



**Réaction de la régénération préétablie de sapin baumier et  
d'épinette noire à différentes intensités de coupe dans des forêts  
boréales irrégulières**

**Mémoire**

**Jamer Millan Montaña**

**Maîtrise en sciences forestières**  
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

**© Jamer Millan Montaña, 2013**



## Résumé

Les interventions sylvicoles peuvent être un facteur déterminant dans le développement de la régénération des espèces forestières, telles le sapin baumier et l'épinette noire. Leur réaction dépendra toutefois des caractéristiques des semis et du type de coupe effectuée. Notre étude prend en compte quatre types de coupes et examine l'effet de la taille et de la vigueur des semis sur leur réaction de croissance en hauteur et en diamètre. Cinq ans après les interventions, les résultats montrent que le sapin baumier est une espèce qui réagit très bien à l'ouverture de la canopée, alors que l'épinette noire a un processus légèrement plus lent dans les premières années. Les réactions sont en lien direct avec les caractéristiques des semis et l'intensité de la coupe.



## **Abstract**

Silvicultural interventions can be a determining factor for the development of the regeneration of forest species, such as balsam fir and black spruce. Their reaction will depend however on seedlings characteristics and the type of cutting. Our study takes into account four types of cutting and examines the effect of seedling size and vigor on their growth response in height and diameter. Five years after the interventions, results show that balsam fir responds very well to the opening of the canopy, while black spruce has a slightly slower response in the first years. The responses are in direct link with seedlings characteristics and the intensity of cuttings.



# Table des matières

RÉSUMÉ .....	III
ABSTRACT .....	V
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES .....	XI
LISTE DES FIGURES .....	XI
LISTE DES ÉQUATIONS .....	XIII
AVANT-PROPOS .....	XV
REMERCIEMENTS .....	XVII
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
RÉSUMÉ .....	5
ABSTRACT .....	6
INTRODUCTION .....	7
OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE L'ÉTUDE .....	9
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	10
Secteurs d'étude. ....	10
Dispositif expérimental .....	12
Traitements appliqués.....	12

Mesures récoltées.....	13
Variables testées pour expliquer la réaction de croissance .....	15
Analyses statistiques.....	16
<b>RÉSULTATS .....</b>	<b>18</b>
Capacité des indices de vigueur à refléter le niveau d’oppression de la régénération. ....	18
Effets des traitements sur le développement des espèces .....	19
Mortalité après coupe des deux espèces.....	20
Réaction de croissance du sapin baumier.....	20
Réaction de croissance de l’épinette noire .....	22
Facteurs influençant la réaction à la coupe .....	25
<b>DISCUSSION.....</b>	<b>30</b>
Capacité des indices de vigueur à refléter le niveau d’oppression de la régénération. ....	30
Indice apical. ....	30
Cime vivante .....	30
Effet de la modification de l’environnement lumineux par la coupe .....	31
Effet des caractéristiques du semis sur sa réaction à la coupe.....	32
Hauteur .....	32
Indice apical .....	32
Cime vivante .....	33
Survie des semis.....	34
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>35</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>36</b>



# Liste des tableaux

<b>TABLEAU 1.</b> PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA FORÊT BORÉALE DANS LA CÔTE-NORD. ....	11
<b>TABLEAU 2.</b> CARACTÉRISTIQUES INITIALES DE CHAQUE ESSENCE FORESTIÈRE (SAPIN BAUMIER ET ÉPINETTE NOIRE) AU MOMENT DE LA COUPE. ....	14
<b>TABLEAU 3.</b> COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN ENTRE LES PARAMÈTRES DE CROISSANCE ET LES INDICES DE VIGUEUR POUR LE SAPIN BAUMIER. ....	18
<b>TABLEAU 4.</b> COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN ENTRE LES PARAMÈTRES DE CROISSANCE ET LES INDICES DE VIGUEUR POUR L'ÉPINETTE NOIRE. ....	18
<b>TABLEAU 5.</b> DESCRIPTION DE L'ANOVA DE TYPE 3. TEST DES EFFETS FIXES POUR LE SAPIN BAUMIER APRÈS LA COUPE. ....	20
<b>TABLEAU 6.</b> EFFET DU TEMPS AVEC LES TRAITEMENTS, ET L'EFFET DES TRAITEMENTS AVEC LE TEMPS SUR LA CROISSANCE EN DIAMÈTRE DU SAPIN BAUMIER. ....	21
<b>TABLEAU 7.</b> DESCRIPTION DE L'ANOVA DE TYPE 3. TEST DES EFFETS FIXES POUR L'ÉPINETTE NOIRE APRÈS LA COUPE. ....	23
<b>TABLEAU 8.</b> EFFET DU TEMPS PAR TRAITEMENT, ET L'EFFET DES TRAITEMENTS DANS LA DURÉE SUR LA CROISSANCE EN DIAMÈTRE DE L'ÉPINETTE NOIRE DURANT TOUTE L'ÉTUDE. ....	23
<b>TABLEAU 9.</b> COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN ENTRE LA HAUTEUR INITIALE (MM) ET LA CROISSANCE EN DIAMÈTRE CUMULÉE PAR TRAITEMENT. ....	25
<b>TABLEAU 10.</b> COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN ENTRE LA HAUTEUR INITIALE (MM) ET LA CROISSANCE EN HAUTEUR CUMULÉE PAR TRAITEMENT. ....	25
<b>TABLEAU 11.</b> COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN ENTRE LA CROISSANCE CUMULÉE EN DIAMÈTRE (MM) DEPUIS LA COUPE ET LA PROPORTION DE CIME VIVANTE, PAR TRAITEMENT. ....	25
<b>TABLEAU 12.</b> COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN ENTRE LA CROISSANCE CUMULÉE EN DIAMÈTRE (MM) DEPUIS LA COUPE ET L'INDICE APICAL, PAR TRAITEMENT. ....	26
<b>TABLEAU 13.</b> COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN ENTRE LA CROISSANCE CUMULÉE EN HAUTEUR (MM) DEPUIS DE LA COUPE ET L'INDICE APICAL, PAR TRAITEMENT. ....	26

