	0,9646	0,4296	
Intervention	2002	1	0,4823361	0,9647	0,4296	

* Année de l'éclaircie précommerciale

Effets de l'épidémie

Pour les trois secteurs étudiées, le moment et la durée des deux dernières épidémies de la TBE du 20^{ième} siècle ont pu être identifiés, soit entre 1946-1957 et 1974-1986 pour le secteur Nord, entre 1945-1958 et 1974-1986 pour le secteur Sud et Sud-Est (Figures 2 à 5).

La ligne verticale pointillée indique l'année des EPC qui ont été réalisées en 1973 pour la plupart des sites et en 1971 pour le site P, soit approximativement au début de l'épidémie de TBE (Figures 2 à 5).

Épinette noire

Pour le secteur Nord, les courbes moyennes des témoins et des sites éclaircies variaient d'une façon similaire (Figure 2a). Par exemple, durant la période endémique de 1958 à 1973, l'accroissement annuel en diamètre au DHP diminuait graduellement. Dès le début de l'épidémie et tout de suite après l'EPC, l'accroissement annuel en diamètre au DHP augmentait faiblement entre 1974-1975, diminuait de 1976 à 1979 et remontait à partir de 1980. Les diminutions de l'accroissement annuel en diamètre durant la dernière épidémie (1974-1986) étaient plus marquées chez les épinettes noires des secteurs Sud et Sud-Est surtout pour les années 1978-1979 (Figures 2b et 2c).

Pour l'accroissement spécifique en volume (ASV, Figure 3), les variations annuelles étaient similaires aux courbes d'accroissement annuel en diamètre au DHP, en particulier pendant la dernière épidémie de TBE (1974-1986). Pour les épinettes analysées, ceci

démontre que la croissance de l'ensemble de la tige a été affectée par les deux dernières épidémies de TBE.

Sapin baumier

Pour le secteur Nord, la courbe de la variation de l'accroissement annuel en diamètre au DHP représente la moyenne de seulement quatre sapins (Figure 4a). Néanmoins, le pic de réduction de l'accroissement de la dernière épidémie vers 1978-1980 et celui durant l'épidémie de 1946-1957 étaient nettement visibles.

Les courbes obtenues pour les secteur Sud et Sud-Est (Figures 4b et 4c) montrent également un pic de réduction d'accroissement en diamètre durant l'épidémie de 1946-1957 et un second pic durant l'épidémie de 1974-1986. Ces réductions étaient très marquées pour les sites du secteur Sud.

Pour l'épinette noire, les courbes de l'accroissement spécifique en volume (ASV, Figure 5) variaient d'une façon similaire aux courbes d'accroissement annuel en diamètre (Figure 4). Ces résultats indiquent que les épidémies ont affectées sévèrement la croissance des tiges de sapin baumier.

Corrélations entre l'ASV avant et après l'épidémie de TBE

Les corrélations entre l'ASV moyen d'une période de 10 ans avant l'épidémie de TBE et l'ASV moyen de 10 ans après cette perturbation étaient positives et significatives

pour les épinettes noires et les sapins baumiers (Tableau 6). Ce qui veut dire que la croissance après l'épidémie dépendait en partie de la croissance avant l'épidémie.

Tableau 6 : Corrélations entre l'ASV moyen d'une période de 10 ans avant l'épidémie de TBE et l'ASV moyen de 10 ans après l'épidémie de TBE pour l'épinette noire et le sapin baumier.

Espèce	n	Moyenne 10 ans avant TBE et EPC	Moyenne 10 ans après TBE	r	P
EPN	26	0,1712	0,1203	0,6665	0,0002
SAB	17	0,1421	0,1342	0,7589	0,0004

Note : EPC= Éclaircie précommerciale; TBE= Tordeuse des bourgeons de l'épinette; EPN= Épinette noire; SAB= Sapin baumier.

