



Résultats obtenus 5 ans après traitement dans les placettes du réseau de la mesure des effets réels de l'éclaircie commerciale en peuplements résineux

par Stéphane Tremblay et Vincent Laflèche

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 166

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Résultats obtenus 5 ans après traitement dans les placettes du réseau de la mesure des effets réels de l'éclaircie commerciale en peuplements résineux

par Stéphane Tremblay, ing.f., M. Sc. et Vincent Laflèche, ing.f., M. Sc.

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 166

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle développe de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité *ad hoc* formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Ressources naturelles
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, Québec (Québec)
Canada, G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mrn.gouv.qc.ca
Internet : www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche

© Gouvernement du Québec
On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière, du ministère des Ressources naturelles, sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

ISSN : 1183-3912
ISBN : 978-2-550-66106-1
ISBN (PDF) : 978-2-550-66107-8
F.D.C. 242
L.C. SD 396.5

Notes biographiques



Stéphane Tremblay est ingénieur forestier diplômé de l'Université Laval depuis 1993. En 1996, le même établissement lui décerne un diplôme de maîtrise ès sciences. Par la suite, il collabore à de nombreux projets portant notamment sur l'aménagement intégré et la certification environnementale, de même que sur la sylviculture et la production des forêts. Il a aussi été chargé de cours au Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval, de même que professeur au Cégep de Sainte-Foy.

Depuis 2000, il est chercheur à la Direction de la recherche forestière (DRF). Ses travaux portent sur les principaux traitements sylvicoles en forêts résineuses. Il est titulaire des projets faisant partie de la mesure des effets réels pour les coupes avec protection de la régénération et de la haute régénération, de celles avec protection des petites tiges marchandes ainsi que des traitements d'éclaircies précommerciale et commerciale. Il est aussi responsable de projets de recherche sur ces mêmes traitements ainsi que de celui destiné à définir les règles d'application de la coupe progressive irrégulière (CPI) en peuplements résineux. Mis à part ces projets, il réalise une recherche sur l'aménagement acériceo-forestier des érablières. De plus, il collabore au développement de la CPI dans les autres types de peuplements de même qu'à d'autres projets internes et externes à la DRF. Outre les activités de recherche, il participe à des comités scientifiques et techniques et il fournit des conseils en foresterie en lien avec les sujets de ses travaux.



Vincent Laflèche est ingénieur forestier diplômé de l'Université Laval depuis 1997. En 2000, le même établissement lui décerne un diplôme de maîtrise ès sciences. Par la suite, il devient professionnel de recherche en sylviculture au Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval. Les travaux auxquels il a

collaboré ont porté notamment sur la compréhension des effets des interventions forestières sur la régénération, la croissance et les risques de chablis dans la forêt boréale. En 2004-2005, il agit à titre d'attaché de recherche en sylviculture pour la Chaire industrielle de recherche CRSNG-Université Laval en sylviculture et faune.

De 2005 à 2008, il a été à l'emploi de la Direction de la recherche forestière à titre de chercheur. Il a alors collaboré aux projets de recherche sur la production des forêts résineuses avec Stéphane Tremblay. Depuis le printemps 2008, M. Laflèche est à l'emploi à la Direction de l'inventaire forestier où ses travaux portent principalement sur la productivité des stations.

Remerciements

La réalisation de cet ouvrage a été rendue possible grâce à l'implication de M. David Pothier, qui a été titulaire du projet et responsable de l'implantation et de la première mesure du réseau de placettes. Les remerciements s'adressent également à MM. Michel Beaulieu, Louis Faucher et Alain Langlois ainsi qu'aux équipes des bureaux régionaux et des unités de gestion du ministère des Ressources naturelles, pour la prise des données sur le terrain et leur support technique.

Les auteurs tiennent également à remercier Mmes Isabelle Auger et Lise Charette pour leur précieuse contribution lors des analyses statistiques. Leurs remerciements s'adressent aussi aux quatre réviseurs et à l'éditeur associé, pour leurs commentaires qui ont contribué à améliorer le document, ainsi qu'à MM. Pierre Bélanger et Jean Noël, Mmes Sylvie Bourassa, Brigitte Boudreault et Denise Tousignant pour la mise en page, le graphisme et l'édition. Ces travaux ont été financés dans le cadre du projet interne 1120558-112310058 de la DRF.

Résumé

Afin de quantifier les effets de l'éclaircie commerciale, un réseau de placettes-échantillons a été installé dans des pessières noires, des pinèdes grises et des sapinières du territoire forestier québécois à la fin des années 1990. La croissance des arbres, le rendement à l'hectare et la mortalité ont été analysés sur une période de 5 ans suivant le traitement.

À la suite de la coupe, l'accroissement en diamètre à hauteur de poitrine des arbres vivants a augmenté significativement dans les trois types de peuplement. Une relation positive a été notée entre la croissance quinquennale en diamètre des arbres et leur diamètre initial. À l'opposé, la croissance quinquennale en diamètre montre une relation négative avec la surface terrière ainsi qu'avec l'âge avant traitement. Le traitement a aussi augmenté l'accroissement en diamètre quadratique moyen des arbres marchands dans les pessières et les sapinières. D'ailleurs, ce sont ces dernières qui ont le plus réagi, avec une augmentation de 37 % du diamètre à hauteur de poitrine et de 47 % du diamètre quadratique moyen. Toujours dans les sapinières, le traitement a amélioré l'accroissement en diamètre quadratique moyen de 36 %, à l'échelle du collectif des 500 plus gros arbres à l'hectare.

Cinq ans après l'intervention, le volume marchand des peuplements témoins était supérieur au volume marchand cumulé (c'est-à-dire le volume vivant sur pied additionné au volume récolté) des peuplements traités. L'accroissement quinquennal en volume marchand a aussi été plus important dans les peuplements témoins que dans ceux traités. Dans les sapinières, une relation négative a été observée entre l'accroissement quinquennal et l'âge initial, et cette relation était plus marquée dans les peuplements traités. L'accroissement en volume sciage, quant à lui,

a été plus important dans les pessières et les pinèdes témoins que traités; toutefois, dans les sapinières, il a été semblable, peu importe le traitement. Dans les sapinières et les pinèdes, la mortalité quinquennale en volume marchand a été faible et est demeurée semblable dans les deux traitements; par contre, dans les pessières, elle a légèrement augmenté à la suite de l'intervention. La mortalité quinquennale a été proportionnelle à l'âge initial dans les pessières et les sapinières, à la surface terrière marchande initiale dans les pinèdes et les sapinières, et à la fertilité de la station dans les pessières uniquement.

Dans la présente étude, une forte proportion des peuplements avait des caractéristiques différentes de celles recherchées lors de l'application d'une éclaircie commerciale. Dans ces peuplements, le traitement réalisé est en fait une coupe partielle. Ainsi, en plus de renseigner sur les effets de l'éclaircie commerciale, les résultats obtenus informent sur ceux d'une gamme d'interventions partielles, lesquelles pourraient gagner en popularité dans le contexte de la mise en œuvre de l'aménagement écosystémique.

Bien que certains effets soient déjà observables après 5 ans, une période d'observation plus longue sera nécessaire afin de caractériser complètement les résultats à l'échelle des arbres individuels et des peuplements. De plus, bon nombre de peuplements sélectionnés se développent rapidement, voire même de manière exceptionnelle, comparativement à l'évolution prévue selon les tables de production disponibles pour des peuplements aux caractéristiques similaires. Il faudra donc être prudent avec l'utilisation des résultats.

Mots clés : éclaircie commerciale, coupe partielle, accroissement, production, croissance, sapin baumier, épinette noire, pin gris, diamètre, volume, mortalité.

Abstract

A network of sampling plots was installed during the late 1990s, to quantify the effects of commercial thinning treatments in stands dominated by black spruce, jack pine or balsam fir. Tree growth, productivity and mortality were analysed 5 years after the treatment.

After treatment, the dbh growth increment of live trees increased significantly in all three stand types. Five-year diameter growth was positively correlated with initial tree diameter, but negatively correlated with basal area and tree age before treatment. Mean quadratic diameter of merchantable trees also increased in treated spruce and balsam fir stands. The latter showed the strongest reaction, with a 37% increase in dbh and a 47% increase in mean quadratic diameter. In balsam fir stands, treatment also improved quadratic diameter growth increment by 36% for the 500 largest trees per hectare.

Five years after the intervention, the merchantable volume of control stands was greater than the cumulative merchantable volume (i.e. the sum of live standing and harvested volumes) of treated stands. The 5-year merchantable volume increment was also greater in control than in treated stands. In balsam fir stands, 5-year growth increment was negatively related to initial age, especially in treated stands. The sawtimber volume increment was greater in control

plots of spruce and jack pine stands, but did not significantly differ between treatments in balsam fir stands. In balsam fir and jack pine stands, 5-year mortality in merchantable volume was low and remained similar for both treatments; in spruce stands, however, it increased slightly after treatment. Five-year mortality was proportional to initial stand age in spruce and balsam fir stands, to initial basal area in jack pine and balsam fir stands, and to site quality in balsam fir stands only.

In this study, a large proportion of stands were not characteristic of those usually targeted for commercial thinning. In these cases, the applied treatment was, in fact, a partial cutting. Therefore, in addition to the effects of a commercial thinning, our results provide information on a range of partial interventions, which could become increasingly popular with the implementation of ecosystem-based management.

Although certain effects are already visible after 5 years, a longer observation period will be necessary to completely characterize results at the tree and stand scales. Furthermore, several of the selected stands show a rapid, even exceptional development, compared to the evolution predicted with available yield models for stands with similar characteristics. Therefore, we recommend caution in using these results.

Keywords : *commercial thinning, partial cutting, growth increment, productivity, growth, balsam fir, black spruce, jack pine, diameter, volume, mortality.*

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vi
Introduction	1
Chapitre premier – Matériel et méthodes	3
1.1 Réseau de placettes-échantillons et territoire d'étude	3
1.2 Implantation des placettes et cueillette des données	3
1.3 Traitements mathématiques et analyses statistiques	6
Chapitre deux – Résultats	9
2.1 Caractéristiques dendrométriques des peuplements avant et après traitement	9
2.2 Accroissement quinquennal	11
2.2.1 Diamètre des arbres marchands	11
2.2.1.1 À l'échelle des arbres individuels	11
2.2.1.2 À l'échelle des peuplements	11
2.2.2 Volumes marchand et sciage	11
2.3 Volumes 5 ans après traitement	12
2.4 Mortalité quinquennale	12
Chapitre trois – Discussion	25
Conclusion	31
Références bibliographiques	33

Liste des tableaux

Tableau 1.	Répartition des placettes-échantillons par région administrative	4
Tableau 2.	Proportion (%) des différents groupements d'essences dans chacun des trois grands types de peuplements	5
Tableau 3.	Valeurs du premier quartile (Q_1), de la moyenne (Moy) et du troisième quartile (Q_3) des covariables dans chacun des trois types de peuplements	8
Tableau 4.	Caractéristiques des peuplements témoins et traités dans chacun des trois types, avant et immédiatement après le traitement	10
Tableau 5.	Analyse de variance de l'accroissement quinquennal en dhp des arbres marchands et survivants lors du second inventaire	14
Tableau 6.	Analyse de variance de l'accroissement quinquennal en diamètre quadratique moyen de l'ensemble des arbres marchands (D_{qm}) et de celui des 500 plus gros arbres à l'hectare (D_{qm500})	16
Tableau 7.	Analyse de variance de l'accroissement quinquennal en volume marchand	17
Tableau 8.	Moyennes ajustées de l'accroissement quinquennal en volume marchand, dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), avec les covariables ou les interactions significatives	17
Tableau 9.	Analyse de variance de l'accroissement quinquennal en volume sciage	19
Tableau 10.	Analyse de variance du volume marchand et du volume sciage, 5 ans après traitement	20
Tableau 11.	Analyse de variance du volume marchand des arbres morts et chablis pendant les 5 ans suivant le traitement	21
Tableau 12.	Moyennes ajustées du volume marchand des arbres morts et chablis au cours des 5 ans après traitement, dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), avec les valeurs moyennes des covariables significatives	23

Liste des figures

Figure 1.	Carte de l'emplacement des paires de placettes-échantillons à l'échelle provinciale	4
Figure 2.	Répartition des placettes-échantillons selon le type de peuplement et le sous-domaine bioclimatique	5
Figure 3.	Schéma d'une paire de placettes-échantillons	6
Figure 4.	Répartition du nombre de placettes-échantillons, pour (a) les pessières, (b) les pinèdes et (c) les sapinières, selon les classes d'indice de qualité de station (IQS) déterminées avec l'équation de POTHIER et SAVARD (1998)	9
Figure 5.	Distribution moyenne des arbres par classe de dhp dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR) immédiatement après traitement, pour a) les pessières, b) les pinèdes et c) les sapinières	13
Figure 6.	Accroissement quinquennal en dhp des arbres marchands et survivants lors du second inventaire dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), obtenu avec les valeurs moyennes des covariables significatives	14
Figure 7.	Courbes ajustées par régression de l'accroissement quinquennal en dhp dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), selon a) le dhp initial (dhp_i), b) la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}) et c) l'âge initial du peuplement ($\hat{Age}_i$)	15
Figure 8.	Accroissement quinquennal en diamètre quadratique moyen 5 ans après traitement des peuplements témoins (TE) et traités (TR), pour a) l'ensemble des arbres marchands à l'hectare (D_{qm}) et b) les 500 plus gros arbres marchands à l'hectare (D_{qm500})	16
Figure 9.	Données utilisées et courbes ajustées par régression de l'accroissement quinquennal en volume marchand (V_m) selon l'âge initial ($\hat{Age}_i$), dans les sapinières témoins (TE) et traitées (TR)	18
Figure 10.	Données utilisées et courbes ajustées par régression de l'accroissement quinquennal en volume marchand (V_m) selon la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}), dans les pessières témoins (TE) et traitées (TR)	18
Figure 11.	Accroissement quinquennal moyen en volume sciage (V_s) dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR).....	19
Figure 12.	Valeurs de a) volume marchand moyen (V_m) et b) volume sciage moyen (V_s) mesurés 5 ans après traitement dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR)	20
Figure 13.	Données utilisées et courbes ajustées par régression du volume marchand des arbres morts et chablis 5 ans après traitement (V_{mmort}), selon l'âge initial ($\hat{Age}_i$), pour les pessières témoins (TE) et traitées (TR) croissant sur une station avec un IQS de 15 m	21

Figure 14.	Données utilisées et courbe ajustée par régression du volume marchand des arbres morts et chablis 5 ans après traitement (V_{mmort}), selon l'âge initial ($\hat{Age}_i$), pour les sapinières témoins (TE) et traitées (TR) ayant une surface terrière marchande initiale de $33 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$	21
Figure 15.	Données utilisées et courbe ajustée par régression du volume marchand des arbres morts et chablis (V_{mmort}) 5 ans après traitement, selon la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}), pour les pinèdes témoins (TE) et traitées (TR)	22
Figure 16.	Données utilisées et courbe ajustée par régression du volume marchand des arbres morts et chablis (V_{mmort}) 5 ans après traitement, selon la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}), pour les sapinières témoins (TE) et traitées (TR), dans un peuplement dont l'âge initial est de 47 ans	22
Figure 17.	Données utilisées et courbes ajustées par régression du volume marchand des arbres morts et chablis (V_{mmort}) 5 ans après traitement, selon l'IQS, pour les pessières témoins (TE) et traitées (TR), dans un peuplement dont l'âge initial est de 62 ans ...	22
Figure 18.	Nombre moyen d'arbres morts et chablis par classe de dhp dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), 5 ans après traitement, dans a) les pessières, b) les pinèdes et c) les sapinières	24

Introduction

Au Québec, la pratique de l'éclaircie commerciale est relativement nouvelle. Entre 1995 et 1999, ce traitement a connu une hausse de popularité; les superficies traitées annuellement dans les forêts publiques et privées sont passées de 3 900 à 12 100 ha (MRN 2002). Depuis, l'étendue des aires éclaircies annuellement est demeurée relativement stable. Toutefois, en considérant l'importance des superficies traitées en éclaircie précommerciale pendant les années 1990, un grand nombre de peuplements pourrait maintenant présenter des caractéristiques propices à la pratique d'une éclaircie commerciale. Il est donc fort probable que ce traitement gagne à nouveau en popularité au cours des prochaines années.

En l'absence de perturbation, le degré de compétition augmente graduellement dans un peuplement. Il en résulte une différenciation sociale parmi les arbres, accompagnée d'une baisse de croissance et d'une hausse de la mortalité de ceux en sous-étage (PRÉGENT 1998). L'éclaircie commerciale consiste à abattre une partie des arbres de dimensions marchandes dans un peuplement de structure régulière parvenu au stade de prématurité (MRN 2003). Ce traitement permet aussi de réduire le degré de compétition (NYLAND 1996) et de redistribuer les ressources de la station sur un nombre plus restreint de sujets. Le développement des arbres individuels résiduels s'en trouve favorisé (ZEIDE 2001 et 2006).

L'augmentation de la production totale d'un peuplement a longtemps été considérée comme le principal bénéfice du traitement (MFO 1992, MRN 1997). Toutefois, l'hypothèse maintenant retenue est que l'éclaircie entraîne non pas une hausse du volume marchand cumulatif, mais plutôt une production semblable répartie entre des individus de plus grosses dimensions (MRN 2003, DOUCET *et al.* 2009). Cette connaissance a d'ailleurs été intégrée dans la dernière édition du Manuel d'aménagement forestier (MAF) en attribuant au peuplement traité un volume marchand à maturité équivalent à celui d'un peuplement non traité, dont on a soustrait le volume cumulé des éclaircies (MRNFP 2003). Le cas échéant, l'objectif principal de l'éclaircie commerciale est alors d'augmenter la croissance en diamètre des arbres résiduels, ce qui devrait, par le fait même, accroître la valeur du peuplement (MRN 2003, DOUCET *et al.* 2009) et diminuer le coût de réalisation des interventions subséquentes (BERTRAND et BOLGHARI 1970). Les autres avantages de ce traitement sont nombreux :

amélioration de la qualité du peuplement par l'élimination des arbres déformés et moribonds, diminution de la mortalité des arbres, maintien de la vigueur des arbres résiduels, modification de la composition en espèces du peuplement, augmentation possible de la résistance aux insectes, régularisation des approvisionnements au cours de la révolution et création d'emplois (MRN 2003, PRÉGENT 1998).