**TABLEAU 14.** COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN ENTRE LA CROISSANCE EN HAUTEUR CUMULÉE EN (MM) DEPUIS LA COUPE ET LA CIME VIVANTE, PAR TRAITEMENT. .... 26

**TABLEAU 15.** RÉGRESSION DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR TOTAL EN FONCTION DE LA LUMIÈRE ET LA CIME VIVANTE. .... 29

# Liste des figures

<b>FIGURE 1.</b> REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE DES ZONES EXPÉRIMENTALES DANS LA RÉGION DE MANICOUAGAN, BAIE-COMEAU, AU QUÉBEC. (CIMON-MORIN 2009).....	11
<b>FIGURE 2.</b> POURCENTAGE DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE POUR CHAQUE TRAITEMENT : COUPE AVEC PROTECTION DE LA RÉGÉNÉRATION ET DE SOLS (CPRS), COUPE AVEC PROTECTION DES PETITES TIGES MARCHANDES (CPPTM), JARDINAGE À SENTIERS TEMPORAIRES (JST), JARDINAGE À SENTIERS PERMANENTS (JSP) ET TÉMOIN NON-TRAITÉ.....	19
<b>FIGURE 3.</b> CROISSANCE EN DIAMÈTRE (MM) DU SAPIN BAUMIER PAR TRAITEMENT ET PAR ANNÉE .....	22
<b>FIGURE 4.</b> CROISSANCE EN DIAMÈTRE (MM) D'ÉPINETTE NOIRE PAR TRAITEMENT ET PAR ANNÉE .....	24
<b>FIGURE 5.</b> RELATION DU SAPIN BAUMIER, ENTRE LA CROISSANCE EN HAUTEUR ET LE POURCENTAGE DE LUMIÈRE .....	28
<b>FIGURE 6.</b> RELATION ENTRE LA LUMIÈRE, LA CIME VIVANTE ET LA CROISSANCE EN HAUTEUR POUR L'ÉPINETTE NOIRE.....	29



# LISTE DES ÉQUATIONS

**ÉQUATION 1.** RELATION ENTRE LA CROISSANCE EN HAUTEUR TOTALE DANS LA CPRS EN FONCTION DE LA CIME VIVANTE..... 27

**ÉQUATION 2.** RELATION ENTRE LA CROISSANCE EN HAUTEUR TOTALE DANS L'ÉPINETTE NOIRE EN FONCTION DE LA LUMIÈRE ET LA CIME VIVANTE..... 29



# **Avant-propos**

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à un financement de la Chaire de recherche industrielle CRSNG - Université Laval en sylviculture et faune.

Ce mémoire de maîtrise comporte un chapitre principal qui analyse la réaction de la régénération préétablie du sapin baumier et de l'épinette noire à différentes intensités de coupes. Les résultats de ce projet nous apportent des connaissances sur le comportement de ces deux espèces forestières après des interventions forestières couvrant une large gamme d'intensités.

Ce projet n'aurait pu être possible sans la participation de mon directeur, Dr. Jean-Claude Ruel.





# Remerciements

D'abord, j'aimerais remercier sincèrement mon directeur de recherche, Dr. Jean-Claude Ruel, de m'avoir permis de faire partie de son groupe de recherche. Je tiens également à le remercier pour son importante collaboration autour de ce projet et son implication. Il s'est révélé un indispensable guide qui a permis l'aboutissement de ces recherches

Je tiens aussi à remercier Mme. Hélène Crépeau, pour son aide dans l'analyse statistique du projet.

Je tiens à remercier mes parents, ma sœur et mon frère, qui ont toujours été un pilier dans chaque moment de ma vie. Vous êtes mon plus grand trésor et mon plus grand bonheur.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé à ce projet parce que sans eux je ne serais pas arrivé à terminer cette étude : mon assistant de terrain Philippe Goulet, ainsi que le laboratoire de dendrométrie.

Un merci tout particulier à Alejandro et Claudia, parce que sans leur aide, je n'aurais pas pu vivre ce grand défi de ma vie. Merci pour votre aide.