Discussion

Caractéristiques des sites

Les EPC réalisées dans les peuplements résineux boréaux et datant du début des années 1970 dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean étaient très rares. Plusieurs différences étaient observées entre ces peuplements à propos de la composition en espèces, de la surface terrière, de la densité, de l'origine, de l'altitude, du sol, de l'année de l'EPC (Tableau 1) ainsi que de l'âge et du DHP moyen des tiges traitées (Tableau 2). En dépit de ces différences, du nombre restreint de sites et des grandes distances géographiques entre les secteurs (Tableau 1), des similitudes étaient observées à propos des techniques d'éclaircies et des effets de l'EPC et de la TBE sur la croissance des tiges traitées.

Techniques d'éclaircies

Selon les normes, les EPC réalisées aujourd'hui se font dans des peuplements âgés de 5 à 20 ans et ayant des hauteurs de 2 à 6 m (Legris et Couture 1999). Les peuplements éclaircis de cette étude ont été traités alors qu'ils étaient âgés de plus de 30 ans et que la moyenne des tiges était de taille commerciale ($DHP \geq 9,1$ cm) lors du traitement d'éclaircie dite précommerciale (Tableau 2). Ce qui correspond à des tiges nettement plus grosses et plus âgées que celles traitées selon les normes actuelles. En fait, l'intervention correspondrait à un nettoiement (Métro 1975) réalisé dans des gaulis-perchis visant à éliminer les arbres, principalement les feuillus, (Tableau 1) des strates inférieures au profit des résineux et des feuillus ne pouvant être abattus à la hachette. Il serait aussi juste de dire

qu'il s'agissait d'éclaircies non-commerciales car elles ont été réalisées dans des peuplements où les tiges étaient en moyenne de taille marchande, mais sans qu'il n'y ait de récolte (Lussier, J.M., comm. Pers. janvier 2006). De plus, les techniques d'éclaircies n'étaient pas réglementées à cette époque et elles étaient réalisées par une main d'œuvre peu qualifiée. Ceci démontre que ces éclaircies n'ont pas été réalisées selon les normes d'aujourd'hui. Il faut donc être prudent avant d'appliquer les résultats de cette étude sur des EPC récentes.

Croissance suite à l'éclaircie et importance des épidémies de la TBE

Dans tous les sites éclaircis, il n'y avait pas d'augmentation de l'accroissement en diamètre au DHP et de l'ASV suite à l'intervention que ce soit pour le sapin baumier (Figures 4 et 5; Tableau 3b) ou l'épinette noire (Figures 2 et 3; Tableau 3a). Pour les épinettes noires du secteur Nord, l'analyse de l'accroissement annuel en diamètre au DHP (Figure 6b) ainsi que de l'accroissement cumulé en diamètre au DHP (Figure 6a) ne montre pas de différence significative entre les sites témoins et éclaircis, que ce soit avant ou après l'éclaircie (Tableaux 4 et 5). Cependant, le peu de sites par catégorie (2 témoins et 2 éclaircis) donne une faible puissance au test statistique, ce qui ne permet peut-être pas de détecter une différence statistiquement significative (Steidl *et al.* 1997). Les résultats ne montrent donc pas d'augmentation observable et mesurable de la croissance des tiges des peuplements éclaircis suite à l'intervention. Une réaction favorable à l'éclaircie est pourtant bien connue et observée pour un grand nombre de conifères (Barbour *et al.* 1992; Doucet et

Boily 1996; Karsh *et al.* 1994; Ker 1987; Morris *et al.* 1994; Piene 1982; Pothier et Margolis 1991; Pothier 2002; Vézina et Doucet 1969; Zhang *et al.* 1998) et de feuillus (Rice *et al.* 2001; Simard *et al.* 2004) d'Amérique du nord et également pour plusieurs espèces d'Europe (Peltola *et al.* 2002; Pettersson 1993; Plauborg 2003; Ruha et Varmola 1997).