Malgré les ajustements apportés au MAF, l'amélioration des connaissances sur les effets des traitements sylvicoles demeure nécessaire afin de vérifier les hypothèses de rendement prévu. C'est dans ce but qu'un réseau de placettes-échantillons a été installé, de 1997 à 2000, dans des peuplements situés sur le territoire public québécois soumis à une éclaircie commerciale et destinés à la production du sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), des épinettes (*Picea* sp.), du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), du mélèze laricin (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch) et du thuya occidental (*Thuya occidentalis* L.). En plus de servir à déterminer les rendements découlant de l'application opérationnelle de l'éclaircie commerciale pour diverses essences, les données recueillies permettront d'élaborer des modèles de croissance. Les connaissances ainsi acquises serviront également à préciser les caractéristiques des peuplements et des stations propices à la réalisation de l'éclaircie commerciale. Contrairement à la grande majorité des études portant sur ce traitement dans l'est du Canada, la présente étude tient aussi compte des effets des sentiers de débardage. En intégrant les pertes de production en volume attribuables à ces sentiers, elle répond à une préoccupation émise dans l'avis scientifique du Comité consultatif scientifique du Manuel d'aménagement forestier (MRN 2003).

Bien que le réseau de placettes-échantillons ait été établi dans le but de vérifier les hypothèses de rendement servant au calcul de la possibilité forestière, il est encore trop tôt pour le faire, étant donné la courte période de suivi disponible. Ce mémoire dresse néanmoins un portrait du réseau de la mesure des effets réels et présente les résultats obtenus, 5 ans après traitement, dans divers peuplements résineux. Le principal objectif de cet ouvrage est donc de quantifier l'effet observé à court terme sur les accroissements en diamètre, en volumes marchand et sciage, de même que sur la mortalité quinquennale.

Chapitre premier

Matériel et méthodes

1.1 Réseau de placettes-échantillons et territoire d'étude

Un réseau composé de 306 placettes-échantillons permanentes a été établi de 1997 à 2000, par le personnel du ministère des Ressources naturelles, dans des aires traitées sur l'ensemble du territoire public québécois. Le tableau 1 présente la distribution des placettes établies selon les régions administratives. De ce nombre, 298 ont pu être remesurées 5 ans après leur établissement; les autres ont été abandonnées, principalement en raison de leur inaccessibilité.

La distribution des placettes couvre l'ensemble du Québec méridional, mais celles-ci se concentrent davantage dans les domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune, de la sapinière à bouleau blanc et de la pessière à mousses (Figure 1). Le territoire couvert est caractérisé par un gradient nord-sud des températures annuelles moyennes, qui varient de -2,5 à 5,0 °C (ROBITAILLE et SAUCIER 1998). Les précipitations annuelles, quant à elles, varient selon un gradient est-ouest. La partie ouest présente un climat continental avec des précipitations annuelles modérées (700 – 1 200 mm). Plus à l'est, le climat maritime favorise des précipitations plus abondantes (900 – 1 600 mm par année).

Les placettes ont été établies dans une gamme variée de peuplements résineux. L'appellation des peuplements a été déterminée à partir des données recueillies lors de l'inventaire d'implantation des placettes. Ce faisant, il a été possible d'identifier six groupements d'essences : les pessières noires pures, les pinèdes grises pures, les sapinières pures, les peuplements d'épinette noire et de sapin, les peuplements d'épinette noire et de pin gris et les peuplements de sapin, d'épinette blanche, d'épinette noire ou d'épinette rouge. Toutefois, pour les besoins de l'analyse, ces six groupements d'essences ont été classés en trois grands types de peuplements, sur la base de l'essence dominante en surface terrière : les pessières noires, les pinèdes grises et les sapinières (Tableau 2). À l'échelle provinciale, à l'exception des pessières, l'abondance des peuplements échantillonnés diffère entre les sous-domaines bioclimatiques de l'est et de l'ouest (Figure 2). En fait, les sapinières

n'ont été échantillonnées que dans les sous-domaines bioclimatiques de l'est, alors que les pinèdes étudiées se retrouvent presque exclusivement dans les sous-domaines de l'ouest.

1.2 Implantation des placettes et cueillette des données

Les peuplements ont été sélectionnés parmi des peuplements ciblés pour être traités en éclaircie commerciale au moment de l'installation des placettes. Dans chacun des peuplements échantillonnés, une paire de placettes principales circulaires de 400 m² a été établie, soit une placette traitée jumelée à une placette témoin (Figure 3). Les caractéristiques physiques (topographie, drainage et pente) et dendrométriques (composition et densité) initiales d'une même paire de placettes devaient être similaires. Afin de respecter ces critères, l'emplacement des placettes a été déterminé avant traitement. Les effets de bordure ont été évités en établissant les placettes témoins au centre d'une superficie non traitée dont les dimensions minimales devaient être de 100 m x 100 m. Le centre de la placette traitée a été placé à une distance d'environ 150 m du centre de la placette témoin. Avant la coupe, les arbres marchands, soit ceux ayant un diamètre à hauteur de poitrine (dhp) supérieur ou égal à 9,1 cm, ont été dénombrés par essence commerciale et par classe de dhp de 2 cm, à l'intérieur de chaque placette principale.

Le traitement a été appliqué selon les normes en vigueur à l'époque pour l'éclaircie commerciale (MRN 1997). En l'occurrence, l'intervention devait être effectuée de manière à récolter entre 25 et 35 % de la surface terrière marchande et à augmenter de 5 % le diamètre moyen des arbres marchands. Les arbres martelés ont été abattus manuellement (près de 60 % de placettes) ou mécaniquement (environ 40 %). La récolte a été réalisée en bois tronçonné dans environ la moitié des placettes et par arbre ou tronc entier dans l'autre moitié. Les sentiers de débardage ont été créés en fonction des contraintes du milieu physique; de ce fait, leur emplacement dans le peuplement était indépendant de celui des placettes. Après la coupe, les arbres marchands présents dans chaque placette principale ont été

numérotés et leur dhp a été mesuré au mm près. Un dénombrement des gaules ($1,1 \text{ cm} \leq \text{dhp} \leq 9,0 \text{ cm}$) a aussi été effectué par classe de dhp de 2 cm, à l'intérieur d'une sous-placette circulaire de 100 m^2 située au centre de la placette principale (Figure 3). De plus, dans chaque placette principale, 5 arbres-études d'essences résineuses et représentatifs de la composition du peuplement ont été sélectionnés dans les étages dominant et codominant. Pour chacun de ces arbres-études, la hauteur totale (cm), la proportion de

cime vivante et l'âge à 1 m au-dessus du plus haut niveau du sol ont été déterminés. La distance et l'azimut par rapport au centre de la placette ont été notés pour les trois arbres situés le plus près du centre de la placette. Un relevé des principales variables topographiques et pédologiques de la station a aussi été effectué. Le dénombrement et les prises de mesures ont été réalisés aux deux inventaires quinquennaux (1997-2000 et 2002-2005).

Tableau 1. Répartition des placettes-échantillons par région administrative.

Région administrative		Nombre de placettes	Fréquence relative (%)
Numéro	Nom		
01	Bas-Saint-Laurent	42	14
02	Saguenay – Lac-Saint-Jean	70	23
03	Capitale Nationale	16	5
04	Mauricie	4	1
05	Estrie	8	3
06	Montréal	32	10
07	Outaouais	6	2
08	Abitibi-Témiscamingue	72	24
09	Côte-Nord	18	6
11	Gaspésie – Îles-de-la-Madeleine	38	12
Total		306	100

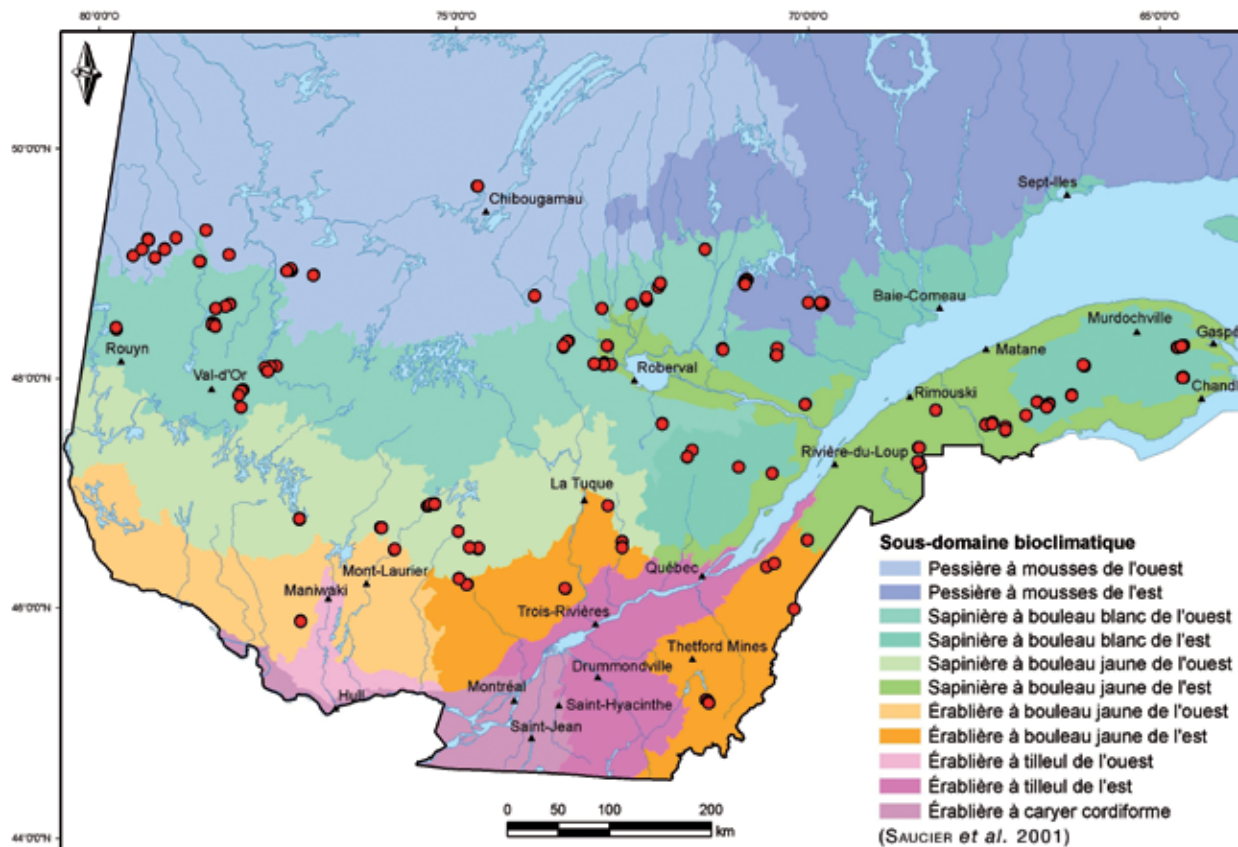
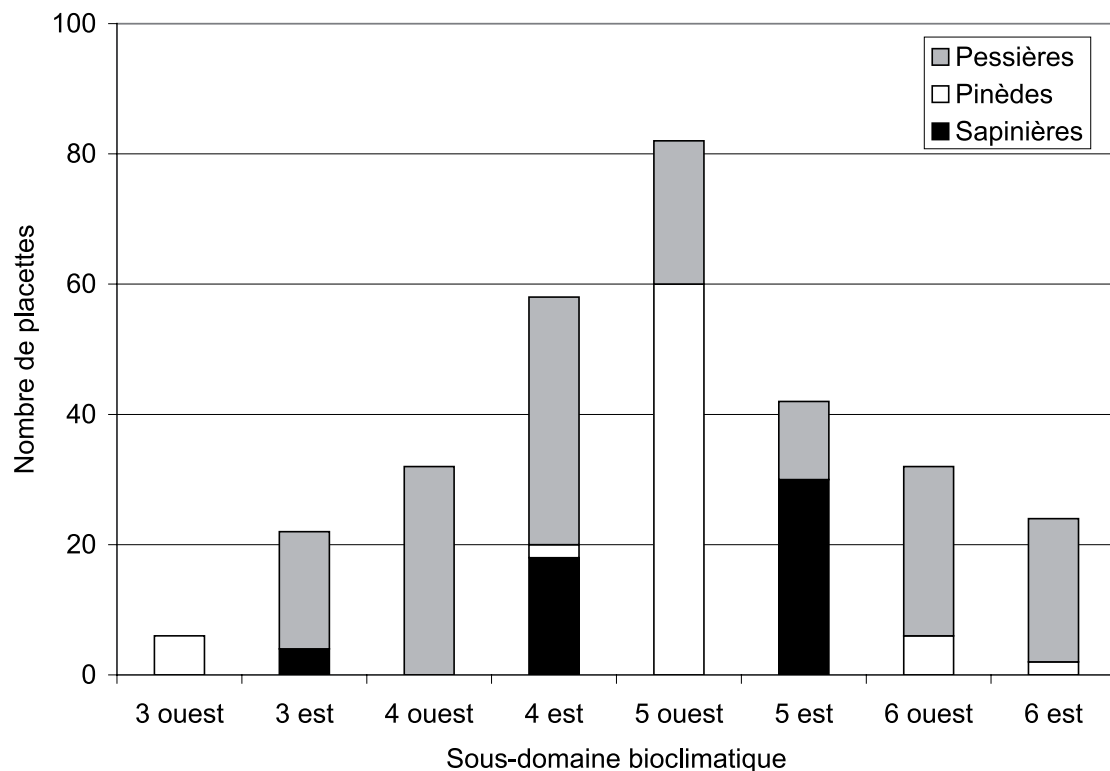


Figure 1. Carte de l'emplacement des paires de placettes-échantillons à l'échelle provinciale.

Tableau 2. Proportion (%) des différents groupements d'essences dans chacun des trois grands types de peuplements.

Type	Groupement d'essences (%)			
	Pures	Épinette noire et sapin baumier	Épinette noire et pin gris	Épinettes et sapin baumier
Pessières noires	74	5	21	-
Pinèdes grises	81	-	19	-
Sapinières	72	-	-	28



Sous-domaine bioclimatique	Sous-régions écologiques
3 ouest	Érablière à bouleau jaune de l'ouest
3 est	Érablière à bouleau jaune de l'est
4 ouest	Sapinière à bouleau jaune de l'ouest
4 est	Sapinière à bouleau jaune de l'est
5 ouest	Sapinière à bouleau blanc de l'ouest
5 est	Sapinière à bouleau blanc de l'est
6 ouest	Pessière à mousses de l'ouest
6 est	Pessière à mousses de l'est

Figure 2. Répartition des placettes-échantillons selon le type de peuplement et le sous-domaine bioclimatique. Des informations complémentaires au sujet des sous-domaines sont aussi fournies sous le graphique.

Superficie traitée

Superficie témoin

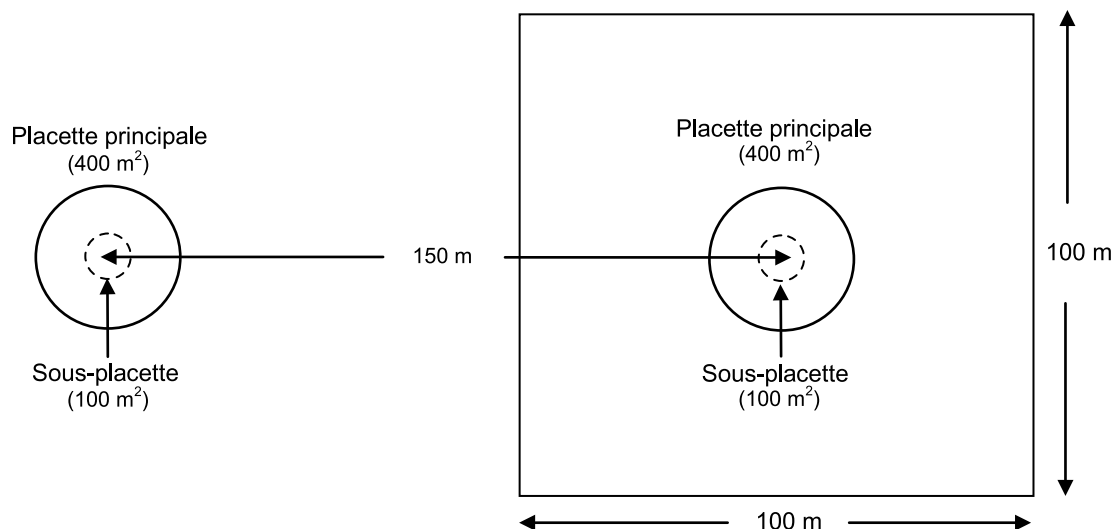


Figure 3. Schéma d'une paire de placettes-échantillons.

1.3 Traitements mathématiques et analyses statistiques

Pour les fins d'analyse, les placettes devenues orphelines au deuxième mesurage n'ont pas été considérées. En tout, 260 placettes (130 paires) ont été retenues. Les analyses ont été effectuées par type de peuplement, en considérant les paires de placettes issues du même type comme des répétitions.

L'indice de qualité de station (IQS) de chaque placette a été calculé au premier mesurage à l'aide de l'équation de POTHIER et SAVARD (1998) (Équation 1). Pour ce faire, seuls les quatre plus gros arbres de l'essence principale de la placette, répondant ainsi à la définition de la hauteur dominante (soit la hauteur des 100 plus gros arbres à l'hectare), ont été utilisés. L'IQS de chaque placette est déterminé par celui de l'essence résineuse principale, soit celle présentant la surface terrière marchande la plus grande.

$$IQS = b_1 H_d^{b_2} \left(1 - e^{-b_3 \hat{Age}} \right)^{b_4 H_d^{-b_5}} \quad [1]$$

où

IQS = indice de qualité de station à un âge de référence de 50 ans (m);

H_d = hauteur dominante des arbres de la placette (m);

$\hat{Age}$ = âge moyen corrigé à 1 m de hauteur des arbres-études de la placette;

b_1 à b_5 = paramètres de l'équation dont les valeurs sont fixées par essence.