# Introduction générale

La régénération préétablie se définit comme l'ensemble de tiges qui s'établissent en sous-étage, en attendant le moment de la récolte de la population principale ou d'une perturbation naturelle. Ce type de régénération a souvent une bonne réaction à la libération de la compétition de la couverture (Paquin et Doucet 1992). Elle s'est généralement développée sous ombrage modéré à fort. Les arbres acclimatés à l'ombre ont souvent une cime courte en forme de parapluie qui maximise l'absorption de lumière, des feuilles minces et étalées, et une croissance racinaire relativement faible (Tucker et al. 1987; Waring 1987; Ruel et al. 2000). Après l'enlèvement du couvert, les semis doivent s'adapter à un nouvel environnement. Bien que la réaction de croissance des racines et de la tige puisse être quasi immédiate, de nombreuses études ont montré que la croissance en hauteur ne réagit pas immédiatement ou peut même être réduite à des niveaux inférieurs à ceux observés avant la libération (Gordon 1973; Johnstone 1978; Seidel 1980; McCaughey et Schmidt 1982; Nikinmaa 1993; Williams 1996; Ruel et al. 2000). Les conifères ayant la capacité de modifier leur patron de croissance en fonction, entre autres, de la lumière reçue ont une plus grande probabilité de survie dans des milieux ombragés tel un sous-bois et, par conséquent, plus de chances de devenir des arbres dominants à la suite de la formation de trouées (O'Connell et Kelty 1994; Lesage 1997). La survie et la réaction de croissance après perturbation seront fonction du niveau d'oppression subie par les semis avant la perturbation et de l'intensité de la perturbation (Ruel et al. 2000). La morphologie des semis sous couvert reflétant ce niveau d'oppression, elle pourrait servir d'indicateur du potentiel de réaction pour un niveau de perturbation donné (Ruel et al. 2000).

Dans le contexte de la forêt boréale, il apparaît essentiel de voir en quoi les pratiques sylvicoles ont des effets similaires à ceux qu'entraînent des perturbations naturelles, à l'échelle du peuplement (Bergeron et al. 1999). Actuellement, les traitements sylvicoles les plus utilisés en forêt boréale sont la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) (Groot et al. 2005). Largement utilisée au Québec et en Ontario, cette approche est bien adaptée aux peuplements purs de sapins contrôlés naturellement par des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) (Baskemille 1975; MacLean 1984; Bélanger 1993; Bergeron et al. 1999). Dans une moindre mesure, la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) serait aussi adaptée à ce genre de perturbation (Groot et al. 2005). Cette coupe permet une préservation d'une partie de la structure du peuplement (Groot 2002), et ainsi même, une atténuation des impacts sur les petits mammifères et la végétation de sous-bois (Fenton et al. 2008; Riopel et al. 2010). Plus récemment, des coupes partielles, comme le jardinage, ont démontré un certain potentiel à maintenir les attributs des vieilles forêts (Bergeron et al. 1999). Aussi, les coupes de jardinage par tige individuelle ou par groupe d'arbres sont maintenant des pratiques courantes dans la majorité des forêts de feuillus tolérants

(Majcen 1994) et leurs effets s'approchent passablement de ceux découlant des trouées ayant cours naturellement dans ce type de couvert forestier (Bergeron et al. 1999). Leur utilisation en forêt boréale demeure toutefois très limitée. Il devient donc important de comprendre la réaction de la régénération préétablie à ces nouveaux types de coupes.

## Chapitre principal

# Réaction de la régénération préétablie de sapin baumier et d'épinette noire à différentes intensités de coupe dans des forêts boréales irrégulières

Jamer Millan Montaña<sup>1</sup>, Jean-Claude Ruel<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Département des sciences du bois et de la forêt, Pavillon Abitibi-Price, 2405 rue de la Terrasse, Université Laval, Québec, Québec, G1V 0A6, Canada



## Résumé

Le sapin baumier et l'épinette noire sont les deux principales espèces commerciales de la forêt boréale du Québec. La stratégie de régénération présentement retenue pour ces deux espèces repose largement sur la régénération préétablie. La réaction de cette régénération à la coupe va dépendre du type de coupe et de son niveau d'oppression initial. Afin de déterminer les facteurs influençant leur réaction à divers types de coupe, une étude a été mise en place dans la pessière à mousses de l'Est du Québec. Différents traitements ont été étudiés, soit : la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM), le jardinage à sentiers temporaires (JST), le jardinage à sentiers permanents (JSP) et un témoin. Un total de 759 semis de sapin baumier et d'épinette noire a été identifié de façon permanente immédiatement après la coupe. On a alors mesuré les caractéristiques des semis de chaque espèce et des indices de vigueur reflétant le niveau d'oppression initial ont été calculés à partir de ces mesures. La croissance en hauteur et en diamètre a été suivie annuellement durant les cinq années suivant la coupe. À la fin de l'étude, des mesures ont été prises concernant la disponibilité de lumière et des rondelles ont été prélevées à la base des semis pour une étude détaillée de leur croissance en diamètre. Nos résultats démontrent que des réactions significatives de croissance ont été observées pour les deux espèces après chaque type de coupe. Le sapin baumier est l'espèce qui a obtenu les meilleurs résultats pour chaque coupe et la réaction est à mettre en lien direct avec l'intensité de coupe. Cela se trouve reflété dans les indices de vigueur qui ont été testés.

## Abstract

Balsam fir and black spruce are two main commercial species of the boreal forest of Quebec. The regeneration strategy currently used for these two species in Quebec is based widely on preestablished regeneration. The response of this regeneration to cutting depends on the type of cutting and seedling characteristics. To understand this response, a study was installed in the eastern black spruce feathermoss subdomain. Five treatments were compared: cutting with protection of regeneration and soils (CPRS), cutting with protection of small merchantable stems (CPMS), selection cutting with temporary trails (JST), selection cutting with permanent trails (JSP) and a control area. A total of 759 seedlings of balsam fir and black spruce were identified in a permanent way immediately after the cuttings. We measured seedling characteristics of every seedling at time of cutting and indications of vigor were calculated based on these measures. The growth in height and diameter was monitored annually during the five years following cutting. At the end of the study, measures were taken on light availability and discs were taken at the seedling base for a detailed study of their growth in diameter. Our results demonstrate that significant responses of growth occurred for both species after every type of cutting. Balsam fir obtained better results for each of the cuttings and seedling response is in direct link with the intensity of cutting. This is reflected in the indices of vigor that have been tested.