Trois facteurs peuvent expliquer ces résultats. Il est possible que ce soit des tiges beaucoup plus petites que celles laissées sur pied qui aient été coupées lors de l'intervention. Dans ce cas, les tiges traitées n'étaient pas en compétition pour les ressources avec les tiges coupées parce qu'elles les dominaient dans le peuplement. L'éclaircie n'aurait donc pas procuré beaucoup de ressources, surtout de lumière, aux tiges traitées après l'intervention (Pothier et Margolis 1991), d'où l'absence de réaction suite à l'intervention. La densité initiale est un autre facteur qui aurait pu influencer la réponse à l'éclaircie (Piene et Anderson 1987; Schneider 2001). En effet, si la densité des peuplements était faible, une éclaircie n'aurait pas beaucoup changée l'environnement des tiges traitées. Cette donnée est cependant inconnue dans cette étude. Enfin, le troisième facteur concerne l'impact de la dernière épidémie de TBE qui aurait pu empêché l'augmentation de la croissance des tiges traitées en raison de l'effet contraire de l'éclaircie et de la TBE sur la croissance. Cet effet semble également avoir affecté des peuplements de sapins baumiers de l'est du Québec, éclaircis en 1978 alors qu'ils étaient âgés de 20 ans (Pothier 2002) et des peuplements d'épinettes noires de Terre-Neuve éclaircis en 1977 à l'âge de 25 ans (Newton 1988).

Dans tous les sites étudiés, les résultats montrent des réductions de l'accroissement en diamètre au DHP (Figures 2 et 4) et de l'ASV (Figures 3 et 5) durant la dernière épidémie de la TBE. Des réductions importantes sont également observables pour l'épidémie de 1945-1958 chez la majorité des tiges étudiées dont la hauteur était supérieure à 1,3 m au début de cette période. Les variations de l'accroissement en diamètre étaient semblables à celles rapportées dans d'autres études de dendrochronologie réalisées dans la région (Morin 1994; Morin et Laprise 1990). La croissance des tiges des sites témoins, tout comme celle des tiges des sites éclaircis, a été réduite par l'épidémie. D'importantes réductions de l'ASV pendant la dernière épidémie ont également été observées pour des peuplements de sapins baumiers éclaircis en 1971 à l'âge de 25-30 ans en Nouvelle-Écosse, les peuplements témoins montraient également de grandes réductions (Piene *et al.* 2003).

Évidemment, l'intensité de cette diminution varie selon les sites et dépend possiblement de plusieurs facteurs liés aux caractéristiques de la perturbation, comme la durée et l'intensité de la défoliation par la TBE (Maclean 1984). De facteurs liés au site d'étude comme par exemple la texture du dépôt et le drainage (Archambault *et al.* 1990), la densité (Maclean 1984), la composition en espèces (Bergeron *et al.* 1995; MacKinnon et MacLean 2004) et la température (Blais 1985b) et des facteurs liés à la tige elle-même, comme l'espèce, l'âge (Maclean 1984), la taille et la position de la tige dans le peuplement (Bergeron *et al.* 1995; Lussier *et al.* 2002). Cependant, en faisant abstraction de ces différences entre les sites, toutes les tiges étudiées ont été affectées par cette perturbation et la croissance a été diminuée par la dernière ou les deux dernières épidémies de TBE.

Vulnérabilité des tiges à la TBE

L'éclaircie devrait diminuer la vulnérabilité des tiges à la TBE en augmentant leur vigueur (Coyea et Margolis 1994; Pothier 2002; Thibault *et al.* 1995). Les résultats de l'étude ne montrent pas de différence significative entre les épinettes noires traitées et témoins du secteur Nord à propos de l'accroissement annuel et cumulé en diamètre (Tableaux 4 et 5). En admettant la croissance comme un indice de vigueur (Thibault *et al.* 1995), la vulnérabilité à la TBE des tiges des sites éclaircis ne semble pas réduite suite à l'intervention puisque les courbes moyennes d'accroissement sont similaires aux témoins. Cependant, le fait que les moyennes soit celles des tiges dominantes et co-dominantes ayant survécu à l'épidémie de TBE biaise les résultats, car les tiges mortes n'étaient pas incluses dans ces moyennes. Finalement, la faible puissance du test statistique en raison du petit nombre de sites ne permet pas d'élaborer davantage sur ce sujet.