Une relation hauteur-diamètre a été étalonnée par essence, pour chacun des traitements et chacune des périodes, à partir des données des arbres-études. Un modèle non linéaire tenant compte d'un petit nombre d'arbres-études a été utilisé (BÉGIN et RAULIER 1995) (Équation 2). La procédure NLMIXED du logiciel SAS, version 9.1 (SAS INSTITUTE 2004) a été retenue pour calculer les paramètres de cette équation et estimer la hauteur de chaque arbre marchand recensé lors des inventaires dendrométriques. Le volume marchand (avec écorce) des placettes a été estimé à l'aide du tarif de cubage de PERRON (2003).

$$Htot_{ij} = 1,3 + \frac{dhp_{ij}}{b_1 + dhp_{ij} \left(\frac{\frac{DMOY_i}{\sqrt{HMOY_i - 1,3}} - b_1}{DMOY_i} \right)} \quad [2]$$

où

$Htot_{ij}$ = hauteur totale de la tige j de la placette i (m);

dhp_{ij} = diamètre à hauteur de poitrine de la tige j de la placette i (cm);

$DMOY_i$ = diamètre moyen (arithmétique) des arbres-études de la placette i (cm);

$HMOY_i$ = hauteur totale moyenne des arbres-études de la placette i (m);

b_1 = paramètre de l'équation dont les valeurs sont fixées par essence pour chacun des traitements et des inventaires.

Des analyses de variance ont été effectuées, par type de peuplement, sur l'accroissement quinquennal en dhp, en diamètre quadratique moyen marchand (D_{qm}), en volume marchand (V_m) et en volume sciage (V_s), qui correspond au volume marchand de tous les arbres vivants dont le dhp était de 15,1 cm et plus à chaque inventaire. Le V_m et le V_s à l'hectare, 5 ans après traitement, de même que le volume de mortalité quinquennale (V_{mmort}), soit le volume marchand des arbres qui sont morts (arbres sur pied ou chablis) pendant la période quinquennale, ont aussi été analysés. Lors de l'analyse de l'accroissement en dhp, qui en est une à l'échelle de l'arbre individuel, seuls les arbres qui étaient vivants au premier et au second inventaire ont été considérés. Les analyses de l'accroissement en diamètre quadratique moyen ont été réalisées en tenant compte de l'ensemble des arbres marchands (D_{qm}) ou exclusivement des 500 plus gros arbres à l'hectare (D_{qm500}) et vivants à chacun des mesurages. Puisque le D_{qm} est obtenu avec tous les arbres, il est basé sur un nombre variable d'individus. Le collectif des 500 plus gros arbres à l'hectare permet, quant à lui, d'éviter les variations du nombre d'arbres considérés entre les placettes et les mesurages (MÄKINEN et ISOMÄKI 2004a).

Outre cet aspect, l'intérêt de ce collectif réside dans le fait qu'il devrait représenter une grande part des arbres récoltés lors de la coupe finale (PRÉSENT 1998, EMMINGHAM *et al.* 2007).

La procédure MIXED de la version 9.1 du progiciel SAS a été utilisée pour effectuer les analyses (SAS INSTITUTE 2004). Le modèle mixte retenu comprenait deux facteurs, le traitement correspondant au facteur à effets fixes et les paires de placettes, à celui des effets aléatoires. Étant donné que les conditions de départ pouvaient varier d'une paire de placettes à l'autre, plusieurs covariables ont été testées afin de sélectionner celles devant être employées pour ajuster les données : le dhp initial (dhp_i , dhp au premier mesurage après traitement exclusivement pour l'accroissement en dhp), l'IQS, l'âge initial (Âge_i) et la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}), toujours avec les valeurs observées avant traitement. Lorsque l'interaction entre une covariable et les traitements était significative, les effets ont été comparés à trois valeurs différentes de la covariable, soit le premier quartile (Q_1), la moyenne (Moy) et le troisième quartile (Q_3) (MILLIKEN et JOHNSON 2002). Dans le cas d'un modèle avec une covariable et un effet du traitement, mais sans interaction significative, les moyennes ajustées ont été comparées seulement à la valeur moyenne de la covariable. Les valeurs des quartiles et de la moyenne des covariables utilisées dans ces analyses sont présentées au tableau 3. Pour chacune des analyses, l'hypothèse de normalité des erreurs a été testée sur les résidus à l'aide de la statistique de Shapiro-Wilk, alors que l'homogénéité des variances des résidus a été vérifiée de façon graphique. Au besoin, une transformation de la variable dépendante (racine carrée + 1) a été effectuée de manière à corriger l'absence de normalité ou la présence d'hétéroscédasticité. Toutefois, les valeurs présentées dans le texte, les tableaux et les figures sont celles obtenues en utilisant l'approche mise au point par GRÉGOIRE *et al.* (2008), afin d'obtenir des estimateurs non biaisés lors de la transformation inverse de type racine carrée. Un seuil $\alpha = 0,05$ a été retenu pour établir la significativité des analyses. Toutes les données ont été utilisées lors des analyses. L'influence de celles situées à l'extérieur des nuages de points a été vérifiée en réalisant une analyse avec et sans ces dernières. Dans tous les cas, l'exclusion de ces données n'a pas modifié les résultats. Quant aux courbes illustrées sur les figures, elles ont été générées à partir des coefficients obtenus lors des analyses.

Tableau 3. Valeurs du premier quartile (Q_1), de la moyenne (Moy) et du troisième quartile (Q_3) des covariables dans chacun des trois types de peuplements.

Quartiles	Pessières				Pinèdes				Sapinières			
	dhp _i ¹	Âge _i ²	ST _{mi} ³	IQS ⁴	dhp _i	Âge _i	ST _{mi}	IQS	dhp _i	Âge _i	ST _{mi}	IQS
Q ₁	11	57	27	13	12	46	20	16	12	44	25	13
Moy	14	62	34	15	14	52	27	17	14	47	33	14
Q ₃	16	66	40	16	16	54	31	18	17	52	39	16

¹ dhp_i : au premier mesurage (après traitement);

² Âge_i : âge avant traitement;

³ ST_{mi} : surface terrière des arbres marchands (dhp $\geq$ 9,1 cm) avant traitement;

⁴ IQS : indice de qualité de station (m) à un âge de référence de 50 ans à 1 m de hauteur, déterminé avec l'équation de POTHIER et SAVARD (1998).

Chapitre deux

Résultats

2.1 Caractéristiques dendrométriques des peuplements avant et après traitement

Plus des deux tiers des pessières et des sapinières et 90 % des pinèdes grises étudiées étaient situées sur des stations dont la classe d'IQS est égale ou supérieure à 15 m (Figure 4). Les autres peuplements se retrouvaient presque exclusivement sur des stations ayant une classe d'IQS de 12 m.

Lors de l'installation des placettes, le volume marchand et la surface terrière marchande étaient importants, mais variables dans chaque type de peuplement (Tableau 4). Les pessières témoins avaient le plus fort volume marchand avec en moyenne de $181 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, mais celui-ci variait de 49 à $307 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Avant la coupe, la surface terrière marchande des sapinières et des pessières se situait, en moyenne, autour de $33 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, alors que les pinèdes affichaient une valeur moyenne d'environ $26 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Après la coupe, la surface terrière marchande moyenne était

de 24, 19 et $23 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour les pessières, les pinèdes et les sapinières, respectivement, ce qui représente un taux de prélèvement moyen d'environ 30 %. Au moment de la coupe, l'âge moyen était de 62, 52 et 47 ans pour ces trois types de peuplements, respectivement. Quelques pessières étaient cependant âgées de plus de 70 ans, et certaines pinèdes avaient un âge dépassant les 60 ans.

Avant la coupe, aucune différence significative n'a été notée entre les peuplements témoins et traités d'une même paire de placettes, en termes de diamètre quadratique moyen, de surface terrière marchande, d'âge et de volume marchand, et ce, pour les trois types de peuplement. Il en était de même pour l'IQS dans les pessières et les sapinières. Dans le cas des pinèdes, bien que l'IQS ait été significativement différent entre les placettes jumelées, l'écart a été considéré négligeable (Tableau 4).

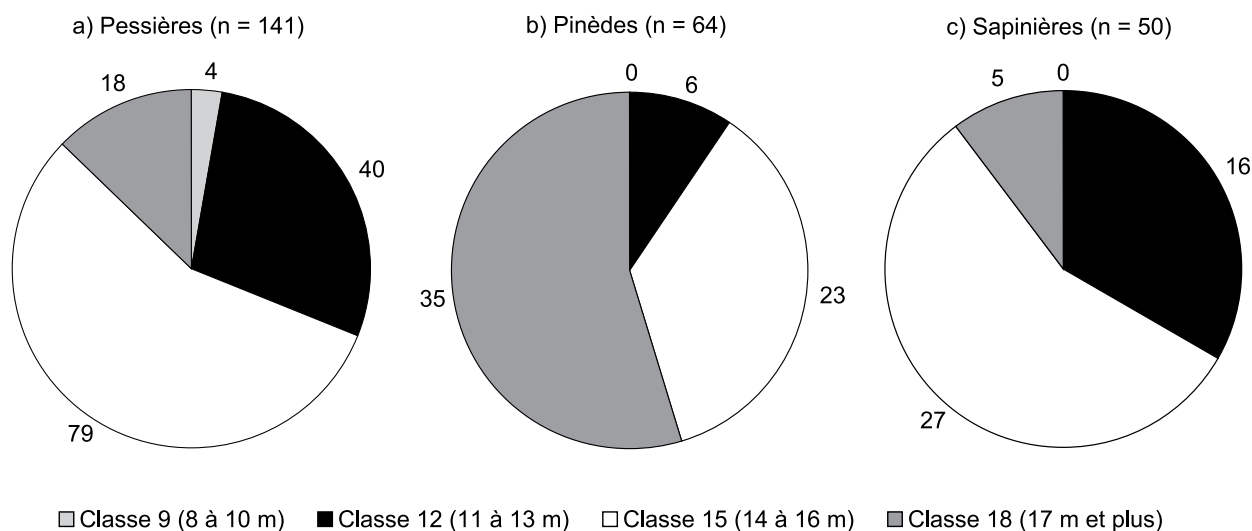


Figure 4. Répartition du nombre de placettes-échantillons, pour (a) les pessières, (b) les pinèdes et (c) les sapinières, selon les classes d'indice de qualité de station (IQS) déterminées avec l'équation de POTHIER et SAVARD (1998).

Tableau 4. Caractéristiques des peuplements témoins et traités dans chacun des trois types, avant et immédiatement après le traitement. La moyenne et l'écart-type ont été calculés par type de peuplement. Seuls les arbres d'essences commerciales ont été considérés.

Type de peuplement	Variable ¹	Peuplements témoins (TE)			Peuplements traités (TR)					
		Moyenne ± écart-type	Min	Max	Avant coupe			Après coupe		
					Moyenne ± écart-type	Min	Max	Moyenne ± écart-type	Min	Max
Pessières (n = 73 paires de placettes)	Âge (ans)	62 ± 10	38	112				61 ± 8	44	84
	H _{moy} (m)	13,1 ± 1,8	8,9	16,9				13,2 ± 1,9	7,7	17,6
	H _d (m)	15,8 ± 2,2	10,4	20,2				15,4 ± 2,3	8,7	20,0
	D _{qt} (cm)	11,9 ± 2,8	6,0	16,9				12,7 ± 2,3	6,0	17,1
	D _{qm} (cm)	14,6 ± 1,9	10,9	19,1	14,3 ± 1,8	10,4	19,2	14,8 ± 1,7	11,0	18,3
	N _t (arbres·ha ⁻¹)	3 942 ± 2 373	1 075	14 500				2 103 ± 1 105	575	7 525
	N _m (arbres·ha ⁻¹)	2 040 ± 599	1 075	3 425	2 043 ± 583	850	3 450	1 377 ± 403	575	2 625
	ST _t (m ² ·ha ⁻¹)	38,2 ± 8,2	18,4	57,5				25,5 ± 7,2	10,6	45,3
	ST _m (m ² ·ha ⁻¹)	33,5 ± 8,5	12,3	55,7	33,0 ± 9,3	7,3	48,4	23,6 ± 7,0	7,9	36,9
	V _t (m ³ ·ha ⁻¹)	193 ± 58	61	309				134 ± 47	39	230
	V _m (m ³ ·ha ⁻¹)	181 ± 64	49	307	174 ± 67	15	322	128 ± 48	19	230
	IQS (m à 50 ans)	15,6 ± 2,0	9,8	18,7				15,3 ± 2,0	8,1	18,0
Pinèdes (n = 32 paires de placettes)	Âge (ans)	52 ± 10	41	93				52 ± 8	41	73
	H _{moy} (m)	14,7 ± 1,6	11,3	18,7				14,8 ± 1,5	11,1	17,5
	H _d (m)	17,1 ± 1,8	13,7	20,5				16,5 ± 1,6	11,7	19,4
	D _{qt} (cm)	12,6 ± 2,5	6,3	19,5				13,1 ± 2,2	7,0	19,0
	D _{qm} (cm)	14,2 ± 2,0	11,7	21,4	13,9 ± 1,5	11,0	18,0	14,6 ± 1,8	10,8	20,0
	N _t (arbres·ha ⁻¹)	2 702 ± 2 179	1 100	11 775				1 593 ± 986	750	6 500
	N _m (arbres·ha ⁻¹)	1 717 ± 362	900	2 625	1 658 ± 371	1 125	2 475	1 127 ± 279	700	1 875
	ST _t (m ² ·ha ⁻¹)	29,4 ± 6,8	18,5	46,2				20,7 ± 4,5	12,7	30,3
	ST _m (m ² ·ha ⁻¹)	27,0 ± 6,5	18,2	42,1	25,6 ± 6,1	15,0	36,2	18,6 ± 4,8	9,9	29,0
	V _t (m ³ ·ha ⁻¹)	173 ± 55	94	285				119 ± 36	60	173
	V _m (m ³ ·ha ⁻¹)	167 ± 58	88	272	154 ± 46	70	234	115 ± 38	43	172
	IQS (m à 50 ans)	16,8 ± 2,0	12,2	20,5				16,3 ± 1,9	12,1	19,7
Sapinières (n = 25 paires de placettes)	Âge (ans)	47 ± 8	28	71				47 ± 5	38	55
	H _{moy} (m)	11,9 ± 1,1	10,6	13,9				12,4 ± 1,4	10,0	14,7
	H _d (m)	14,6 ± 1,4	12,8	17,9				14,0 ± 1,7	11,1	17,4
	D _{qt} (cm)	11,8 ± 2,6	6,2	16,6				12,3 ± 2,4	6,3	16,7
	D _{qm} (cm)	14,7 ± 1,6	12,3	17,7	14,4 ± 1,6	11,6	17,2	15,1 ± 1,3	12,6	17,9
	N _t (arbres·ha ⁻¹)	3 918 ± 2 193	1 650	11 075				1 901 ± 895	1 075	5 400
	N _m (arbres·ha ⁻¹)	1 994 ± 506	1 200	3 000	2 015 ± 551	1 150	3 125	1 269 ± 315	800	2 075
	ST _t (m ² ·ha ⁻¹)	38,0 ± 6,7	23,8	46,9				23,6 ± 5,6	16,7	33,5
	ST _m (m ² ·ha ⁻¹)	33,4 ± 7,2	17,2	44,4	32,5 ± 8,5	12,2	46,7	22,7 ± 6,0	10,0	34,3
	V _t (m ³ ·ha ⁻¹)	175 ± 44	95	263				118 ± 38	56	192
	V _m (m ³ ·ha ⁻¹)	161 ± 49	69	256	156 ± 56	39	249	115 ± 40	35	187
	IQS (m à 50 ans)	14,4 ± 1,8	11,2	18,3				14,0 ± 1,5	11,4	16,6
Total : n = 130 paires de placettes										

¹ Âge : âge corrigé pour correspondre à celui à 1 m du plus haut niveau du sol;

H_{moy} : hauteur moyenne des arbres-études;

H_d : hauteur dominante (hauteur calculée à partir des 100 plus gros arbres à l'hectare);

D_{qt} : diamètre quadratique moyen de tous les arbres (dhp ≥ 1,1 cm);

D_{qm} : diamètre quadratique moyen des arbres marchands (dhp ≥ 9,1 cm);

N_t : nombre total d'arbres (dhp ≥ 1,1 cm);

N_m : nombre d'arbres marchands (dhp ≥ 9,1 cm);

ST_t : surface terrière de tous les arbres (dhp ≥ 1,1 cm);

ST_m : surface terrière des arbres marchands (dhp ≥ 9,1 m);

V_t : volume de tous les arbres (dhp ≥ 1,1 cm);

V_m : volume des arbres marchands (dhp ≥ 9,1 cm) ;

IQS : indice de qualité de station (m) à un âge de référence de 50 ans à 1 m de hauteur, déterminé avec l'équation de POTHIER et SAVARD (1998).

La distribution diamétrale moyenne des arbres des peuplements témoins et traités, immédiatement après la coupe, est présentée à la figure 5. Les pinèdes témoins sont celles dont la distribution s'approchait le plus de la structure associée aux peuplements réguliers (Figure 5b). Les pessières et les sapinières témoins, quant à elles, avaient aussi une distribution diamétrale régulière, mais avec un nombre plus élevé d'arbres non marchands (Figures 5a et 5c). Dans les trois types de peuplements, la coupe a réduit considérablement le nombre d'arbres, particulièrement ceux de plus faibles diamètres (classes de $d_{hp} \leq 12$ cm), ce qui a eu pour effet de régulariser la structure des peuplements et d'augmenter le diamètre quadratique moyen des arbres marchands de l'ordre de 3 à 5 % (Tableau 4).