# Introduction

L'établissement d'une régénération en quantité suffisante constitue une condition essentielle au renouvellement des peuplements. Au Québec, les peuplements récoltés disposent habituellement d'une abondante régénération préétablie (Ruel 1989). Ceci est particulièrement vrai pour l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) et le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) qui sont parmi les essences les plus récoltées au Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune Québec 2009). Le sapin peut survivre à un très faible niveau de lumière et le développement rapide de son système racinaire lui permet de s'installer en grand nombre sous couvert, même lorsque l'humus est relativement épais (Frank 1990; Doucet et Boily 1995). En ce qui concerne l'épinette, elle s'établit en abondance, au moyen de semences, lorsque le feu brûle un peuplement mûr et une bonne partie de l'humus (Viereck et Johnson 1990; Doucet et Boily 1995) mais autrement, la reproduction se fait principalement par marcottage (Doucet et Boily 1987).

Dans ce contexte d'abondance de régénération préétablie, la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) a été identifiée comme une option à faible coût pour garantir une régénération adéquate bien adaptée à la station (Ministère des Ressources Naturelles Québec 1994). En coupant en même temps tous les arbres matures, la CPRS assure une reconstruction rapide du couvert forestier (Ministère des Ressources Naturelles Québec 2002). Cette coupe peut être assimilée à la dernière intervention d'un système de coupe progressive (Smith 1986; Ruel et al. 1995). Au début des années 1990, un virage a été amorcé vers un aménagement soucieux d'imiter les processus naturels de régénération (Leblanc et Bélanger 2000; Larouche 2005), ce qui s'est traduit par un intérêt accru pour une diversification des pratiques sylvicoles. C'est ainsi que l'on a vu apparaître la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) et que des essais de jardinage ont été réalisés (Groot et al. 2005). Ces essais ont démontré un potentiel pour concilier la récolte de bois et le maintien de la biodiversité (Bergeron et al. 1999; Cimon-Morin 2009). Les effets du jardinage pourraient se comparer aux effets des perturbations secondaires en créant des trouées dans la canopée (Bergeron et al. 1999) et minimiseraient ainsi les impacts sur la biodiversité. Ensuite, à l'échelle du peuplement, le jardinage devrait permettre de conserver intacts les principaux attributs de structure propres aux perturbations naturelles dominantes (Ruel et al. 2007; Cimon-Morin 2009).

Chez beaucoup d'espèces de conifères, la disponibilité en lumière influence la croissance en hauteur et le développement morphologique de la cime des semis croissant en sous-étage (Logan 1969; Ford 1992; O'connell et Kelty 1994; Parent et Messier 1995). Sous de faibles intensités lumineuses, la croissance des branches latérales est favorisée au détriment de la croissance en hauteur de la flèche terminale (Logan 1969; Kohyama 1980; Carter et Klinka 1992; Parent et Messier 1995). Les arbres acclimatés à l'ombre développent ainsi souvent une cime courte en forme de parapluie qui maximise l'absorption de lumière, des feuilles minces et étalées, et une croissance racinaire relativement faible (Tucker et al. 1987; Waring 1987; Ruel et al. 2000). En sous-bois, la croissance en hauteur des conifères est souvent très faible (Kohyama 1980; Carter et Klinka 1992; Klinka et al. 1992). On observe plutôt une allocation préférentielle pour la croissance des branches latérales au détriment de l'accroissement en hauteur (Ghent 1958; Kohyama 1980; Oliver et Larson 1990 ; Parent 1995).

La réaction des semis à une réduction du couvert dominant peut varier selon de nombreux facteurs. Un premier facteur concerne la plasticité de l'espèce en présence. Dans le cas du sapin baumier, les modifications adaptatives (morphologiques et physiologiques) développées en sous-bois qui lui permettent de maximiser la capture de la lumière et de faciliter l'assimilation du CO<sub>2</sub> (Aussenac 1973; Messier et al. 1999; Parent et Ruel 2002) prédisposent le semis de sapin à une transpiration excessive après la coupe. Le stress hydrique peut entraîner des retards de croissance ou la mort du semis (Kramer et Boyer 1995; Parent et Ruel 2002). Dans les peuplements d'épinette noire, la régénération préétablie laissée sur le parterre de coupe présente une grande variabilité de tailles des tiges et la hauteur de la régénération a été identifiée comme influençant fortement la réaction à la coupe (Boily et Doucet 1993; Paquin et Doucet 1992). La réaction à la réduction du couvert variera aussi en fonction de la vigueur des tiges. Cette vigueur est en lien avec le niveau d'oppression subie avant la coupe et ce niveau d'oppression peut être estimé à partir des caractéristiques morphologiques des semis. Le rapport entre la longueur de la cime vivante et la hauteur totale a souvent été identifié comme l'un des meilleurs indicateurs de la vigueur pour des essences de conifères tolérantes à l'ombre (Seidel 1980; Helms et Standiford 1985; Tesch et Korpela. 1993; Ruel et al. 1995). Dans la famille des Pinacées, une corrélation positive entre la disponibilité de la lumière et le rapport de la longueur de la pousse terminale sur la longueur des branches latérales au dernier verticille a été fréquemment observée in situ et pourrait servir à évaluer le niveau d'oppression des tiges (Kohyama 1980; Klinka et al. 1992; O'Connell et Kelty 1994; Parent et Messier 1995). Parent et Messier (1995) suggèrent que la croissance en hauteur avant la coupe pourrait aussi constituer un bon indicateur de la vigueur pour les espèces tolérantes à l'ombre comme le sapin baumier.