Certains auteurs proposent que l'éclaircie serait une pratique préventive afin de diminuer la vulnérabilité des tiges contre les effets négatifs de la TBE, si cette intervention est pratiquée au moins trois ans avant l'épidémie. Cependant, si elle se réalise en période épidémique, l'intervention augmentera la vulnérabilité des tiges (Bauce *et al.* 2001). L'efficacité de l'éclaircie dépendrait donc de la période où elle est pratiquée en fonction de l'épidémie de TBE. Pour cette étude, les éclaircies ont été réalisées une et trois ans avant le début de la défoliation par la TBE. Aucune augmentation de l'accroissement n'est observée dans ces sites (Figures 2 à 5; Tableau 3). Cependant, l'absence d'augmentation d'accroissement ne signifie pas qu'il n'y a pas d'avantage à pratiquer l'éclaircie dans ces conditions. Par exemple, il est possible que la survie, suite à l'épidémie, de certaines tiges

traitées soit le résultat favorable de l'éclaircie sur ces tiges, mais il est impossible de l'évaluer dans cette étude. Pour pouvoir bien répondre à cette hypothèse, il aurait fallu plus de sites témoins, des éclaircies plus vieilles, ainsi que d'autres effectuées pendant l'épidémie de TBE. Or, de tels sites n'existent pas dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. L'autre option serait d'attendre la prochaine épidémie de TBE et d'étudier les éclaircies qui ont été faites récemment et qui se feront dans le futur.

Comme l'effet de l'éclaircie sur l'accroissement des tiges n'est pas visible, des corrélations ont été réalisées dans le but d'évaluer si l'ASV moyen des 10 dernières années avant l'épidémie de TBE avait un impact sur l'ASV moyen de 10 ans après la perturbation. Les résultats montrent des corrélations positives et significatives pour les épinettes noires ($r = 0,6665; P = 0,0002$) et les sapins baumiers ($r = 0,7589; P = 0,0004$) (Tableau 6). Ce résultat suggère qu'un arbre ayant eu une croissance supérieure à la moyenne avant l'épidémie, donc étant plus vigoureux (Thibeault *et al.* 1995), restera avec une croissance supérieure à la moyenne des tiges après défoliation. Les tiges, pour la plupart, maintiennent donc leurs différences hiérarchiques après l'épidémie, tel que le suggère les différences d'accroissement entre les individus. Ces résultats sont en accord avec les autres études indiquant que la vulnérabilité des tiges à la TBE dépend de leur vigueur avant et au début de l'épidémie (Coyea et Margolis 1994; Lussier *et al.* 2002, Thibault *et al.* 1995).

Contrairement à d'autres études (Doucet et Boily 1996; Karsh *et al.* 1994; Ker 1987; Piene 1982; Pothier et Margolis 1991; Pothier 2002; Vézina et Doucet 1969; Zhang *et al.* 1998), l'augmentation de la croissance suite à l'éclaircie n'a pas été observée pour cette recherche. En supposant que l'épidémie de TBE était un facteur limitant à

l'augmentation de la croissance et en appliquant l'hypothèse de Bauce *et al.* (2001) selon laquelle l'efficacité de l'éclaircie dépendrait de la période où elle est réalisée en fonction de l'épidémie de TBE, il est possible que les éclaircies auraient eu un effet sur la vulnérabilité si celles-ci auraient été réalisées quelques années de plus avant l'épidémie. Il faut noter que cette analyse a été réalisée sur des arbres dominants et co-dominants des peuplements ayant survécu à la dernière épidémie de TBE. Ces observations ne tiennent pas compte de la mortalité des tiges, donc de l'ensemble des tiges dominantes des peuplements. De plus, la relation entre la vulnérabilité et la vigueur s'estompe à de hauts niveaux de défoliation et dans ces conditions, même les arbres les plus vigoureux deviennent vulnérables à la TBE (Thibault *et al.* 1995).