2.2 Accroissement quinquennal

2.2.1 Diamètre des arbres marchands

2.2.1.1 À l'échelle des arbres individuels

Pour les trois types de peuplements, l'accroissement quinquennal en dhp s'est avéré significativement plus grand dans les peuplements traités que les témoins (Tableau 5 et Figure 6). Dans les sapinières traitées, il a atteint une valeur de 1,4 cm ($\sigma = 0,09$ cm), ce qui est près de 40 % de plus que la moyenne des peuplements témoins (1,0 cm, $\sigma = 0,07$ cm, Figure 6). Pour les pessières et les pinèdes, le gain moyen d'accroissement en dhp a été significatif, mais quatre fois moindre, soit de l'ordre de 0,1 cm ($\sigma = 0,03$ cm) (Figure 6).

Une relation quadratique et positive entre l'accroissement en dhp et le dhp initial a été observée dans tous les types de peuplements et de traitements (Figure 7a). L'accroissement en dhp a cependant diminué linéairement et de manière significative avec l'augmentation de la surface terrière marchande initiale dans tous les types de peuplements (Figure 7b). Une relation semblable a également été notée avec l'âge initial dans les pessières et les sapinières en fonction du traitement; dans les pinèdes grises, cette relation ne varie pas selon le traitement (Figure 7c). Les peuplements les plus denses et les plus âgés ont donc généralement eu les plus faibles accroissements.

2.2.1.2 À l'échelle des peuplements

À l'exception des pinèdes, l'intervention a stimulé significativement l'accroissement quinquennal en diamètre quadratique moyen (Tableau 6). Le gain moyen

attribuable au traitement a été de 0,2 cm ($\sigma = 0,03$ cm) dans les pessières et de 0,4 cm ($\sigma = 0,09$ cm) dans les sapinières (Figure 8a). En ne tenant compte que des 500 plus gros arbres à l'hectare, seules les sapinières ont réagi positivement à la coupe (Tableau 6); leur accroissement moyen en D_{gm500} est passé d'environ 1,2 cm dans les placettes témoins, à 1,6 cm dans les placettes traitées ($\sigma = 0,11$ cm) (Figure 8b).

2.2.2 Volumes marchand et sciage

Dans tous les types de peuplements, l'accroissement quinquennal en volume marchand a été significativement plus grand dans les placettes témoins par rapport à celles traitées (Tableaux 7 et 8). Dans les sapinières, cependant, une interaction significative entre le traitement et l'âge initial a aussi été observée (Tableau 7). Cette interaction s'est manifestée par une diminution très marquée de l'accroissement en volume marchand dans les peuplements traités plus vieux, mais beaucoup plus faible dans les peuplements témoins (Figure 9). En fait, aucune différence significative d'accroissement n'a été observée dans les jeunes sapinières (Q_1), alors que dans celles d'âges moyen et les plus vieilles (Moy et Q_3), l'accroissement a été significativement plus grand dans les placettes témoins (Tableau 8). Dans les pessières, une relation positive a été observée entre l'accroissement en volume marchand et la surface terrière marchande initiale, mais aucune différence n'a été notée entre les traitements (Figure 10). Dans les sapinières, à l'âge initial moyen, l'accroissement quinquennal moyen en volume marchand a été de $40,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 2,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans les placettes témoins, comparativement à $34,3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 2,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans celles traitées (Tableau 8). Dans les pessières et les pinèdes, l'écart moyen d'accroissement a été de 10,8 et $8,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivement.

L'accroissement quinquennal moyen en volume sciage s'est avéré significativement plus important dans les pessières et les pinèdes témoins, avec $24,6$ et $30,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 1,5$ et $2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) (Figure 11), respectivement, ce qui représente des écarts moyens de l'ordre de 6,4 et $7,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ par rapport aux placettes traitées. Dans les sapinières, toutefois, aucune différence significative n'a été observée (Tableau 9 et Figure 11). L'accroissement en volume y a atteint près de $40 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), tant dans les placettes témoins que traitées (Figure 11).

2.3 Volumes 5 ans après traitement

Cinq ans après traitement, les volumes marchand et sciage dans les placettes témoins des trois types de peuplements se sont avérés significativement supérieurs à ceux dans les placettes traitées (Tableau 10, Figure 12). En effet, les pessières et les sapinières témoins ont produit un volume marchand moyen d'un peu plus de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 7,0$ et $9,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), comparativement à environ $145 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 7,0$ et $9,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans les peuplements traités (Figure 12a). Dans les pinèdes, les valeurs observées ont été de $192 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 9,0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans les placettes témoins et de $132 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 9,0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans les placettes traitées (Figure 12a). Pour le volume sciage, les valeurs moyennes observées dans les trois types de peuplements variaient de 128 à $145 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 7,4$ à $10,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans les placettes témoins, et de 94 à $115 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\sigma = 7,4$ à $10,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans les placettes traitées (Figure 12b). Néanmoins, 5 ans après traitement, la proportion du volume marchand en volume sciage, dans les peuplements traités, était de $2,7$ à $6,4 \%$ supérieure à celle dans les peuplements témoins, avec des valeurs se situant entre 70 et 78% , selon le type de peuplement.

2.4 Mortalité quinquennale

Dans les pinèdes et les sapinières, il n'y a pas eu d'effet significatif du traitement sur le volume marchand des arbres morts au cours de la période de suivi (Tableau 11). Par contre, les pessières traitées ont subi plus de mortalité que celles témoins. Dans les pessières témoins et traitées, la mortalité a augmenté avec l'âge au moment de l'intervention (Figure 13). Un effet positif de l'âge initial sur la mortalité a aussi été observé dans les sapinières, mais sans égard au traitement (Figure 14). Une relation semblable

entre la surface terrière marchande initiale et la mortalité a également été notée dans les sapinières et les pinèdes (Figures 15 et 16). Le volume marchand des arbres morts a été plus grand dans les pessières plus fertiles, particulièrement dans les peuplements traités (Figure 17).

Cinq ans après l'intervention, le volume marchand moyen des arbres morts dans les pessières surpassait de $2,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ celui des témoins (Tableau 12). Dans les pinèdes et les sapinières, ce volume était similaire dans les deux traitements, avec des valeurs moyennes se situant entre $5,7$ et $6,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Dans les trois types de peuplements, plus de la moitié de la mortalité, en termes de nombre d'arbres, a été observée parmi les plus petits faisant partie des classes de dhp de 10 et 12 cm (Figure 18). Dans les pinèdes (Figure 18b) et les sapinières (Figure 18c), le nombre de petits arbres morts a été de 51 à 73% plus élevé dans les peuplements témoins que traités. En revanche, dans les pessières (Figure 18a), le nombre de petits arbres morts a été 12% plus faible dans les peuplements témoins que dans ceux traités. Toutefois, dans les trois types de peuplements, le nombre d'arbres morts parmi les classes de dhp de 14 cm et plus a été de 30 à 45% plus élevé dans les placettes traitées, ce qui constitue un renversement de situation, par rapport aux classes de dhp plus petites, pour les pinèdes et les sapinières. Cinq ans après le traitement, la proportion d'arbres morts dans les trois types de peuplements traités variait de $4,7$ à $6,3 \%$ de l'ensemble des arbres présents au premier mesurage. Ceci représente une hausse de 35% dans les pessières, de 45% dans les pinèdes et de 20% dans les sapinières, par rapport aux peuplements témoins au cours de la même période.

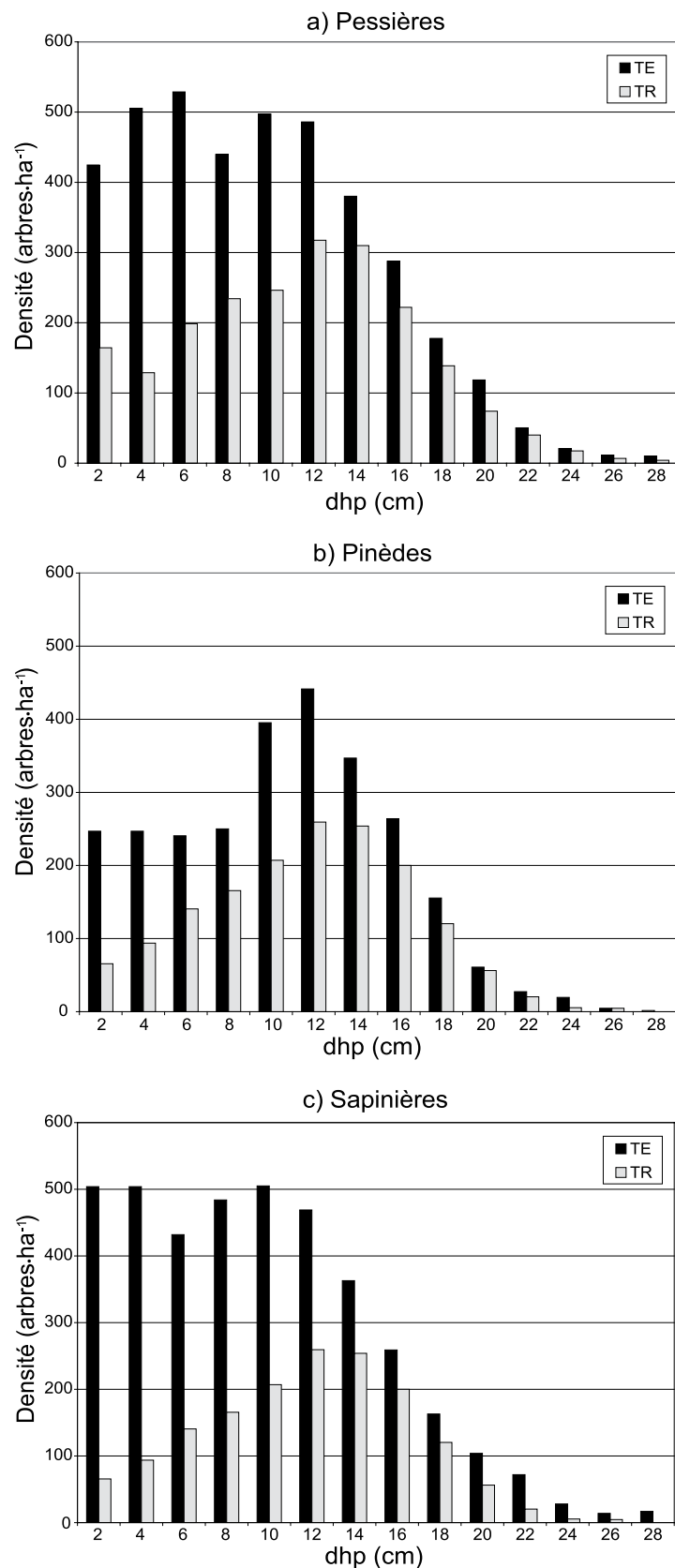


Figure 5. Distribution moyenne des arbres par classe de dhp dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR) immédiatement après traitement, pour a) les pessières, b) les pinèdes et c) les sapinières.

Tableau 5. Analyse de variance de l'accroissement quinquennal en dhp des arbres marchands et survivants lors du second inventaire. Les effets significatifs sont indiqués en caractères gras.

Sources de variation (fixes)	Pessières			Pinèdes		Sapinières	
	dl_n^1	dl_d^2	p	dl_d	p	dl_d	p
Traitement	1	61,5	0,0003	28,9	0,0016	20,2	0,0001
Âge _i ³	1	118	0,0012			38,1	0,0004
ST _{mi} ⁴	1	120	0,0001	55,1	0,0001	40,8	0,0001
dhp _i	1	8 726	0,0001	3 139	0,0001	2 760	0,0001
dhp _i *dhp _i ⁵	1	8 719	0,0001	3 130	0,0011	2 760	0,0001

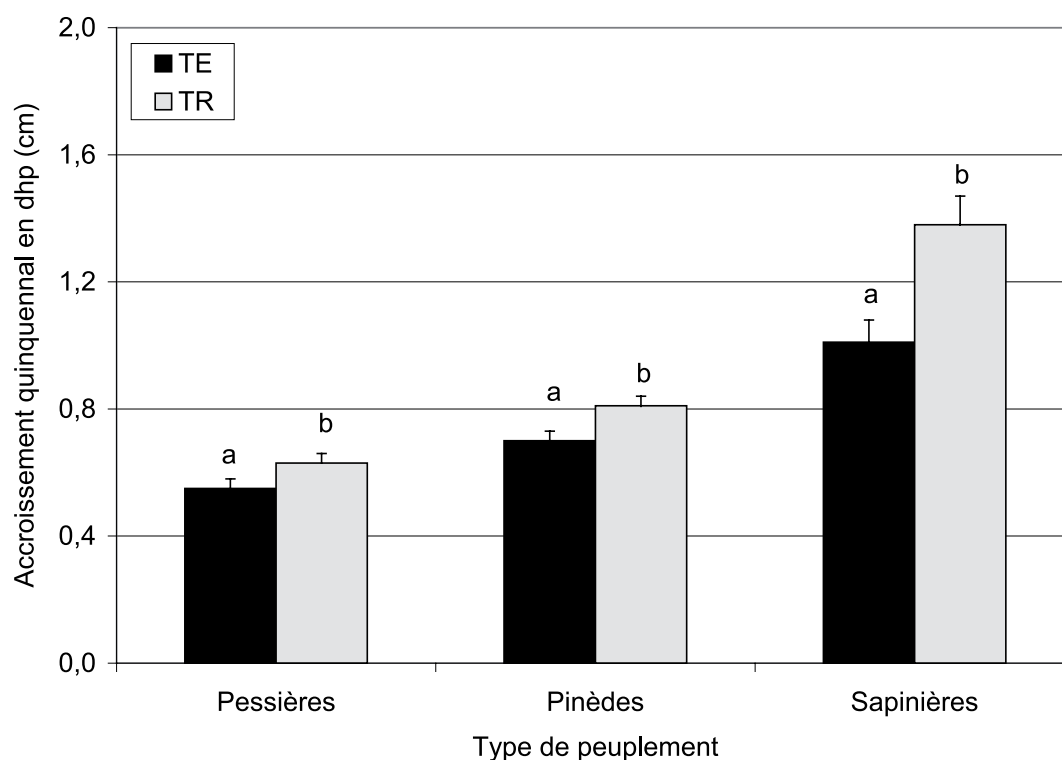
¹ dl_n : degrés de liberté du numérateur;² dl_d : degrés de liberté du dénominateur selon l'approximation de Satterthwaite;³ Âge_i : âge avant traitement;⁴ ST_{mi} : surface terrière des arbres marchands (dhp ≥ 9,1 cm) avant traitement;⁵ dhp_i : dhp au premier mesurage.

Figure 6. Accroissement quinquennal en dhp des arbres marchands et survivants lors du second inventaire dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), obtenu avec les valeurs moyennes des covariables significatives. Pour un type de peuplement donné, des lettres différentes signifient que les moyennes sont statistiquement différentes. Les barres au-dessus des bâtonnets représentent les erreurs-types (σ).

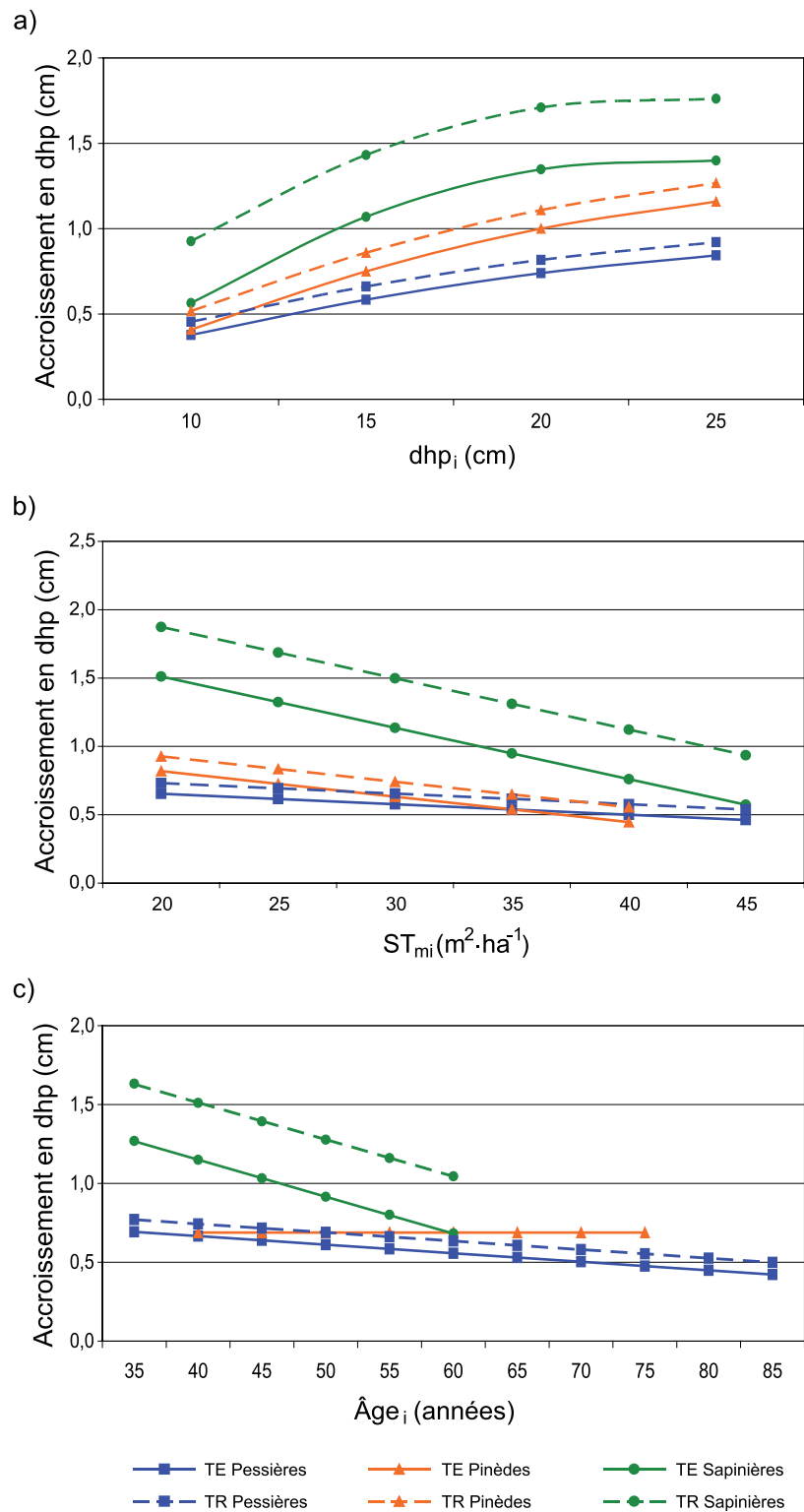


Figure 7. Courbes ajustées par régression de l'accroissement quinquennal en dhp dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), selon a) le dhp initial (dhp_i), b) la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}) et c) l'âge initial du peuplement ($\hat{Age}_i$). Lorsque d'autres variables que celle présentée en axe des X contribuent significativement aux modèles, les valeurs utilisées pour générer les courbes sont les moyennes de dhp_i , d'âge_i, de ST_{mi} et d'IQS indiquées au tableau 3.