Les études précédentes se sont surtout attardées à la réaction de la régénération préétablie de sapin et d'épinette noire à la coupe totale, mais peu d'études ont examiné leur réaction à des coupes partielles qui impliquent des modifications beaucoup plus légères des conditions de croissance. Dans ce contexte, il importe de préciser la réaction des deux essences pour vérifier dans quelle mesure les stratégies de coupe partielle seraient susceptibles de contribuer à un bon développement de la régénération et d'expliquer les réactions de croissance pour les deux espèces étudiées. De plus, les indices de vigueur proposés dans la littérature n'ont pas été testés pour le sapin baumier et l'épinette noire dans un contexte de coupes partielles.

## **Objectifs et hypothèses de l'étude**

La présente étude vise à quantifier la réaction de la régénération préétablie de sapin baumier et d'épinette noire à différentes intensités de coupe en forêt boréale irrégulière, en intégrant la notion de vigueur de la régénération. Les traitements étudiés sont: la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) et deux traitements de jardinage, la coupe de jardinage avec sentiers temporaires (JST) et la coupe de jardinage avec sentiers permanents (JSP). Nous posons les hypothèses suivantes :

1. Les indices de vigueur présentés dans la littérature (la cime vivante et l'indice apical) traduisent le niveau d'oppression avant la coupe. Ils tendront à augmenter en fonction du pourcentage de luminosité disponible dans les peuplements non coupés;
2. La réaction de la régénération préétablie dépendra du niveau d'oppression avant la coupe. Elle sera ainsi reliée aux indices de vigueur, peu importe le type de coupe;
3. La réaction de la régénération dépendra de sa taille initiale. Les tiges les plus hautes auront une réaction moins marquée puisqu'elles nécessiteront un ajustement plus important aux nouvelles conditions créées par la coupe;
4. La réaction à la coupe dépendra de l'importance de la modification apportée aux conditions de croissance. Elle sera ainsi plus forte dans les coupes les plus sévères. La croissance après coupe augmentera aussi en fonction de la lumière disponible;

5. La réaction de la régénération variera aussi selon l'espèce. Le sapin étant une espèce très plastique, sa réaction sera plus marquée.

## Matériel et méthodes

### Secteurs d'étude.

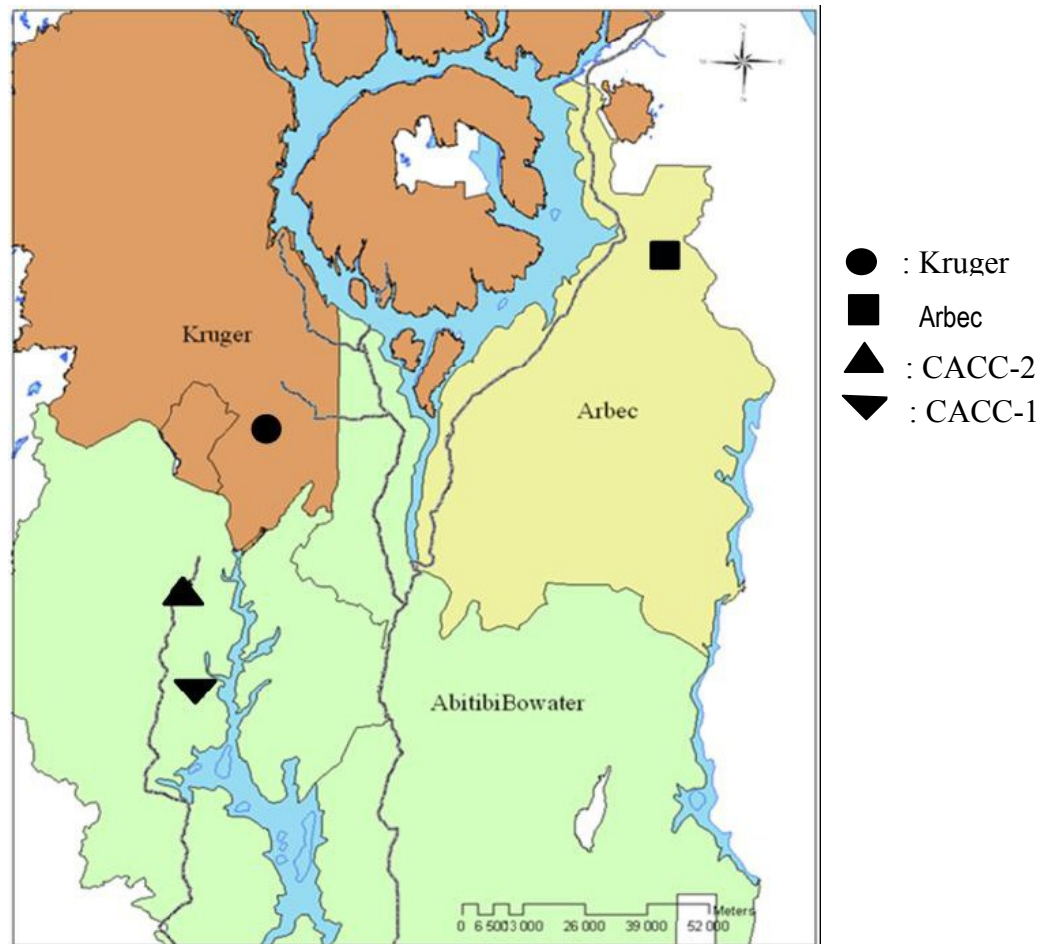
L'étude s'est déroulée sur la Côte-Nord, au nord de Baie-Comeau au Québec, (entre 68°00' et 69°30'W et entre 50°15' et 51°15'N) (Figure 1), dans le sous-domaine de la pessière noire à mousses de l'Est. Sur ce territoire, la température annuelle moyenne varie de -2,5 à 0,0 °C et la saison de croissance est approximativement de 140 jours. Il tombe annuellement de 1000 à 1300 mm de précipitations dans cette région. L'altitude moyenne se situe entre 442 et 550 mètres (Robitaille et Saucier 1998; Cimon-Morin 2009). On y retrouve un relief composé de hautes collines, de collines et de monts. Les dépôts de surface dominants sont de type glaciaire avec till indifférencié épais. Les dépôts codominants varient du till indifférencié mince aux dépôts fluvioglaciaires. Le substrat présente une forte proportion de roches. On retrouve un humus de type mor et, dans la plupart des cas, un sol à texture sableuse. Le drainage est habituellement modéré à très mauvais (Cimon-Morin et al. 2010).