Conclusion

Les EPC étudiées dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et datant du début des années 1970, ont été réalisées en ciblant particulièrement les feuillus, dans des peuplements composés de tiges plus âgées et de tailles supérieures aux tiges traitées aujourd’hui. Il semble qu'il soit plus juste de parler d'éclaircies non-commerciales. Les sites témoins ont également été difficiles à trouver en raison du manque de connaissances sur la composition des sites avant l'intervention et parce que les éclaircies retenues pour l'étude étaient dans des secteurs d'intenses activités forestières, elles ont été faites mur à mur dans les peuplements, contiguës à des obstacles naturels (lac, rivière, etc.) et à des coupes réalisées avant et après l'éclaircie. Les éclaircies réalisées dans ces sites ne semblent pas avoir augmenté l'accroissement en diamètre au DHP et l'accroissement spécifique en volume (ASV) des tiges traitées. Les épidémies de TBE ont aussi affecté les peuplements d'épinettes noires éclaircis ou non. Certains résultats suggèrent que la vulnérabilité des épinettes noires traitées du secteur Nord (secteur avec témoins) face à la dernière épidémie de TBE n'a pas été diminuée suite au traitement, puisque les courbes de croissance sont similaires aux témoins. Il semble toutefois que la vulnérabilité des tiges à la TBE dépend de leur vigueur avant l'épidémie. Cependant, ces résultats ont été obtenus à partir de tiges dominantes ayant survécu à l'épidémie de TBE. L'ensemble de ces résultats suggère que les effets bénéfiques de l'éclaircie sur la croissance ont été atténués par la dernière épidémie de TBE. Or, il faut demeurer prudent au niveau de la portée des résultats en raison du nombre de sites étudiés. Les éclaircies réalisées une à trois ans avant une épidémie n'ont

pas eu d'effet positif sur la croissance des tiges traitées. Des éclaircies plus vieilles et des éclaircies réalisées pendant l'épidémie de TBE n'ont cependant pas été étudiées pour vérifier l'effet sur la croissance du moment où l'on pratique l'éclaircie en fonction de l'épidémie. Finalement, les résultats confirment que les épidémies de TBE font partie de la dynamique forestière boréale et qu'il faut prendre en compte cette perturbation dans l'estimation des rendements des éclaircies. À la lumière de ces résultats, il serait important que dans l'avenir des placettes échantillons non traitées soient conservées près des secteurs éclaircis afin d'avoir des témoins pour des études ultérieures.

Références

- Archambault, L., Gagnon, R.R., Pelletier, G., Chabot, M., et Bélanger L., 1990. Influence du dépôt sur la vulnérabilité du Sapin baumier et de l'Épinette blanche aux attaques de la Tordeuse des bourgeons de l'épinette. Can. J. For. Res. 20: 750-756.
- Barbour, R.J., Bailey, R.E., et Cook, J.A., 1992. Evaluation of relative density, diameter growth, and stem form in a red spruce (*Picea rubens*) stand 15 years after precommercial thinning. Can. J. For. Res. 22: 229-238.
- Batzer, H.O., 1967. Spruce budworm defoliation is reduced most by commercial clearcutting. USDA Forest Service Research Note NC-36.
- Bauce, E., 1996. One and two years impact of commercial thinning on spruce budworm feeding ecology and host tree foliage production and chemistry. For. Chron. 72: 393-398.
- Bauce, E., Carisey, N., et Dupont, A., 2001. Implications des relations alimentaires plante-insecte dans la lutte contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Colloque sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Shawinigan, Québec. ISBN 0-662-86034-9.

Bergeron, Y., Leduc, A., Morin, H., et Joyal, C., 1995. Balsam fir mortality following the last spruce budworm outbreak in northwestern Quebec. Can. J. For. Res. 25: 1375-1384.

Blais, J.R., 1957. Some relationships of the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Clem.) to black spruce, *Picea mariana* (Moench) Voss. For. Chron. 33: 364-372.

Blais, J.R., 1962. Collection and analysis of radial growth data from trees for evidence of past spruce budworm outbreaks. For. Chron., 38: 474-484

Blais, J.R., 1965. Spruce budworm outbreaks in the past three centuries in the Laurentide Park, Québec. For. Sci., 11: 130-138.

Blais, J.R., 1983. Trends in the frequency, extent, and severity of spruce budworm outbreaks in eastern Canada. Can. J. For. Res. 13: 539-547.