Tableau 6. Analyse de variance de l'accroissement quinquennal en diamètre quadratique moyen de l'ensemble des arbres marchands (D_{qm}) et de celui des 500 plus gros arbres à l'hectare (D_{qm500}). Les effets significatifs sont indiqués en caractères gras.

Variable	Sources de variation (fixes)	Pessières			Pinèdes		Sapinières	
		dl_n^1	dl_d^2	p	dl_d	p	dl_d	p
D_{qm}	Traitement	1	72	0,0001	31	0,4875	24	0,0001
D_{qm500}	Traitement	1	72	0,0864	30,5	0,1207	24	0,0001

¹ dl_n : degrés de liberté du numérateur;

² dl_d : degrés de liberté du dénominateur selon l'approximation de Satterthwaite.

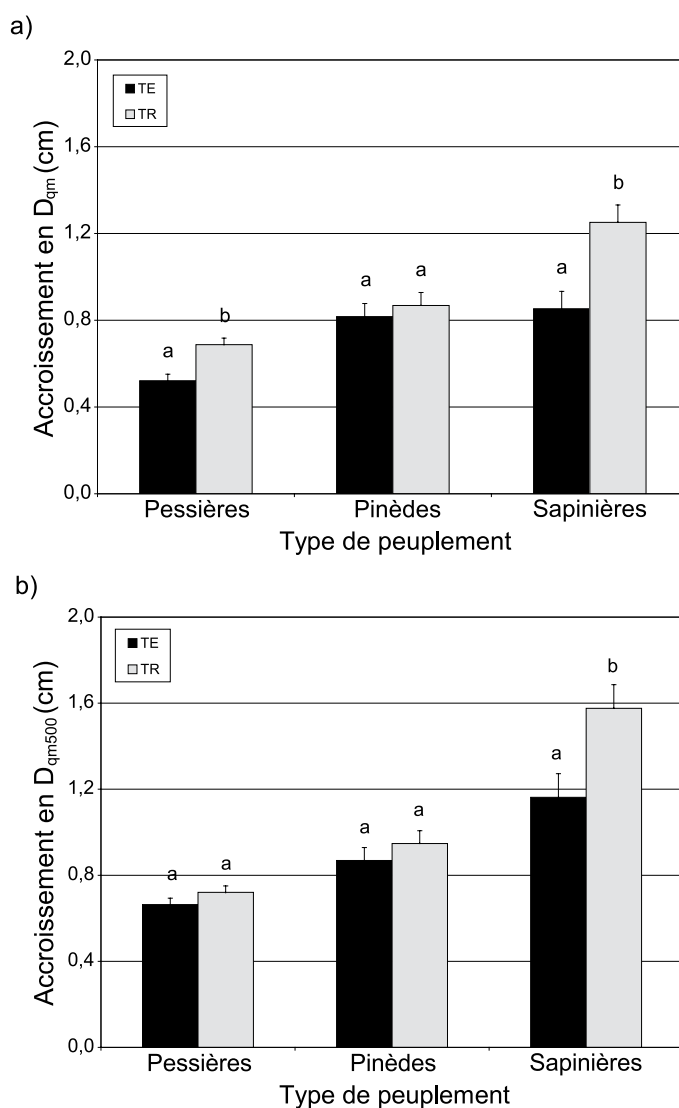


Figure 8. Accroissement quinquennal en diamètre quadratique moyen 5 ans après traitement des peuplements témoins (TE) et traités (TR), pour a) l'ensemble des arbres marchands à l'hectare (D_{qm}) et b) les 500 plus gros arbres marchands à l'hectare (D_{qm500}). Pour un type de peuplement donné, des lettres différentes signifient que les moyennes sont statistiquement différentes. Les barres au-dessus des bâtonnets représentent les erreurs-types (σ).

Tableau 7. Analyse de variance de l'accroissement quinquennal en volume marchand. Les effets significatifs sont indiqués en caractères gras.

Sources de variation (fixes)	Pessières			Pinèdes		Sapinières	
	dl _n ¹	dl _d ²	p	dl _d	p	dl _d	p
Traitement	1	69,6	0,0001	31,0	0,0001	29,4	0,0450
Âge _i ³	1					35,7	0,0001
Âge _i *Traitement	1					29,6	0,0261
ST _{mi} ⁴	1	103,0	0,0182				

¹ dl_n : degrés de liberté du numérateur;² dl_d : degrés de liberté du dénominateur selon l'approximation de Satterthwaite;³ Âge_i : âge avant traitement;⁴ ST_{mi} : surface terrière des arbres marchands (dhp ≥ 9,1 cm) avant traitement.**Tableau 8. Moyennes ajustées de l'accroissement quinquennal en volume marchand (m³·ha⁻¹), dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), avec les covariables ou les interactions significatives.** Pour un type de peuplement donné, des lettres différentes signifient que les moyennes sont statistiquement différentes. Le (-) indique que cette covariable n'est pas significative dans le modèle.

Quartiles		Pessières			Pinèdes			Sapinières		
ST _{mi} ¹	Âge _i ²	TE	TR	Δ ³	TE	TR	Δ	TE	TR	Δ
Moy	-	26,0 a	15,2 b	10,8						
-	Q ₁							43,8 a	42,6 a	1,2
-	Moy							40,6 a	34,3 b	6,3
-	Q ₃							37,1 a	25,0 b	12,1
-	-				25,3 a	16,5 b	8,9			

¹ ST_{mi} : surface terrière des arbres marchands (dhp ≥ 9,1 cm) avant traitement;² Âge_i : âge avant traitement;³ Δ : différence entre les peuplements TE et TR.

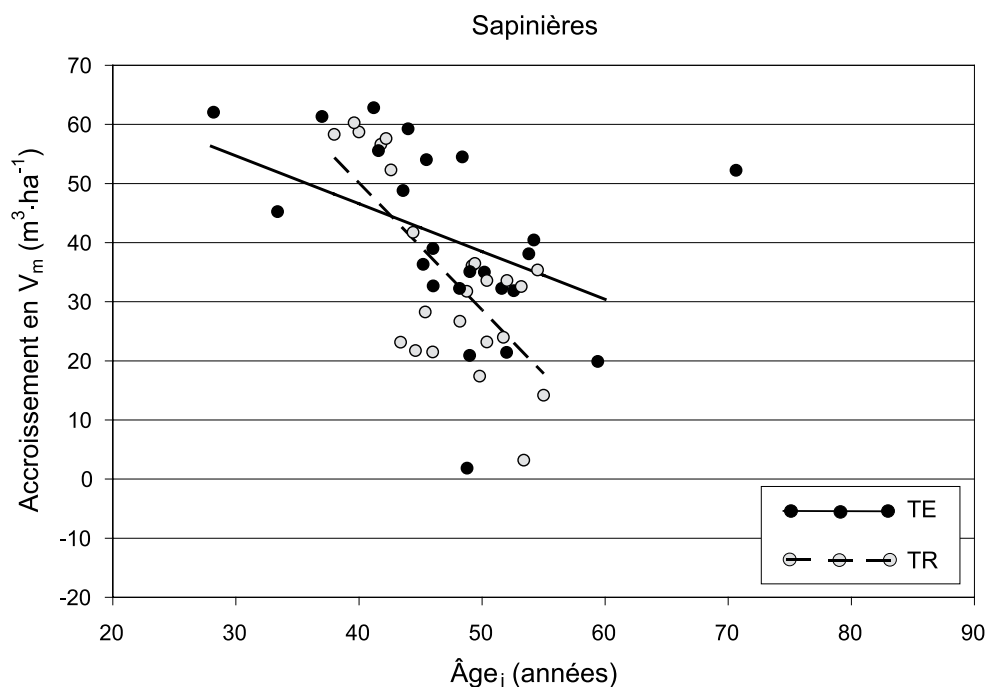


Figure 9. Données utilisées et courbes ajustées par régression de l'accroissement quinquennal en volume marchand (V_m) selon l'âge initial ($\hat{A}ge_i$), dans les sapinières témoins (TE) et traitées (TR).

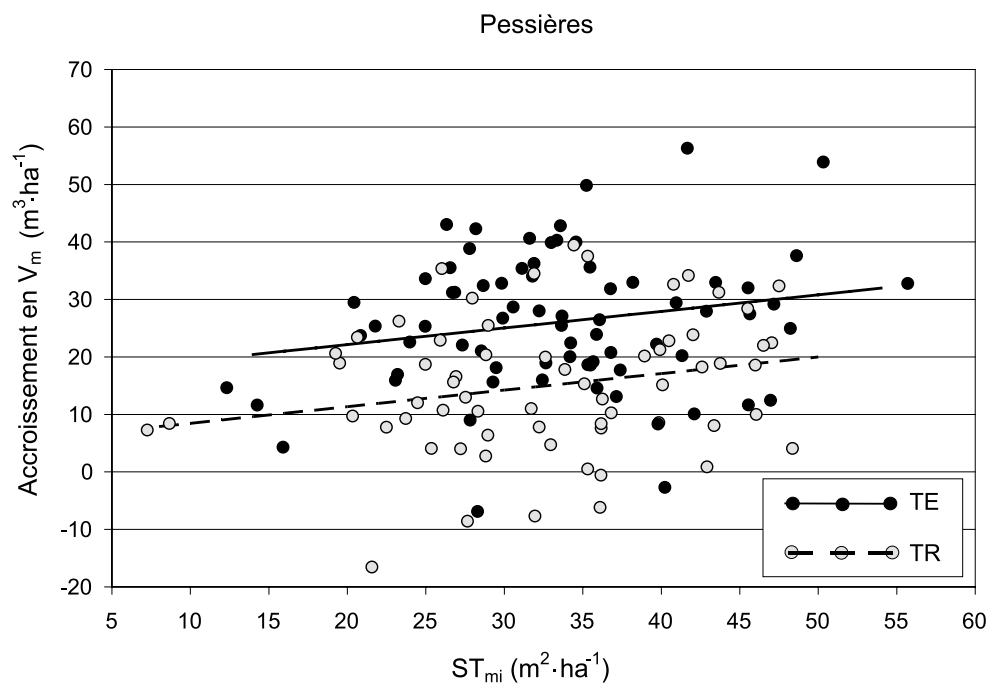


Figure 10. Données utilisées et courbes ajustées par régression de l'accroissement quinquennal en volume marchand (V_m) selon la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}), dans les pessières témoins (TE) et traitées (TR).

Tableau 9. Analyse de variance de l'accroissement quinquennal en volume sciage. Les effets significatifs sont indiqués en caractères gras.

Sources de variation (fixes)	Pessières			Pinèdes		Sapinières	
	dl _n ¹	dl _d ²	<i>p</i>	dl _d	<i>p</i>	dl _d	<i>p</i>
Traitement	1	70,7	0,0008	29	0,0038	24	0,6213

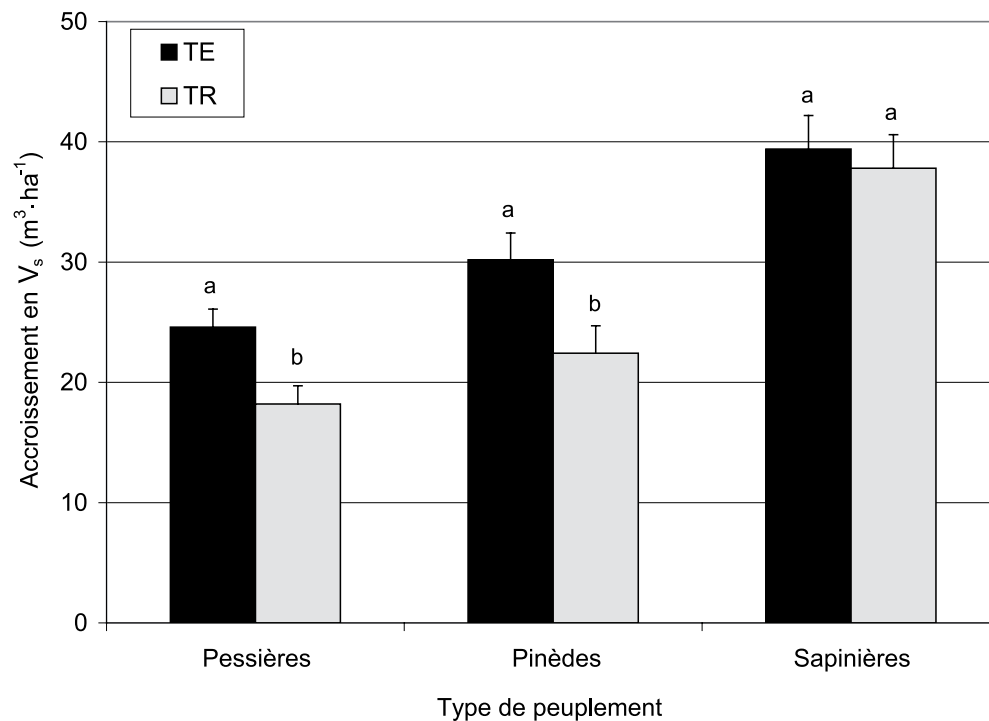
¹dl_n : degrés de liberté du numérateur;²dl_d : degrés de liberté du dénominateur selon l'approximation de Satterthwaite.Figure 11. Accroissement quinquennal moyen en volume sciage (V_s) dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR). Pour un type de peuplement donné, des lettres différentes signifient que les moyennes sont statistiquement différentes. Les barres au-dessus des bâtonnets représentent les erreurs-types (σ).

Tableau 10. Analyse de variance du volume marchand et du volume sciage, 5 ans après traitement.
Les effets significatifs sont indiqués en caractères gras.

Volume	Sources de variation (fixes)	Pessières			Pinèdes		Sapinières	
		dl _n ¹	dl _d ²	<i>p</i>	dl _d	<i>p</i>	dl _d	<i>p</i>
Marchand	Traitement	1	72	0,0001	31	0,0001	24	0,0001
Sciage	Traitement	1	72	0,0001	29,6	0,0029	24	0,0023

¹ dl_n : degrés de liberté du numérateur;

² dl_d : degrés de liberté du dénominateur selon l'approximation de Satterthwaite.

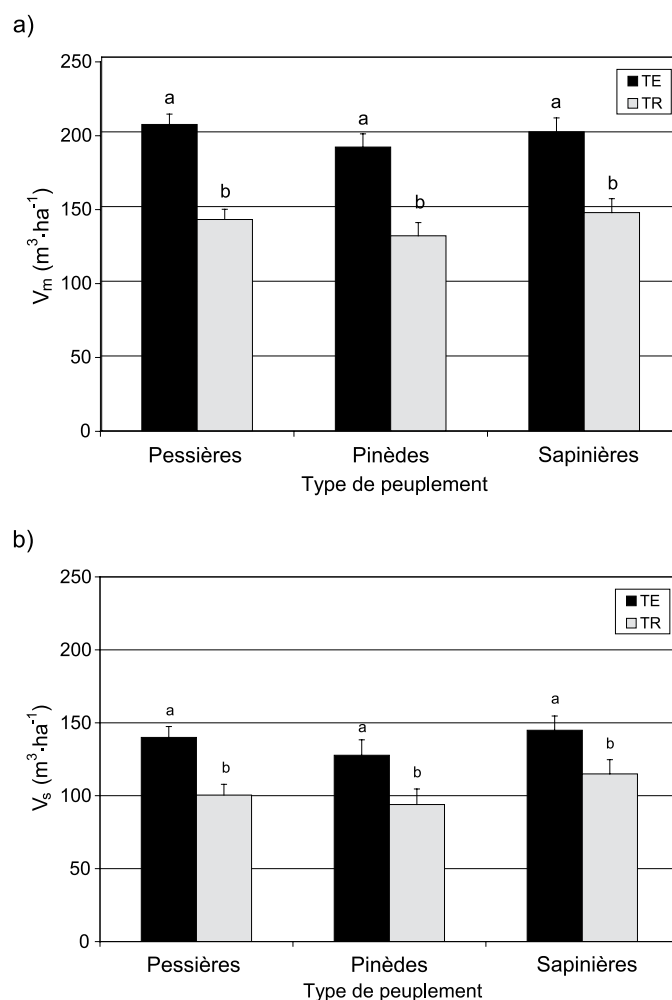
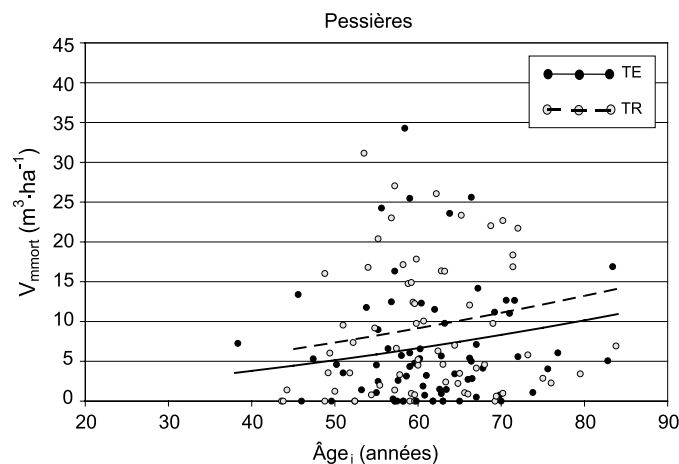
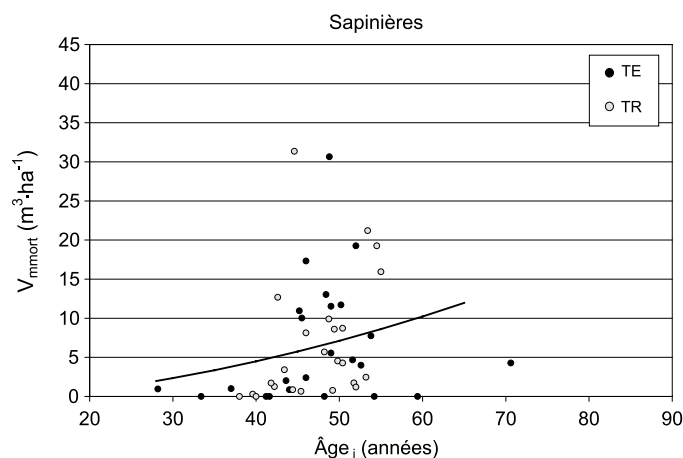


Figure 12. Valeurs de a) volume marchand moyen (V_m) et b) volume sciage moyen (V_s) mesurés 5 ans après traitement dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR). Pour un type de peuplement donné, des lettres différentes signifient que les moyennes sont statistiquement différentes. Les barres au-dessus des bâtonnets représentent les erreurs-types (σ).