L'étude porte sur les mêmes territoires où Cimon-Morin et al. (2010) ont travaillé (Figure 1). Dans les quatre secteurs sélectionnés, on retrouvait de vieux peuplements, en général âgés de plus de 100 ans, avec une structure irrégulière/inéquienne qui justifie l'utilisation de pratiques sylvicoles alternatives. Pour valider la structure du peuplement on a fait une reconnaissance du terrain. Dans le tableau 1, on peut retrouver les caractéristiques principales de des peuplements étudiés. Les peuplements sélectionnés étaient constitués de sapin baumier et d'épinette noire, ce qui est typique des vieilles forêts de la région. Leur densité était variable et leur structure, irrégulière ou inéquienne, en se basant sur les valeurs d'indices de Shannon proposées par Boucher et al. (2003). Les traitements sylvicoles étudiés sont : la coupe avec protection de la régénération et de sols, la coupe avec protection des petites tiges marchandes, le jardinage à sentiers temporaires, le jardinage à sentiers permanents, et un témoin (non-traité).

**Tableau 1. Principales caractéristiques de la forêt boréale dans la Côte-Nord.**

	N	Moyenne	Écart-type	Médiane	Minimum	Maximum
Structure (indice de Shannon)	124	2,06	0,16	2,07	1,66	2,53
Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	124	24,8	5,8	24,5	13,7	38,5
Diamètre moyen quadratique (cm)	124	17,5	1,70	17,4	14,0	22,7
Densité (ti/ha)	124	1043	238	1025	550	1650
Proportion de sapin dans la couverture (%)	124	55,0	23,6	55,2	2,8	100

(Cimon-Morin 2009).



**Figure 1. Représentation cartographique des zones expérimentales dans la région de Manicouagan, Baie-Comeau, au Québec. (Cimon-Morin 2009).**

## Dispositif expérimental

Les traitements ont été appliqués sur une échelle expérimentale sur des unités de 2500 m<sup>2</sup> (0,25 ha) à raison de 5 répétitions en blocs complets par secteur. Les parcelles permanentes de 400 m<sup>2</sup>, ont été établies au centre de chacune des unités de 0,25 ha. La distribution des cinq traitements sylvicoles à l'intérieur d'un bloc a été faite d'une manière aléatoire. Un martelage et une délimitation des sentiers de débardage ont été faits avant la coupe et les coupes ont été réalisées à l'aide d'abatteuses-façonneuses et de débardeurs. Les dimensions des parcelles varient selon le traitement afin de s'adapter à l'espacement des sentiers : CPRS : 20m x 20m; jardinage à sentiers temporaires : 30m x 13,33m; jardinage à sentiers permanents : 35m x 11,43m; CPPTM : 20m x 20m; et témoin : 20m x 20m.

La coupe a été réalisée à l'été 2004 pour le secteur chez Kruger et le secteur sud d'Abitibi-Bowater (CACC-1). Par la suite, en 2005, la mise en place des deux derniers secteurs, celui chez Arbec et celui au nord d'Abitibi-Bowater (CACC-2) a été effectuée. Cependant, le dispositif du secteur CACC-2 est incomplet et ne comporte qu'une seule répétition. De plus, suite à des difficultés logistiques, l'application d'un des traitements a été imparfaite.

## Traitements appliqués

Le premier traitement étudié, la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), est le plus utilisé en forêt boréale québécoise et consiste en une récolte totale des tiges marchandes (dhp > 9cm) en s'assurant de protéger la régénération préétablie. Il reproduit certains éléments associés au passage de feux de forêt, en particulier ceux associés à l'élimination du couvert forestier, mais diverge pour certains autres comme le maintien de l'humus et de la strate arbustive, et la plus faible abondance de chicots (Bergeron et al. 1999; Ruel et al. 2007). Dans notre cas, le pourcentage de récolte a porté sur 93 % de la surface terrière.