Blais, J.R., 1985a. Répercussions des invasions de la tordeuse des bourgeons de l'épinette sur le sapin baumier et l'épinette blanche dans la réserve des Laurentides (Rapport d'étape). Rapport d'information Lau-X-68F, Centre de foresterie des Laurentides, Service canadien des forêts, Sainte-Foy (Québec) 16 p.

- Blais, J.R., 1985b. The ecology of the eastern spruce budworm : a review and discussion.
Dans Recent Advances in Spruce Budworm Research. Proceeding of the CANUSA Spruce Budworm Research Symposium, Bangor, Maine, 16 au 20 septembre 1984.
Sous la direction de C.J. Sanders, R.W. Stark, E.J. Mullins et J. Murphy. Service canadien des forêts et USDA Forest Service. P. 49-59
- Brissette, J.C., Frank, Jr., R.M., Stone, T.L., et Skratt, T.A., 1999. Precommercial thinning in a northern conifer stand: 18-years results. *For. Chron.* 75, 967-972.
- Coyea, M.R., et Margolis, H.A., 1994. The historical reconstruction of growth efficiency and its relationship to tree mortality in balsam fir ecosystems affected by spruce budworm. *Can. J. For. Res.* 24 : 2208-2221.
- Crook, G.W., Vézina, P.E., et Hardy, Y., 1979. Susceptibility of balsam fir to spruce budworm defoliation as affected by thinning. *Can. J. For. Res.* 9: 428-435.
- Doucet, R., et Boily, J., 1996. Accroissement quinquennal de peuplement d'épinette noire soumis au dépressage. Note de recherche forestière n° 75. Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles du Québec, 12 p.

Duff, G.H., et Nolan, N.J., 1957. Growth and morphogenesis in the Canadian forest species. II. Specific increment and their relation to the quantity and activity of growth in *Pinus resinosa*. Can. J. Bot. 35: 527-572.

Fernandez, G.C.J., 1991. Repeated measure analysis of line-source sprinkler experiments. HortScience, 26: 339-342.

Guay, R., Gagnon, R., et Morin, H., 1992. A new automatic and interactive tree ring measurement system based on line scan camera. For. Chron. 68: 138-141.

Hardy, Y., Mainville, M., et Schmitt, D.M., 1986. An atlas of spruce budworm defoliation in Eastern North America, 1938-80. USDA For. Serv. Misc. Publ. 1449.

Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bull. 43: 69-78.

Husch, B., Miller, C.I., et Beers, T.W., 1982. Forest mensuration. J. Wiley & Sons, New York.

Karsh, M.B., Lavigne, M.B., et Donnelly, J.G., 1994. Growth response of the balsam fir and black spruce spacing trials. Information report Newfoundland and Labrador region, Can. For. Serv., St-John's, No. N-X-291. 35 p.

Ker, M.F., 1987. Effects of spacing on balsam fir: 25-year results from Green River spacing trials. In Proceeding of the precommercial thinning workshop, Fredericton, N.B., Can. For. Serv., Maritime region. pp. 58-75.

Krause, C., et Morin, H., 1999. Tree-ring patterns in stems and root systems of black spruce (*Picea mariana*) caused by spruce budworms. Can. J. For. Res. 29: 1583-1591.

Legris, J., et Couture, G., 1999. L'éclaircie précommerciale au Québec dans un cadre d'aménagement durable des forêts. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de l'environnement forestier, Québec, ISBN : 2-550-35701-9. 79 p.

Lussier, J. M., Morin H., et Gagnon, R., 1992. Comparaison de la croissance de marcottes d'épinette noire (*Picea mariana*) adultes après coupe à celle d'individus issus de graines après feu. Can. J. For. Res. 22: 1524-1535.

Lussier, J. M., Morin, H., et Gagnon, R., 2002. Mortality in black spruce stands of fire or clear-cut origin. Can. J. For. Res. 32: 539-547.

MacKinnon, W.E., et MacLean D.A., 2004. Effects of surrounding forest and site conditions on growth reduction of balsam fir and spruce caused by spruce budworm defoliation. Can. J. For. Res. 34: 2351-2362.