Tableau 11. Analyse de variance du volume marchand des arbres morts et chablis pendant les 5 ans suivant le traitement. Les effets significatifs sont indiqués en caractères gras.

Sources de variation (fixes)	Pessières ¹			Pinèdes ¹		Sapinières ¹	
	dl _n ²	dl _d ³	p	dl _d	p	dl _d	p
Traitement	1	67,9	0,0107	28,4	0,5366	22,4	0,6182
Âge _i ⁴	1	105	0,0162			34,8	0,0343
IQS ⁵	1	97,1	0,0001				
ST _{mi} ⁶	1			55,8	0,0001	36,4	0,0005

¹ Transformation de la variable dépendante par racine carrée;² dl_n : degrés de liberté du numérateur;³ dl_d : degrés de liberté du dénominateur selon l'approximation de Satterthwaite;⁴ Âge_i : âge avant traitement;⁵ IQS : indice de qualité de station (m) à un âge de référence de 50 ans à 1 m de hauteur, déterminé avec l'équation de POTHIER et SAVARD (1998);⁶ ST_{mi} : surface terrière des arbres marchands (dhp ≥ 9,1 cm) avant traitement.Figure 13. Données utilisées et courbes ajustées par régression du volume marchand des arbres morts et chablis 5 ans après traitement (V_{mmort}), selon l'âge initial ($\hat{A}ge_i$), pour les pessières témoins (TE) et traitées (TR) croissant sur une station avec un IQS de 15 m.Figure 14. Données utilisées et courbe ajustée par régression du volume marchand des arbres morts et chablis 5 ans après traitement (V_{mmort}), selon l'âge initial ($\hat{A}ge_i$), pour les sapinières témoins (TE) et traitées (TR) ayant une surface terrière marchande initiale de 33 m²·ha⁻¹.

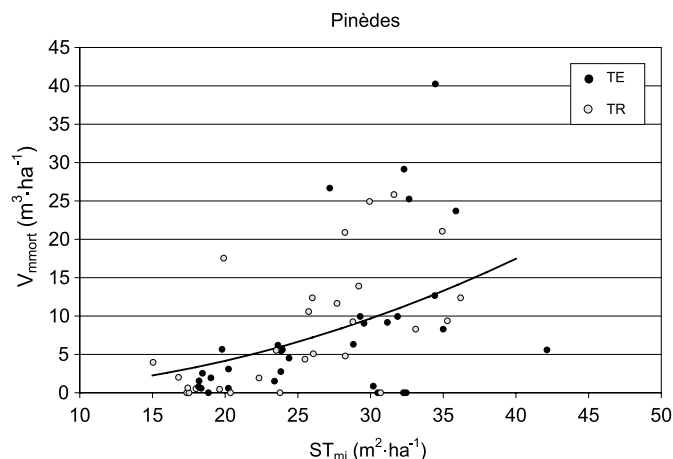


Figure 15. Données utilisées et courbe ajustée par régression du volume marchand des arbres morts et chablis (V_{mmort}) 5 ans après traitement, selon la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}), pour les pinèdes témoins (TE) et traitées (TR).

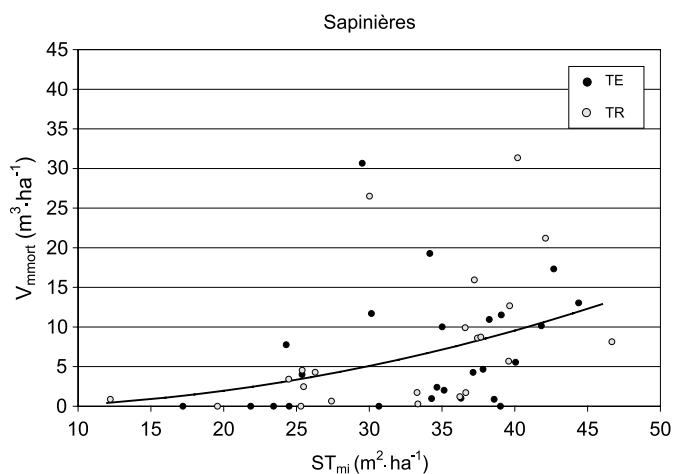


Figure 16. Données utilisées et courbe ajustée par régression du volume marchand des arbres morts et chablis (V_{mmort}) 5 ans après traitement, selon la surface terrière marchande initiale (ST_{mi}), pour les sapinières témoins (TE) et traitées (TR), dans un peuplement dont l'âge initial est de 47 ans.

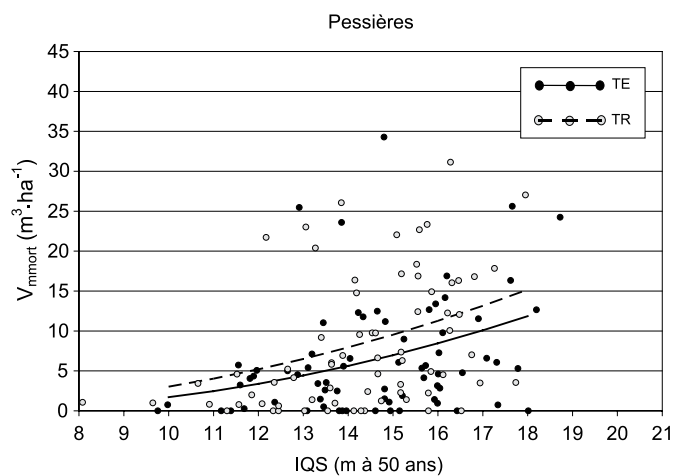


Figure 17. Données utilisées et courbes ajustées par régression du volume marchand des arbres morts et chablis (V_{mmort}) 5 ans après traitement, selon l'IQS, pour les pessières témoins (TE) et traitées (TR), dans un peuplement dont l'âge initial est de 62 ans.

Tableau 12. Moyennes ajustées du volume marchand des arbres morts et chablis au cours des 5 ans après traitement, dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), avec les valeurs moyennes des covariables significatives. Pour un type de peuplement donné, des lettres différentes signifient que les moyennes sont statistiquement différentes.

Volume marchand mort (m ³ ·ha ⁻¹)	Pessières			Pinèdes			Sapinières		
	TE	TR	Δ ¹	TE	TR	Δ	TE	TR	Δ
Moyenne ajustée	6,1 a	8,5 b	2,4	6,2 a	6,9 a	0,7	5,7 a	6,4 a	0,7
Intervalle de confiance à 95 %	4,8 – 7,5	7,0 – 10,1		5,0 – 9,4	5,5 – 10,3		3,9 – 8,3	4,4 – 9,3	

¹ Δ : différence entre les peuplements TE et TR.

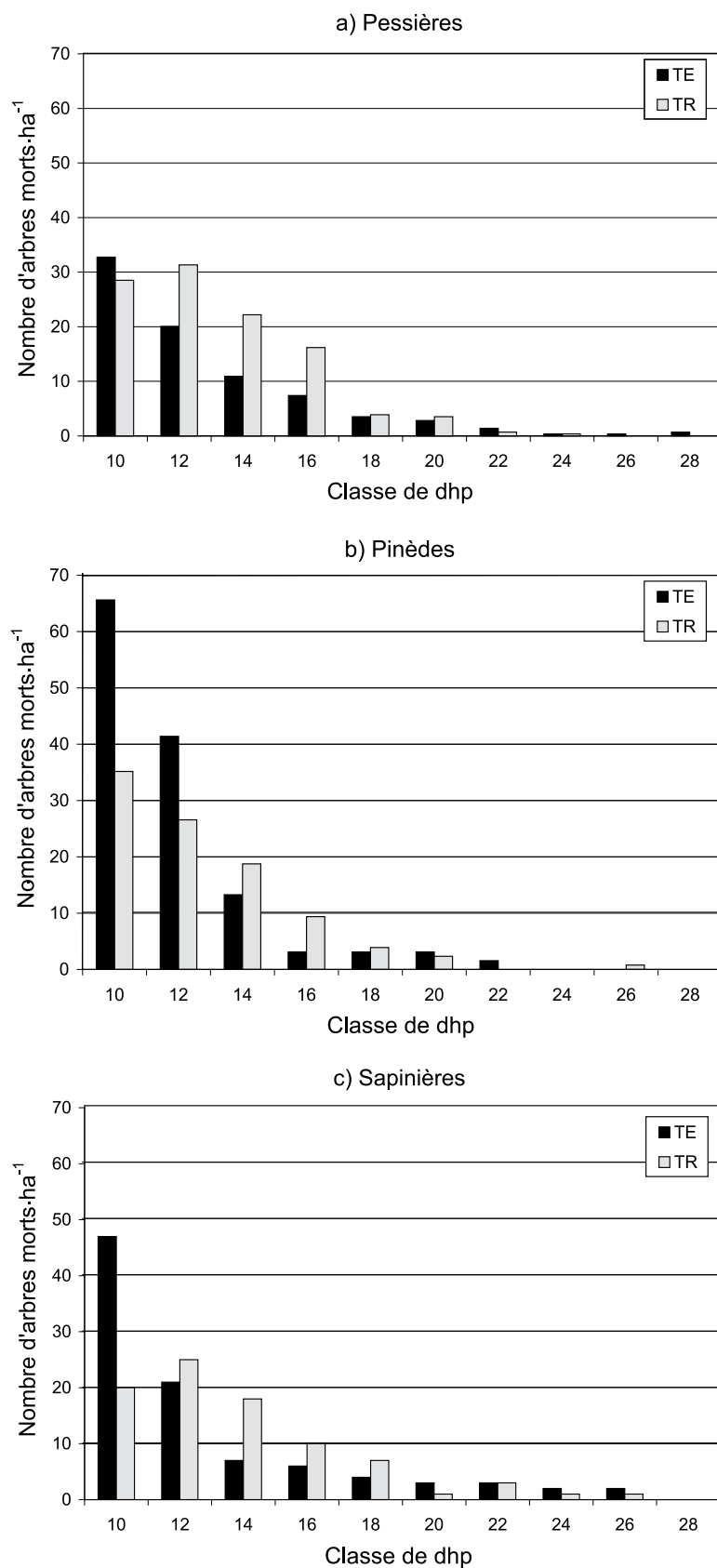


Figure 18. Nombre moyen d'arbres morts et chablis par classe de dhp dans les peuplements témoins (TE) et traités (TR), 5 ans après traitement, dans a) les pessières, b) les pinèdes et c) les sapinières.

Chapitre trois

Discussion

En général, le traitement a été réalisé sur des stations fertiles (classe d'IQS ≥ 15 m) et dans des peuplements comportant à la fois des volumes marchands et des surfaces terrières marchandes importants. Dans les pessières, les pinèdes et les sapinières échantillonnées, le volume marchand moyen avant la coupe variait de 154 à 174 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Ces valeurs dépassent largement celles prédites à partir des tables de production de POTHIER et SAVARD (1998), qui estiment une production variant de 117 à 153 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, pour un peuplement de densité relative forte, croissant sur une station de classe d'IQS de 15 m et dont l'âge moyen correspond à celui de chacun des types de peuplements étudiés. Parmi les facteurs qui peuvent contribuer à expliquer ces écarts, il y a le fait qu'un certain nombre de peuplements échantillonnés ont une surface terrière marchande plus importante que celle des peuplements présentés dans les tables, lorsque les autres caractéristiques sont similaires. Ensuite, l'emploi de relations hauteur-diamètre différentes a pu induire des écarts entre les hauteurs prédites pour des arbres ayant les mêmes diamètres. En l'occurrence, dans la présente étude, il est probable que l'utilisation d'une relation étalonnée à partir de la hauteur d'arbres codominants et dominants ait mené à une surestimation des hauteurs calculées pour les petits arbres.

Le moment d'intervention constitue un facteur clé dans la réussite de l'éclaircie commerciale. Ce moment est fonction du degré de compétition entre les arbres. La surface terrière est un bon indicateur de l'intensité de la compétition, et peut servir à déterminer le moment propice pour intervenir (RIOU-NIVERT 1984, RONDEUX 1993, PRÉSENT 1998, MRN 2003). Idéalement, l'éclaircie doit être faite avant que la compétition ne cause un ralentissement trop important de la croissance en diamètre des arbres (SMITH *et al.* 1997). À cet effet, les normes actuellement en vigueur recommandent d'effectuer l'éclaircie commerciale lorsque la surface terrière marchande se situe entre 23 et 33 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (MRNFP 2003). Dans la présente étude, 43 % des peuplements, essentiellement des sapinières et des pessières, affichaient une surface terrière marchande supérieure au seuil maximum. Sur la base de ce critère, bon nombre de peuplements étudiés étaient donc probablement exposés à une forte compétition depuis plusieurs

années. Le traitement aurait donc été réalisé trop tard pour être caractérisé comme une véritable éclaircie commerciale.

Le prélèvement a principalement été fait par le bas, ce qui a entraîné une légère hausse du diamètre quadratique moyen immédiatement après le traitement. L'intervention a réduit la densité des peuplements, leur permettant ainsi de respecter l'un des principaux fondements de l'éclaircie, soit la redistribution des ressources du milieu entre un nombre restreint d'individus. Néanmoins, une certaine proportion des pessières et des sapinières comportaient toujours une surface terrière marchande relativement importante après traitement. Dans leur cas, les effets de l'intervention pourraient s'avérer moins importants et de plus courte durée, car les arbres se concurrenceront plus rapidement.

Outre le degré de compétition, le délai prévu entre l'éclaircie et la récolte finale est un autre aspect à considérer pour fixer le moment de l'intervention. Cette période doit être suffisamment longue pour permettre d'obtenir les bénéfices escomptés. L'âge du peuplement, à lui seul, ne suffit pas pour fixer le moment de l'intervention, puisqu'il ne tient pas compte du niveau de compétition entre les arbres (PRÉSENT 1998). Il doit, en fait, être employé en combinaison avec d'autres facteurs, pour permettre de juger de la pertinence de traiter. Les normes actuellement en vigueur considèrent l'âge en spécifiant que l'éclaircie commerciale doit être réalisée au moins 15 ans avant la maturité du peuplement (MRNF 2008). Or, au début de la présente étude, 69 % des pessières, 73 % des pinèdes et 44 % des sapinières avaient atteint ou même dépassé l'âge d'exploitabilité absolu de peuplements de densité relative forte, selon les tables de production de POTHIER et SAVARD (1998). Sur la base de ce critère, une forte proportion de peuplements auraient donc été trop vieux pour être admissibles au traitement. Toutefois, dans une optique de production d'arbres de plus forts diamètres, et en s'appuyant sur le fait que le gain potentiel de l'éclaircie s'accroît en fonction du temps après l'éclaircie (CURTIS *et al.* 1997), l'âge de révolution pourrait être retardé afin de tirer pleinement profit de ce type de traitement, à condition que les caractéristiques des peuplements et de la station le permettent.

Dans les pessières et les pinèdes, même en utilisant l'âge d'exploitabilité technique, tel qu'établi par POTHIER et SAVARD (1998) avec les arbres ayant un dhp de 13,1 cm et plus et croissant dans des peuplements de densité relative forte, le traitement n'a généralement été réalisé qu'environ 5 ans avant le moment prévu pour la récolte finale. En fait, il n'y a que dans les sapinières que l'opération aurait été conforme au critère du nombre d'années avant la récolte finale. Sur la base de ce critère, il semble donc que le traitement effectué dans les pessières et les pinèdes devrait être considéré à tout le moins comme une éclaircie trop tardive. Il est reconnu qu'une éclaircie tardive et légère réalisée dans des peuplements non éduqués génère de modestes gains en diamètre (WEETMAN *et al.* 1980, GROOT *et al.* 1984), ce qui peut empêcher d'obtenir le diamètre minimal recherché (NYLAND 1996).

Étant donné les écarts notables observés dans plusieurs peuplements étudiés par rapport aux attributs normalement recherchés avant une éclaircie commerciale, le traitement effectué correspond souvent, en fait, à une coupe partielle. Pour être en mesure de porter un jugement sur l'applicabilité des résultats à une vraie éclaircie commerciale, les analyses ont été reprises en utilisant seulement les données recueillies dans les peuplements qui étaient véritablement aptes à être éclaircis. Les résultats ont été pratiquement identiques à ceux obtenus avec l'ensemble des informations. En conséquence, les effets rapportés ici peuvent renseigner aussi bien sur les effets d'une éclaircie commerciale que sur ceux d'une coupe partielle. Puisque ce dernier type de coupe risque fort de gagner en popularité avec l'adhésion aux principes de l'aménagement écosystémique, les résultats permettront possiblement de développer des connaissances pour une diversité de traitements applicables dans ce contexte.