Le second traitement, la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM), est un traitement conçu pour les peuplements de structure inéquienne ou irrégulière où l'on trouve un sous-étage de gaules et petites tiges marchandes (dhp 10-14 cm) de sapin baumier ou d'épinette noire ayant la capacité de profiter de l'apport de lumière consécutif à l'élimination de l'étage dominant. La récolte porte ainsi sur une partie importante du volume marchand (70-90%), en laissant sur pied un nombre suffisant de gaules et de petites tiges marchandes dotées d'une cime verte bien développée (Groot et al. 2005). Dans notre cas, la récolte a

porté sur 85 % de la surface terrière, ce qui est typique de cette prescription sylvicole (Groot 2002; Groot et al. 2005; Cimon-Morin 2009).

Le troisième traitement est le jardinage à sentiers temporaires. Ce traitement de jardinage est constitué d'un cycle de quatre rotations. Une intervention de coupes partielles totalisant environ 50 % de la surface terrière a été effectuée dans les 5 m en bordure des sentiers d'abattage, en adaptant les modalités de sélection des tiges à abattre à la structure locale du peuplement. À la première intervention, une bande de 15 m n'est pas traitée entre les sentiers, de sorte que le prélèvement ne se fait que dans une moitié du peuplement, pour une intensité totale visée de 35 % de la surface terrière (Ruel et al. 2007). Le pourcentage de récolte dans notre cas a toutefois été de 44 % (Cimon-Morin 2009), soit légèrement au-dessus de l'objectif. Ces résultats obtenus pour le jardinage s'accordent avec Groot (2002).

Le quatrième traitement est le jardinage à sentiers permanents. Ce traitement, permet de traiter le peuplement de façon plus homogène que le précédent (Ruel et al. 2007). L'abattage sélectif entre les sentiers permanents peut être réalisé à n'importe quel endroit grâce aux sentiers secondaires. Un prélèvement d'environ 25 % de la surface terrière est effectué sur l'ensemble de la zone comprise entre deux sentiers primaires adjacents pour un prélèvement total visé de 35 % de la surface terrière (Roy et al. 2006). Le pourcentage de récolte dans notre cas a toutefois été de 43 % (Cimon-Morin 2009). Ces résultats obtenus pour le jardinage s'accordent avec Groot (2002).

Le cinquième traitement est le témoin. Dans ce traitement, il y avait des vieux peuplements, en général âgés de plus de 100 ans.

## **Mesures récoltées**

Dans chacune des parcelles permanentes mentionnées de chaque bloc, quatre semis de chaque espèce ont été sélectionnés aléatoirement après la coupe et identifiés pour le suivi. La distribution s'est effectuée ainsi: 380 pour le sapin baumier et 379 semis pour l'épinette noire. Les paramètres et leurs mesures initiales apparaissent au tableau 2. On a ainsi tenu en compte de :

- La hauteur totale;

- Le diamètre à la base du semis;
- La hauteur de la cime verte;
- La longueur de la pousse terminale avant la coupe;
- La longueur de la branche la plus longue du dernier verticille avant la coupe.

Chacun de ces paramètres représente l'état des semis au moment des coupes. Cet état nous indique le développement qu'ont les deux essences dans un milieu de compétition maximale.

**Tableau 2. Caractéristiques initiales de chaque essence forestière (sapin baumier et épinette noire) au moment de la coupe.**

Essence Forestière	n	Hauteur totale (mm)			Diamètre à la base (mm)			Hauteur de la cime verte (mm)			Longueur de la pousse terminale (mm)			La longueur de la branche du dernier verticille (mm)		
		Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.
Sapin baumier	380	214	614	1223	0,014	0,017	0,021	36	313	780	1	16	85	1	34	84
Épinette noire	379	40	666	1506	0,015	0,019	0,022	40	244	715	4	20	58	5	17	42

Un suivi annuel a été fait durant les cinq années suivant les coupes au cours desquelles on a mesuré les caractéristiques suivantes :

- La hauteur totale;
- La longueur de la pousse;
- La longueur de la branche la plus longue du dernier verticille;
- La hauteur de la cime;



- Le diamètre à la base du semis.

La cinquième année après les coupes, le pourcentage de lumière disponible a été évalué pour chaque semis. Pour cela, on a utilisé deux types de radiomètres. Le premier a servi à mesurer en continu l'intensité de la luminosité à découvert (Accupar linear PAR/Lai Ceptometer, model PAR 80), tandis qu'avec le second radiomètre (Sunfleck. PAR Ceptometer), on a pris l'intensité de la luminosité au-dessus de chaque arbre. Les mesures ont été prises durant des journées complètement nuageuses. La faible variabilité spatio-temporelle de la lumière dans ces conditions permet d'obtenir un indice de pénétration de lumière spécifique en chaque point sous le couvert végétal (Tang et Waki. 1992; Messier et Puttonen 1995). Cette mesure serait représentative de la disponibilité générale de la lumière (Messier et Puttonen 1995).

Après avoir mesuré la lumière, des rondelles ont été prélevées à la base de chaque semis. Les rondelles ont été identifiées, puis séchées et sablées. La mesure des cernes de croissance s'est effectuée sur quatre rayons espacés de 90°. La mesure de la croissance a été effectuée avec un appareil à détection semi-automatique des cernes de croissance, le WinDENDRO™ (version, 2003a).

## **Variables testées pour expliquer la réaction de croissance**

La première variable testée pour expliquer la réaction de croissance est la hauteur au moment de la coupe. L'étude de plusieurs populations de sapin baumier et d'épinette noire au Québec a montré que la survie au cours des trois premières années après la coupe était positivement corrélée à la hauteur dans le sous-étage pour chacune des deux espèces pour des hauteurs entre 0 et 300 cm (Ruel et al. 1995; Ruel et al. 2000). Si l'on part du postulat que les espèces tolérantes à l'ombre sont plus susceptibles d'être régénérées en préservant la régénération préétablie, cette variable pourrait nous être utile comme indicateur de réaction potentielle à la coupe.