Maclean, D.A., 1980. Vulnerability of fir-spruce stands during uncontrolled spruce budworm outbreaks: a review and discussion. *For. Chron.*, 56: 213-221

Maclean D.A., 1984. Effects of spruce budworm outbreaks on the productivity and stability of balsam fir forests. *For. Chron.*, 60: 273-279.

MacLean, D.A., et Piene, H., 1995. Spatial and temporal patterns of balsam fir mortality in spaced and unspaced stands caused by spruce budworm defoliation. *Can. J. For. Res.* 25: 902-911.

Métro, A., 1975. Terminologie forestière. Sciences forestières, technologie, pratiques et produits forestiers, Association française des Eaux et Forêts, collection de terminologie forestière n° 2. 433 p.

MRN (Ministère des ressources naturelles du Québec), 1994. Le point d'observation écologique, normes techniques. Direction de la gestion des stocks forestiers, service des inventaires forestiers, Québec, ISBN : 2-551-13273-8. 116 p.

MRN (Ministère des Ressources naturelles du Québec), 2002. Le traitement d'éclaircie précommerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM, Avis scientifique. Comité consultatif scientifique du Manuel d'aménagement forestier. 126 p.

MRNFP (Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs du Québec), 2003.
Manuel d'aménagement forestier (4^e édition). Direction des programmes forestiers.
ISBN : 2-550-41174-9. pagination multiple.

MRNFP (Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs du Québec), 2004.
Rapport du comité scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité
forestière (Version synthèse). Direction de la recherche forestière. ISBN : 2-550-
43206-1. 109 p.

Morin, H., 1994. Dynamics of balsam fir forests in relation to spruce budworm outbreaks in
the Boreal Zone of Quebec. Can. J. For. Res. 24: 730-741.

Morin, H., et Gagnon, R., 1992. Comparative growth and yield of layer- and seed-origin
black spruce (*Picea mariana*) stands in Quebec. Can. J. For. Res. 22: 465-473.

Morin, H., et Laprise, D. 1990. Histoire récente des épidémies de la Tordeuse des
bourgeons de l'épinette au nord du Lac Saint-Jean (Québec) : une analyse
dendrochronologique. Can. J. For. Res. 20: 1-8.

Morris, D.M., Bowling, C., et Hills, S.C., 1994. Growth and form response to pre-
commercial thinning regimes in aerially jack pine stands: 5th year results. For.
Chron. 70 : 780-787.

Nemec, A.F.L., 1996. Analysis of repeated measures and time series: an introduction with forestry examples. Biom. Inf. Handb. 6. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work. Pap. 15/1996. 83 p.

Newton, P.F., 1988. Initial response of partially defoliated black spruce trees to precommercial thinning. Can. For. Serv., Nfld. For. Cent., St. John's, Nfld. Inf. Rep. N-X-264. 24 p.

OIFQ (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec), 1996. Manuel de foresterie. Les presses de l'Université Laval, Québec et Ottawa, ISBN 2-7637-7479-2. 1428 p.

Peltola, H., Miina, J., Rouvinen I., et Kellomäki, S., 2002. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine. Silva Fennica. 36(4): 813-825.

Pettersson, N., 1993. The effect of density after precommercial thinning on volume and structure in *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands. Scand. J. For. Res. 8: 528-539.

Piene, H., 1981. Early growth response to operational spacing in young balsam fir stands on the Cape Breton Highlands, Nova Scotia. Can. For. Serv., Marit. For. Res. Cent., Fredericton, NB, Canada, Inf. Rep. M-X-125. 29 p.

Piene, H., 1982. Timing of spacing operations in young balsam fir stands. *For. Chron.* 58: 93-95.

Piene, H., 1989. Spruce budworm defoliation and growth loss in young balsam fir: defoliation in spaced and unspaced stands and individual tree survival. *Can. J. For. Res.* 19: 1211-1217.

Piene, H., et Anderson, W.F.A., 1987. Ten-year growth response to spacing in young balsam fir stands, Cape Breton Highlands, Nova Scotia. Precommercial thinning workshop, Fredericton, N.B., The New Brunswick forest research advisory committee, 76-85.