Le principal objectif de l'éclaircie commerciale est de stimuler la croissance de manière à obtenir des arbres de plus fort diamètre (NYLAND 1996, SMITH *et al.* 1997). Le succès de l'éclaircie commerciale dépend donc de la capacité des arbres résiduels à réagir favorablement et rapidement à l'ouverture du couvert. L'analyse de la croissance à l'échelle des arbres individuels a permis d'observer qu'au cours de la période étudiée, le traitement a accéléré la croissance en diamètre des arbres dans tous les types de peuplements. Cette augmentation de l'accroissement a été de l'ordre de 15 % dans les pessières ainsi que dans les pinèdes et de 37 % dans les sapinières, par rapport aux peuplements témoins.

Tout comme dans BERTRAND et BOLGHARI (1970), une relation positive a été observée entre l'accroissement en dhp et le diamètre initial, aussi bien dans les peuplements témoins que traités. Dans la présente étude, l'accroissement moyen d'un arbre avec un dhp initial de 20 cm a été environ le double de celui d'un arbre de 10 cm. En dépit de l'effet significatif du traitement dans les trois types de peuplements, la hausse de diamètre attribuable à l'intervention n'a été réellement appréciable que dans les sapinières, où l'augmentation de croissance a été environ quatre fois plus importante que dans les pessières et les pinèdes. Dans tous les peuplements, les gros arbres, faisant partie des étages dominant et codominant, sont en meilleure position que les plus petits pour exploiter les ressources, comme en témoignent leurs plus forts accroissements en diamètre. Malgré cela, ils ont également été capables de tirer profit d'une partie des ressources rendues disponibles à la suite de l'intervention, puisque leur croissance quinquennale a été plus forte dans les peuplements traités que dans les peuplements témoins. Ce constat contribue à appuyer la directive des modalités d'intervention préconisant la récolte prioritaire des petits arbres marchands (MRNF 2008). Par contre, puisque le gain est constant pour toutes les dimensions, les plus petits arbres sont ceux ayant eu le taux de croissance le plus fort. Une tendance semblable a été observée par VINCENT *et al.* (2009), sur une période de 10 ans dans des pessières noires, par BOLGHARI (1980) pendant les premières années après éclaircie dans des peuplements composés d'un mélange de sapins et d'épinettes, ainsi que par ZARNOVICAN *et al.* (2001) dans des sapinières pures. Il en va de même pour les résultats d'autres études effectuées sur plusieurs essences (MOORE *et al.* 1994, MÄKINEN et ISOMÄKI 2004b et 2004c, PUETTMAN *et al.* 2009). Les petits arbres peuvent donc bénéficier eux aussi du traitement.

Les relations entre l'âge initial et la croissance en diamètre des arbres, de même que celles entre la surface terrière marchande avant la coupe et la croissance en diamètre, ont généralement été négatives, tant dans les peuplements témoins que traités. Cela pourrait s'expliquer par une baisse de vigueur des arbres, à mesure que l'intensité de la compétition augmente, notamment en raison de la mortalité des branches basses. Dans ces conditions, la diminution de la proportion de cime vivante peut ralentir la croissance en diamètre de l'arbre (SPRINZ et BURKHART 1987, SMITH *et al.* 1997, HARRINGTON 2001). Par contre, le fait que la croissance des peuplements d'âges différents réagisse de la même façon aux deux traitements ne corrobore pas l'hypothèse selon laquelle

les jeunes arbres réagissent mieux à l'éclaircie que les plus vieux (THORPE et THOMAS 2007, DEL RIO *et al.* 2008). Il faut cependant garder à l'esprit que les résultats n'ont été obtenus que sur une très courte période d'observation, et ne permettent donc pas de caractériser les effets à plus long terme.

Contrairement à l'analyse du diamètre des arbres survivants, l'analyse du diamètre quadratique moyen des arbres marchands reflète davantage la dynamique du peuplement, car elle intègre à la fois la croissance, la mortalité et le recrutement des arbres durant la période quinquennale. Le traitement a amélioré l'accroissement quinquennal en diamètre quadratique moyen de 32 % dans les pessières et de 47 % dans les sapinières, mais il n'a pas eu d'effet significatif dans les pinèdes. Les résultats d'accroissement quinquennal en diamètre quadratique moyen des 500 plus gros arbres à l'hectare démontrent que seules les sapinières ont connu un gain significatif. CURTIS (2006) et EMMINGHAM *et al.* (2007) ont aussi observé une hausse substantielle du diamètre quadratique moyen des arbres dominants dans des peuplements de sapin Douglas. Comme pour l'accroissement en diamètre, cette réaction du D_{qm} des 500 plus gros arbres à l'hectare pourrait être attribuable à l'autécologie de cette essence. Il en va de même des résultats obtenus à plus long terme par MÄKINEN et ISOMÄKI (2004d), avec les 400 plus gros arbres à l'hectare dans des peuplements d'épinette de Norvège traités en éclaircie forte, et ce, sans égard à leur âge au moment de l'intervention.

La croissance diamétrale occupe habituellement un faible niveau de priorité dans l'allocation des hydrates de carbone disponibles (LANNER 1985). Elle est donc sensible à la compétition pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs, particulièrement en peuplements denses. C'est possiblement pour cette raison, que dans l'ensemble, et même si l'intervention a souvent été réalisée tardivement, le traitement a généré une augmentation de la croissance en dhp et en diamètre quadratique moyen, conformément à d'autres études (CURTIS *et al.* 1997, ZARNOVICAN *et al.* 2001, MRN 2003, RAULIER *et al.* 2003, KARLSSON 2006, PELLETIER et PITT 2008). La coupe aurait donc permis de réduire la compétition qui limitait la croissance des arbres. La faiblesse des gains obtenus est, quant à elle, fort probablement due à la courte période d'observation. En effet, la réaction des arbres résiduels ne ferait que débiter, puisque les premières années constituent généralement une période d'acclimatation aux nouvelles conditions, pendant laquelle l'arbre améliore ses caractéristiques de cime vivante. Des études portant sur des coupes partielles réalisées

dans des peuplements matures, et même surannés, ont effectivement observé un délai de réaction de 2 à 5 ans (CORRIVEAU 1971, YOUNGBLOOD 1991, VIENS 2001, ZARNOVICAN *et al.* 2001, BEBBER *et al.* 2004, BEVILACQUA *et al.* 2005, THORPE *et al.* 2007, SOUCY *et al.* 2012) avant qu'un sommet de croissance ne survienne, 6 à 25 ans après traitement (HYNYNEN 1995, VIENS 2001, THORPE et THOMAS 2007, THORPE *et al.* 2007, SOUCY *et al.* 2012). Il est admis que la longueur de la période d'acclimatation dépend des caractéristiques des espèces et des stations, de l'intensité de la compétition entre les arbres et de la durée au cours de laquelle elle s'est manifestée (HARRINGTON et REUKEMA 1983, HARRINGTON 2001, DOUCET *et al.* 2009).

La forte tolérance du sapin à l'ombre pourrait expliquer les gains plus importants observés dans les sapinières que dans les autres types de peuplements, malgré la courte période de suivi. Cette caractéristique est également citée par MÄKINEN et ISOMÄKI (2004c) pour expliquer les différences de réponses entre les essences qu'ils ont étudiées. En fait, la grande tolérance à l'ombre des espèces comme le sapin pourrait permettre aux arbres de conserver une cime plus longue même en conditions de compétition, ce qui leur permettrait de réagir plus rapidement à l'ouverture du couvert (NYLAND 1996). De plus, le sapin est capable d'augmenter rapidement sa cime, comme l'a observé RIOPEL (1999) sur des arbres de plus de 5 m et ayant une faible proportion de cime au moment de la coupe. MCCARTHY (1918) a aussi rapporté que l'accroissement en diamètre des petits sapins pouvait réagir positivement dans ce court laps de temps. Finalement, MCGRAW (1948) a noté que le sapin est apte à réagir en croissance diamétrale, malgré l'exposition à une période de compétition intense pouvant aller jusqu'à 40 ans.

L'éclaircie commerciale par le bas est généralement considérée comme le meilleur type d'intervention pour augmenter à long terme la qualité des arbres composant les peuplements (EMMINGHAM *et al.* 2007). Toutefois, dans la présente étude, l'intervention a réduit l'accroissement quinquennal en volume marchand d'environ 42 % dans les pessières, 35 % dans les pinèdes et 16 % dans les sapinières, comparativement aux placettes témoins. L'accroissement en volume sciage a aussi été réduit d'environ 26 % dans les placettes traitées des pessières et des pinèdes. Dans ces deux derniers cas notamment, les baisses observées risquent donc de compromettre l'atteinte de l'objectif de production à long terme de volume de matière ligneuse. Parmi les facteurs pouvant expliquer cette situation, citons la densité des peuplements à la suite du

traitement (MÄKINEN et ISOMÄKI 2004a et 2004d) et le caractère souvent tardif des interventions réalisées. Devant une telle diminution d'accroissement, la concrétisation d'une hausse de la valeur monétaire des arbres repose sur leur capacité à passer à une catégorie de dimensions à valeur plus élevée. Par ailleurs, dans les sapinières, la relation négative entre l'âge initial et l'accroissement quinquennal en volume marchand serait attribuable à la plus faible croissance en diamètre des arbres résiduels dans les peuplements plus âgés; cela confirme aussi la pertinence d'intervenir plus tôt.

Il est important de noter que les accroissements quinquennaux en volume marchand et en volume sciage obtenus dans certains peuplements excèdent largement ceux des tables de productions de POTHIER et SAVARD (1998) pour des peuplements aux caractéristiques similaires. Les explications possibles de ces différences sont essentiellement les mêmes que celles avancées pour comprendre les écarts entre les volumes marchands. Toutefois, il s'avère que les valeurs obtenues s'approchent de l'accroissement annuel de $8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ observé par POTHIER (1998) au cours d'une période de 10 ans, dans des sapinières âgées de 30 ans au moment de l'éclaircie, sur une station avec un IQS de 14 m à 50 ans et ayant alors une surface terrière marchande d'environ $20 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Elles ressemblent aussi à l'accroissement annuel périodique de $9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ retrouvé dans les tables de production de TREMBLAY *et al.* (1997), pour la période de 20 à 30 ans, dans une sapinière dense ($20 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ à 10 ans) et se développant sur une station fertile. De plus, ces valeurs s'apparentent aux accroissements annuels moyens nets de $5,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans les placettes témoins et de $8,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans les placettes traitées, observés par BERTRAND et BOLGHARI (1970) au cours des 10 années suivant le traitement. Ces derniers résultats ont été obtenus dans un peuplement composé d'épinettes et de sapin âgés de 45 ans, où la hauteur moyenne des arbres codominants et dominants était de 12,8 m et la surface terrière totale, de plus de $38 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ avant intervention. Malgré leurs similitudes avec les accroissements observés dans ces études, une certaine proportion des placettes a été établie dans des peuplements très productifs et ayant eu une évolution exceptionnelle, comparative-ment aux tables de production disponibles. Dès lors, il faut faire preuve de prudence avant d'appliquer les résultats à d'autres peuplements, même si ceux-ci ont des caractéristiques similaires.

Cinq ans après traitement, le volume marchand sur pied des placettes témoins était environ 1,4 fois celui des placettes traitées, dans les trois types de peup-

lements. Ces réductions notées dans les placettes traitées tendent à appuyer l'hypothèse selon laquelle l'éclaircie ne permet pas d'augmenter de façon importante la production marchande d'un peuplement (OMULE 1988, McWILLIAMS et THÉRIEN 1996, MRN 2003, PELLETIER et PITT 2008). Selon l'évolution des peuplements au cours des prochaines années, les baisses de volume engendrées pourraient même se traduire par une diminution de la production, comme c'est le cas lorsque le prélèvement est important (MÄKINEN et ISOMÄKI 2004a et 2004d) ou lorsque les sentiers de débardage occupent une trop grande proportion de la superficie, ou qu'ils sont trop larges (MRN 2003). Il semble qu'un dosage judicieux entre la superficie et la largeur des sentiers puisse jouer un rôle bénéfique, malgré l'impact négatif qui leur est fréquemment associé. En effet, à condition que les arbres qui les bordent ne soient pas blessés, les sentiers peuvent avoir un effet positif sur la croissance en surface terrière des arbres individuels situés à proximité (ROBERTS et HARRINGTON 2008).

À l'instar du volume marchand, le volume sciage obtenu après 5 ans s'est avéré plus faible dans les peuplements traités que les témoins. Toutefois, dans les sapinières, il semble que la hausse de la croissance en diamètre générée par l'intervention ait permis d'obtenir un accroissement moyen similaire en volume sciage. Étant donné que l'accroissement annuel moyen devrait culminer plus tardivement dans un peuplement traité (CURTIS et MARSHALL 2002), l'écart en volume sciage entre les peuplements témoins et traités devrait diminuer, sans nécessairement disparaître, à mesure que la récolte finale sera retardée.

Le volume marchand cumulatif, soit la somme du volume sur pied et du volume récolté, demeure plus faible dans les placettes traitées, avec des valeurs aux environs de 90 % de celles des peuplements témoins. Quelques auteurs mentionnent qu'il serait possible d'augmenter la production cumulative d'un peuplement par la récupération des arbres destinés à mourir en raison de la compétition entre les arbres (GROOT *et al.* 1984, OMULE 1988). Ceci nécessiterait toutefois l'application d'un scénario d'éclaircies multiples dont l'intensité serait semblable à la mortalité périodique prévue, et incluant une première intervention hâtive (PRÉSENT 1998, MRN 2003), soit autant de conditions contraires à celles rencontrées dans la présente étude. Qui plus est, comme une bonne part de cette mortalité serait généralement composée d'individus de faibles dimensions (MÄKINEN et ISOMÄKI 2004a et 2004d, LUSSIER *et al.* 2002), le volume potentiellement récoltable serait faible.

Le volume moyen de mortalité quinquennale a été faible dans tous les types de peuplements, tant dans les placettes témoins que traitées, se situant entre 3 et 5 % du volume marchand initial. Il semble donc que le traitement n'ait pas augmenté substantiellement la mortalité, malgré les âges avancés et les densités élevées d'un bon nombre de peuplements étudiés. Puisqu'un des avantages attendus de l'éclaircie commerciale est de diminuer la mortalité observée dans les pessières, et son maintien dans les deux autres types de peuplements, appuient l'idée que le traitement réalisé s'apparente plutôt à une coupe partielle. Par contre, sur la base du seuil de 10 % proposé par COATES (1997) pour juger de l'échec ou non d'une coupe partielle, les interventions réalisées pourraient être considérées réussies. Il faut néanmoins garder à l'esprit qu'il s'agit ici de résultats obtenus à partir des informations recueillies pendant une courte période après traitement, et que l'évolution future de la mortalité pourrait nuire à la réussite du traitement dans certains peuplements, voire même la compromettre. Bien que les chicots et les gros débris ligneux soient des composantes essentielles des écosystèmes forestiers (MASER et TRAPPE 1984, MCCARTHY et BAILEY 1994), la mortalité qui survient après la coupe doit demeurer suffisamment faible pour permettre l'atteinte des objectifs de production en termes de matière ligneuse.

Dans les sapinières et les pinèdes, la relation observée entre les pertes en volume et la surface terrière marchande initiale indique une mortalité plus importante dans les peuplements les plus denses. Cette mortalité a aussi été plus forte dans les pessières et les sapinières âgées. Il est plausible qu'elle résulte du degré et de la durée de la compétition intense vécue

dans les peuplements denses et âgés. En outre, les arbres se développant dans ces conditions ont habituellement un fort ratio H/D (hauteur totale/dhp), ce qui les rend plus instables. Une ouverture du couvert augmente alors grandement les risques de chablis (RIOU-NIVERT 1984, BECQUEY 1986), et ce, d'autant plus si elle survient tardivement. Les pertes ont également été plus fortes dans les pessières croissant sur des stations fertiles. Cela est possiblement attribuable au fait que la compétition se manifeste plus rapidement et plus intensément sur les stations plus productives, ce qui réduit le taux de survie des arbres (PRÉSENT 1998). Malgré que l'effet des caractéristiques initiales varie entre les types de peuplements, il est généralement admis que l'augmentation de l'âge ou de la densité contribue à générer des conditions propices à une mortalité plus importante (SAVILL 1983, MRN 2003).

Les pertes ont été similaires ou légèrement plus importantes dans les peuplements traités que témoins, alors qu'elles auraient normalement dû diminuer dans les premiers. La principale cause pourrait être l'application tardive du traitement. Une autre explication pourrait être que des arbres résiduels, notamment moyens et gros, ont pu subir des blessures lors de l'intervention, ce qui aurait influencé leur taux de mortalité après la coupe (MOORE *et al.* 2002, BLADON *et al.* 2008). La présence des sentiers, et tout particulièrement leur proximité, pourrait contribuer à cette situation (THORPE *et al.* 2008). De plus, bien qu'il ne soit pas possible d'isoler spécifiquement les pertes par chablis, ces dernières pourraient constituer une part de la mortalité observée, puisque ce phénomène survient généralement dans un horizon d'environ 5 ans après une coupe (CREMER *et al.* 1982, RUEL 1995).

Conclusion

Le traitement pratiqué par le bas dans des peuplements résineux a considérablement réduit la compétition entre les arbres, respectant ainsi l'objectif premier de l'éclaircie commerciale. Toutefois, comme la majorité des peuplements étaient plus vieux et plus denses que ceux normalement destinés à une éclaircie commerciale, l'intervention la plus fréquemment réalisée a été, en fait, une coupe partielle. Bien qu'il y ait des différences fondamentales entre ces deux traitements, les résultats obtenus ont été similaires, que l'analyse inclut tous les peuplements ou qu'elle se limite à ceux aptes à une éclaircie commerciale. Ceci indique que les connaissances développées peuvent servir à caractériser les effets à court terme pour la gamme d'interventions étudiées. Les résultats peuvent donc s'appliquer aussi à des coupes partielles, lesquelles pourraient gagner en popularité, dans un contexte d'application des principes de l'aménagement écosystémique. Il faut cependant utiliser ces résultats avec discernement, car un certain nombre de peuplements avaient des caractéristiques initiales et d'évolution exceptionnelles, comparativement à ceux habituellement retrouvés dans des conditions similaires.

Malgré la courte période de suivi, une réaction positive et notable a été observée dans les sapinières traitées, en termes d'accroissement en diamètre des arbres individuels. Dans tous les types de peuplements, la diminution du nombre d'arbres, et par le fait même, celle du volume sur pied après intervention, s'est cependant traduite par une baisse de l'accroissement quinquennal en volume marchand ainsi que du volume marchand cumulatif. De même,

5 ans après intervention dans les placettes traitées, le volume sciage a été inférieur à celui des témoins dans les trois types de peuplements. Cependant, l'accroissement en volume sciage a tout de même été semblable dans les sapinières témoins et traitées. Les pertes par mortalité, quant à elles, ont été similaires ou légèrement plus importantes dans les peuplements traités. Puisque la baisse de mortalité est un des principaux bénéfices attendus lors de l'application d'une éclaircie commerciale, l'augmentation de mortalité observée confirme l'idée que l'intervention généralement appliquée ait été une coupe partielle. Par ailleurs, les effets négatifs de l'augmentation de la densité, de l'âge ou de l'IQS notés sur plusieurs des variables analysées mettent en évidence la pertinence d'intervenir au bon moment.

Étant donné l'âge et la densité de plusieurs peuplements, les arbres qui les composent ont dû subir une forte compétition pendant une bonne période. Dans ces conditions, il est donc plausible que la période d'acclimatation des arbres aux nouvelles conditions ne soit pas encore complétée dans tous les peuplements et pour toutes les essences. Néanmoins, le traitement devrait permettre d'augmenter la croissance en diamètre des arbres, ce qui favoriserait l'obtention d'une plus forte proportion de gros arbres lors de la coupe finale. La poursuite des mesures sera nécessaire pour quantifier réellement les effets, notamment pour vérifier ou bonifier les hypothèses de rendement découlant de l'application opérationnelle de l'éclaircie commerciale ou de coupes partielles, et pour préciser les conditions de peuplements et de stations propices à la réalisation de ces traitements.

Références bibliographiques

- BEBBER, D.P., S.C. THOMAS, W.G. COLE et D. BALSILLIE, 2004. *Diameter increment in mature eastern white pine Pinus strobus L. following partial harvest of old-growth stands in Ontario, Canada*. Trees 18 : 29-34.
- BECQUEY, J., 1986. *Hauteur et facteur d'élancement : un équilibre à respecter*. Forêt-Entreprise 34 : 14-21.
- BÉGIN, J. et F. RAULIER, 1995. *Comparaison de différentes approches, modèles et tailles d'échantillons pour l'établissement de relations hauteur-diamètre locales*. Can. J. For. Res. 25 : 1303-1312.
- BERTRAND, V. et H. BOLGHARI, 1970. *L'effet d'une coupe d'éclaircie dans un peuplement dense d'épinettes et de sapin baumier âgé de 45 ans au sud-est de Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Terres et Forêts, Service de la recherche. Mémoire n° 1. 21 p.
- BEVILACQUA, E., D. PUTTOCK, T.J. BLAKE et D. BURGESS, 2005. *Long-term differential stem growth responses in mature eastern white pine following release from competition*. Can. J. For. Res. 35 : 511-520.
- BLADON, K.D., V.J. LIFFERS, U. SILINS, S.M. LANDHAUSSER et P.V. BLENIS, 2008. *Elevated mortality of residual trees following structural retention harvesting in boreal mixedwoods*. For. Chron. 84 : 70-75.
- BOLGHARI, H.A., 1980. *Croissance d'un peuplement de sapin-épinette à la suite de l'éclaircie et de la fertilization au sud-est de Québec*. Nat. Can. 107 : 135-149.
- COATES, K.D., 1997. *Windthrow damage 2 years after partial cutting at the Date Creek silvicultural systems study in the Interior Cedar-Hemlock forests of Northwestern British Columbia*. Can. J. For. Res. 27 : 1695-1701.
- CREMER, K.W., C.J. BOROUGH, F.H. MCKINNEL et P.P. CARTER, 1982. *Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations*. N. Z. J. For. Sci. 12 : 245-268.
- CORRIVEAU, A., 1971. *L'intensité de l'éclaircie, ses effets sur un peuplement de sapin baumier de 40 ans. Projet Q-85*. Ministère de l'environnement, Services canadien de forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Sainte-Foy, Québec. Rapport d'information Q-F-X-20. 44 p.
- CURTIS, R.O., 2006. *Volume growth trends in a Douglas-fir levels-of-growing-stock study*. West. J. Appl. For. 21 : 79-86.
- CURTIS, R.O., D.D. MARSHALL et J.F. BELL, 1997. *Logs. A pioneering example of silvicultural research in Coastal Douglas-fir*. J. For. 95 : 19-25.
- Curtis, R.O. et D.D. Marshall, 2002. *Levels-of-growing-stock cooperative study in Douglas-fir : Report no. 14- Stampede Creek : 30-year results*. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Research Paper PNW-RP-543. 77 p. [<http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/rp543.pdf>].
- DEL RIO, M., R. CALAMA, I. CAÑELLAS, S. ROIG et G. MONTERO, 2008. *Thinning intensity and growth response in SW-European Scots pine stands*. Ann. For. Sci. 65 : 308. [<http://dx.doi.org/10.1051/forest:2008009>].
- DOUCET, R., J.-C. RUEL, S. JUTRAS, G. LESSARD, M. PINEAU, G. PRÉSENT et N. THIFFAULT, 2009. *Sylviculture appliquée*. Chapitre 29 dans : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (éditeur), *Manuel de foresterie*, 2^e édition. Éditions Multi-Mondes, Québec, p. 1147-1186.
- EMMINGHAM, W., R. FLETCHER, S. FITZGERALD et M. BENNETT, 2007. *Comparing tree and stand volume growth response to low and crown thinning in young natural Douglas-fir stands*. West. J. Appl. For. 22 : 124-133.
- GREGOIRE, T.G., Q.F. LIN, J. BOUDREAU et R. NELSON, 2008. *Regression Estimation Following the Square-Root Transformation of the Response*. For. Sci. 54 : 597-606.
- GROOT, A., K.M. BROWN, I.K. MORRISON et J.E. BARKER, 1984. *A 10-year tree and stand response of jack pine to urea fertilization and low thinning*. Can. J. For. Res. 14 : 44-50.
- HARRINGTON, C.A. et D.L. REUKEMA, 1983. *Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation*. For. Sci. 29 : 33-46.
- HARRINGTON, T.B., 2001. *Silvicultural approaches for thinning southern pines: method, intensity, and timing*. Georgia Forestry Commission. Publication No. FSP002. 17 p. [<http://www.gfc.state.ga.us/resources/publications/SilviculturalApproaches.pdf>].

- HYNNEN, J., 1995. *Predicting the growth response to thinning for Scots pine stands using individual-tree growth model*. Silva Fenn. 29 : 225-246.
- KARLSSON, K., 2006. *Impact of the thinning regime on the mean diameter of the largest stems by diameter at breast height in even-aged Picea abies stands*. Scand. J. For. Res. 21 : 20-31.
- LANNER, R.M., 1985. *On the insensitivity of height growth to spacing*. For. Ecol. Manage. 13 : 143-148.
- LUSSIER, J.M., H. MORIN et R. GAGNON, 2002. *Mortality in black spruce stands of fire or clear-cut origin*. Can. J. For. Res. 32 : 539-547.
- MÄKINEN, H. et A. ISOMÄKI, 2004a. *Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland*. For. Ecol. Manage. 201 : 311-325.
- MÄKINEN, H. et A. ISOMÄKI, 2004b. *Thinning intensity and long-term changes in increment and stem form of growth of Norway spruce trees*. For. Ecol. Manage. 201 : 295-309.
- MÄKINEN, H. et A. ISOMÄKI, 2004c. *Thinning intensity and long-term changes in increment and stem form of growth of Scots pine trees*. For. Ecol. Manage. 203 : 21-34.
- MÄKINEN, H. et A. ISOMÄKI, 2004d. *Thinning intensity and growth of Norway spruce stands in Finland*. Forestry 77 : 349-364.
- MASER, C. et J.M. TRAPPE (technical editors), 1984. *The seen and unseen world of the fallen tree*. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. General Technical Report PNW-GTR-164. 64 p. [http://www.fs.fed.us/pnw/publications/pnw_gtr164/].
- MCCARTHY, E.F., 1918. *Accelerated growth of balsam fir in the Adirondacks*. J. For. 16 : 304-307.
- MCCARTHY, B. et R. BAILEY, 1994. *Distribution and abundance of coarse woody debris in a managed forest landscape of central Appalachians*. Can. J. For. Res. 24 : 1317-1329.
- MCGRAW, W.E., 1948. *Growth of balsam fir in Newfoundland*. Pulp. Paper. Mag. Can. 49 : 280-286.
- MCWILLIAMS, E.R.G. et G. THÉRIEN, 1996. *Fertilization and thinning effects on a Douglas-fir ecosystem at Shawnigan Lake : 24-year growth response*. Canadian Forest Service and British Columbia Ministry of Forests, Victoria, B.C. FRDA Rep. No. 269. 44 p. [<http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Frr/Frr269.pdf>].
- MILLIKEN, G.A. et D.E. JOHNSON, 2002. *Analysis of messy data. Volume III : Analysis of covariance*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 605 p.
- [MFO] MINISTÈRE DES FORÊTS, 1992. *Manuel d'aménagement forestier, 2^e édition*. Gouvernement du Québec. Québec. 267 p.
- [MRN] MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1997. *Manuel d'aménagement forestier, 3^e édition*. Gouvernement du Québec. Québec. 112 p.
- [MRN] MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 2002. *Ressources et industries forestières, Portrait statistique*. Édition 2002. 397 p.
- [MRN] MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 2003. *Éclaircie commerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM*. Avis scientifique. Comité consultatif scientifique du Manuel d'aménagement forestier. 79 p. [<ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Mono/2011/09/1087926.pdf>].
- [MRNF] MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE, 2008. *Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits. Exercice 2007-2008*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Code de diffusion : 2007-3017. 146 p. [ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Perio/0816807/2007_08.pdf].
- [MRNFP] MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, DE LA FAUNE ET DES PARCS, 2003. *Manuel d'aménagement forestier, 4^e édition*. Gouvernement du Québec. Québec. 245 p.
- MOORE, J.A., L. ZHANG et J.D. NEWBERRY, 1994. *Effects of intermediate silvicultural treatments on distribution of within-stand growth*. Can. J. For. Res. 24 : 398-404.
- MOORE, J.R., D.A. MAGUIRE, D.L. PHILLIPS et C.B. HALPERN, 2002. *Effects of varying levels and patterns of green-tree retention on amount of harvesting damage*. West. J. Appl. For. 17 : 202-206.
- NYLAND, R.D., 1996. *Silviculture, Concepts and Applications*. The McGraw-Hill Companies, Inc. New York. 633 p.
- OMULE, S.A.Y., 1988. *Growth and yield 35 years after commercially thinning 50-year-old Douglas-fir*. Canadian Forestry Service and British Columbia Ministry of Forests and Lands, Victoria, B.C. FRDA Report No. 21. 15 p. [<http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/Frr/Frr021.pdf>].

- PELLETIER, G. et D.G. PITT, 2008. *Silvicultural responses of two spruce plantations to midrotation commercial thinning in New Brunswick*. Can. J. For. Res. 38 : 851-867.
- PERRON, J.-Y., 2003. *Tarif de cubage – volume marchand brut*. 3^e publication, Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de l'inventaire forestier. 55 p. [<http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/tarif-de-cubage-64.pdf>].
- 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. et F. SAVARD, 1998. *Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers. Publication RN98-3054. 184 p.
- PRÉSENT, G., 1998. *L'éclaircie dans les plantations*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 133. 38 p. [<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire133.pdf>].
- PUETTMANN, K.J., A.W. D'AMATO, U. KOHNLE et J.B. BRAUHUUS, 2009. *Individual-tree growth dynamics of mature Abies alba during repeated irregular group shelterwood (Femelschlag) cuttings*. Can. J. For. Res. 39 : 2437-2449.
- RAULIER, F., D. POTHIER et Y. BERNIER, 2003. *Predicting the effect of thinning on growth of dense balsam fir stand using a process-based tree growth model*. Can. J. For. Res. 33 : 509-520.
- RIOPEL, M., 1999. *Potentiel de croissance de la haute régénération préétablie de sapin baumier : une analyse dendrométrique au niveau de la tige et du peuplement*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Faculté de foresterie et de géomatique, Sainte-Foy, 149 p. [<http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/ftp01/MQ44948.pdf>].
- RIOU-NIVERT, P., 1984. *Le facteur d'espacement : un guide pour les premières éclaircies dans les peuplements résineux*. Forêt-Entreprise 20 : 18-25.
- ROBERTS, S. et C. HARRINGTON, 2008. *Individual tree growth response to variable-density thinning in coastal Pacific Northwest forests*. For. Ecol. Manage. 255 : 2771-2781.
- ROBITAILLE, A. et J.-P. SAUCIER, 1998. *Paysages régionaux du Québec méridional*. Québec, Les publications du Québec. 213 p.
- RONDEUX, J., 1993. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques de Gembloux. 521 p.
- RUEL, J.-C., 1995. *Understanding windthrow : silvicultural implications*. For. Chron. 71 : 434-445.
- SAS INSTITUTE INC., 2004. *SAS/STAT® 9.1 User's Guide*. Cary, NC : SAS Institute Inc.
- SAUCIER, J.-P., J.-F. BERGERON, P. GRONDIN et A. ROBITAILLE, 2001. *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Carte couleur. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. [<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp>].
- SAVILL, P.S., 1983. *Silviculture in windy climate*. For. Abstracts, review article 44 : 473-488.
- SMITH, D.M., B.C. LARSON, M.J. KELTY et P.M.S. ASHTON, 1997. *The practice of Silviculture: Applied forest ecology, 9th edition*. John Wiley & Sons. New York. 537 p.
- SOUCY, M., J.-M. LUSSIER et L. LAVOIE, 2012. *Long-term effects of thinning on growth and yield of an upland black spruce stand*. Can. J. For. Res. 42 : 1669-1677.
- SPRINZ, P.T. et H.E. BURKHART, 1987. *Relationships between tree crown, stem, and stand characteristics in unthinned loblolly pine plantations*. Can. J. For. Res. 17 : 534-538.
- THORPE, H.C. et S.C. THOMAS, 2007. *Partial harvesting in the Canadian boreal : Success will depend on stand dynamic responses*. For. Chron. 83 : 319-325.
- THORPE, H.C., S.C. THOMAS et J.P. CASPERSEN, 2007. *Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (Picea mariana) boreal forest*. Can. J. For. Res. 37 : 1563-1571.
- THORPE, H.C., S.C. THOMAS et J.P. CASPERSEN, 2008. *Tree mortality following partial harvests is determined by skidding trails*. Ecol. Appl. 18 : 1652-1663.
- TREMBLAY, S., J. BÉGIN et L. BÉLANGER, 1997. *Productivité de sapinières boréales de seconde venue en relation avec les caractéristiques des stations*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 125. 72 p. [<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Tremblay-Stephane/Memoire125.pdf>].

- VIENS, M., 2001. *Effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la forme de la tige de pin gris (Pinus banksiana Lamb.) en Abitibi, Québec*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. 63 p. [<http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/ftp04/MQ57909.pdf>].
- VINCENT, M., C. KRAUSE et S.Y. ZHANG, 2009. *Radial growth response of black spruce roots and stems to commercial thinning in boreal forest*. *Forestry* 82 : 557-571.
- WEETMAN, G.F., M.R. ROBERGE et C.H. MENG, 1980. *Black spruce : 15-year growth and microbiological responses to thinning and fertilization*. *Can. J. For. Res.* 10 : 502-509.
- YOUNGBLOOD, A.P., 1991. *Radial growth after a shelterwood seed cut in a mature stand of white spruce in interior Alaska*. *Can. J. For. Res.* 21 : 410-413.
- ZARNOVICAN R., J.-M. LUSSIER et C. LABERGE, 2001. *Coupe préparatoire et croissance en surface terrière d'une sapinière de seconde venue à la forêt modèle du Bas-Saint-Laurent, Québec*. *For. Chron.* 77 : 685-695.
- ZEIDE, B, 2001. *Thinning and Growth: a full turn-around*. *J. For.* 99 : 20-25.
- ZEIDE, B, 2006. *Evolution of silvicultural thinning: from rejection to transcendence*. Dans : K.F. Connor, éditeur. *Proceeding of the 13th biennial southern silvicultural research conference*. USDA Forest Service, Southern Research Station. General Technical Report SRS-92. Asheville, NC. p. 322-327 [http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/gtr/gtr_srs092/gtr_srs092-075-zeide.pdf].



Le ministère des Ressources naturelles a la responsabilité d'assurer une gestion durable des forêts du domaine public. Pour ce faire, il doit disposer d'information sur les effets des traitements sylvicoles, notamment au chapitre du rendement. Depuis la hausse de popularité de l'éclaircie commerciale au cours de la seconde moitié des années 1990, le besoin d'acquisition de connaissances au sujet de ce traitement a été jugé prioritaire pour la production de sapin, d'épinette, de pin gris et de mélèze ou de thuya de l'est. La Direction de la recherche forestière, de concert avec les unités administratives du Ministère dans les diverses régions du Québec, a alors installé un réseau de placettes dans le cadre du programme de la mesure des effets réels. Ce mémoire dresse un portrait des peuplements échantillonnés et présente l'évolution de leurs principales caractéristiques dendrométriques au cours des 5 années suivant l'application opérationnelle du traitement.

**Ressources
naturelles**

Québec