Piene, H., Maclean, D.A., et Landry, M., 2003. Spruce budworm defoliation and growth loss in young balsam fir : relationships between volume growth and foliage weight in spaced and unspaced, defoliated and protected stands. *For. Ecol. Manage.* 179: 37-53.

Plauborg, K.U., 2003. Analysis of radial growth response to changes in stand density for four tree species. *For. Ecol. Manage.* 188: 65-75.

- Pothier, D., et Margolis, H.A., 1991. Analysis of growth and light interception of balsam fir and white birch saplings following precommercial thinning. *Ann. Sci. For.* 48: 123-132.
- Pothier, D., 1998. Développement de sapinières éclaircies exposées à une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette. *For. Chron.* 74 : 91-99.
- Pothier, D., 2002. Twenty-years results of precommercial thinning in a balsam fir stand. *For. Ecol. Manage.* 168 : 179-188.
- Rice, J.A., Macdonald, G.B., et Weingartner, D.H., 2001. Precommercial thinning of trembling aspen in northern Ontario: Part 1- Growth response. *For. Chron.* 77, 893-901.
- Robitaille, A., et Saucier, J.P., 1998. Paysages régionaux du Québec méridional. Les publications du Québec, Sainte-Foy, Québec, ISBN 2-551-17737-5. 213 p.
- Ruha, T., et Varmola, M., 1997. Precommercial thinning in naturally regenerated Scots pine stands in northern Finland. *Silva Fennica.* 31(4): 401-415.
- SAS Institute Inc., 1988a. SAS procedures guide, release 6.03 ed. SAS Institute Inc., Cary, N.C.

SAS Institute Inc., 1988b. SAS/STAT. User's guide, release 6.03 ed. SAS Institute Inc.,

Cary, N.C.

SAS Institute Inc., 2003. JMPin® version 5.1: Statistics and graphic guide. SAS Institute Inc., Cary, N.C., 101 P.

Scheiner, S.M., et Gurevitch, J., 1993. Design and analysis of ecological experiments. Chapman & Hall Inc., New York, Londres.

Schneider, R., 2001. Effet d'une éclaircie précommerciale 28 ans après traitement sur la productivité d'une sapinière en Gaspésie. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval. 29 p.

Simard, W.S., Blenner-Hassett, T., et Cameron, I.R., 2004. Pre-commercial thinning effects on growth, yield and mortality in even-aged paper birch stands in British Columbia. For. Ecol. Manage. 190: 163-178.

Steidl, R.J., Hayes, J.P., et Schauber, E., 1997. Statistical power analysis in wildlife research. J. Wildl. Manage. 61(2): 270-279.

Stokes, M.A., et Smiley, T.L., 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago, IL, USA: 73 p.

Swetnam, T.W., Thompson, M.A., et Sutherland, E.K., 1985. Spruce budworms handbook.

Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. U.S. Dep. Agric. Agric. Handb. 639.

Thibault, D., Bégin, J., et Bélanger, L., 1995. Relations entre les indicateurs de croissance du sapin baumier en début d'épidémie et sa vulnérabilité à la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Can. J. For. Res. 25 : 1292-1302.

Vézina, P.-E., et Doucet, R., 1969. L'effet d'une éclaircie sur la croissance quinquennale d'un peuplement de sapin baumier âgé de 15 ans. Nat. Can. 96. 225-242.

Waring, R.H., Savage, T., Cromack Jr., K., et Rose, C., 1992. Thinning and nitrogen fertilization in a grand fir stand infested with western spruce budworm. Part. IV. An ecosystem management perspective. For. Sci. 38: 275-286.

Westveld, M., 1954. A budworm vigor-resistance classification for spruce and balsam fir. J. For. 52: 11-23.

Zarnovican, R., 1985. Analyse de tige: une méthode à redécouvrir. Nat. Can. 112 : 253-260.

Zhang, S.Y., Corneau, Y., et Chauret, G., 1998. Impact of precommercial thinning on tree and wood characteristics, and product quality and value in balsam fir. Forintek Canada Corp., Eastern Division, Sainte-Foy, Québec, Project No 1108. 74 p.