La deuxième variable testée pour expliquer la relation de croissance est la cime vivante. La proportion de la cime vivante est définie comme la longueur de la cime vivante sur la hauteur totale. Cette mesure est souvent considérée comme l'un des meilleurs indicateurs de vigueur pour les conifères tolérants à l'ombre (Seidel 1980; Helms et Standiford 1985; Tesch et al. 1993; Ruel et al. 1995). Ainsi, le rapport de la cime vivante a été positivement lié avec la survie et la croissance de semis à la suite d'une coupe pour l'épinette noire, le sapin baumier, le Douglas taxifolié (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco), le sapin argenté (*Abies concolor* Gord. Et Glend.) et le sapin rouge de Californie (*Abies magnifica* A. Murr.) (Helms et Standiford 1985; Tesch et

Korpela 1993; Ruel et Doucet 1998; Ruel et al. 2000). Il reflète l'importance des tissus actifs pour la photosynthèse par rapport à l'ensemble des tissus.

La dominance apicale est la croissance préférentielle d'une tige de la plante et la réduction correspondante de la croissance des branches latérales (Aarssen 1994; Ruel 2000). À de fortes intensités lumineuses, la croissance en hauteur est favorisée, ce qui produit des cimes plus élancées vers le haut (Kohyama 1980; O'Connell et Kelty 1994; Parent et Messier 1995). Selon O'Connell et Kelty (1994), les espèces tolérantes à l'ombre posséderaient une forte plasticité morphologique en relation avec un gradient de lumière. Aussi, dans la famille des Pinacées, une corrélation positive entre la disponibilité de la lumière et le rapport de la longueur de la pousse terminale sur la longueur des branches latérales moyenne du dernier verticille (indice apical), a été fréquemment observée in situ (Kohyama 1980; Klinka et al 1992; O'Connell et Kelty 1994; Parent et Messier 1995). Ce rapport a ainsi été proposé comme indice de vigueur permettant de prédire la réaction à la coupe (Ruel et al. 2000).

## **Analyses statistiques**

Les analyses statistiques ont été réalisées avec l'aide du logiciel SAS (SAS Institute Inc. 2009), avec un seuil de signification  $\alpha$  de 0,05. Notre étude se divise en trois temps.

Dans un premier temps, nous avons voulu déterminer dans quelle mesure les indices de vigueur pouvaient refléter le niveau d'oppression de la régénération. Puisque la régénération des parcelles traitées était possiblement encore en phase d'acclimatation aux nouvelles conditions créées par la coupe, cette analyse a porté sur les parcelles témoins. Les indices de vigueur dans les parcelles traitées auraient ainsi pu refléter partiellement les conditions avant la coupe, venant brouiller les relations avec la lumière mesurée 5 ans après la coupe.

Le niveau d'oppression des semis peut être établi de deux façons, soit à partir de la lumière disponible pour le semis, soit par l'effet mesuré sur sa croissance ou sa morphologie. Ainsi, nous avons analysé les corrélations entre la dernière mesure de croissance dans les parcelles témoin, le pourcentage de lumière et les indices de vigueur. Étant donné que l'hypothèse de normalité des données n'était pas respectée, la corrélation sur les rangs i.e. la corrélation de Spearman a été utilisée. (Legendre et Legendre 1984).

Dans un deuxième temps, la modélisation de la croissance en diamètre a été faite en utilisant les données 5 ans avant et 5 ans après la coupe de l'ensemble des semis pour chaque espèce et période de temps séparément. Un modèle d'analyse de variance à mesures répétées et avec effet aléatoire du secteur a été utilisé pour étudier l'effet du traitement et du temps sur la croissance après la coupe. La procédure MIXED<sup>[1]</sup> de SAS a été utilisée avec la matrice de variance-covariance qui minimise le critère d'Akaike. La méthode de Kenward-Roger a été utilisée pour calculer les degrés de liberté. La transformation logarithmique de la croissance en diamètre a été utilisée afin de respecter l'hypothèse de normalité. Des comparaisons entre les traitements pour une même période et entre les périodes pour un même traitement ont été effectuées avec la méthode « Protected Fisher LSD ». Les analyses ont été faites séparément, par espèce, car les modèles étaient très complexes (anova mixte et à mesures répétées) et il y avait beaucoup d'hétérogénéité dans les données. On n'arrivait donc pas à faire converger les modèles et à valider les hypothèses de normalité et d'homogénéité des résidus. La croissance en hauteur n'a pu être analysée sur une base annuelle car les erreurs de mesure étaient souvent supérieures à la croissance mesurée. Ceci était dû à faiblesse de la croissance, à l'absence de flèche terminale clairement identifiable, à la mort de la flèche terminale ou son remplacement par une branche latérale de croissance presque identique.

Par la suite, pour mieux comprendre les facteurs influençant la réaction à chaque type de coupe, nous avons fait des analyses de corrélation entre les paramètres de croissance cumulée (hauteur et diamètre) et les indices de vigueur (proportion de cime vivante et indice apical) ainsi que la hauteur initiale de la régénération. Ces analyses de corrélation ont été effectuées avec la corrélation de Spearman. Les calculs ont été faits séparément pour chaque espèce et chaque type de coupe. Enfin, des régressions simples et multiples pour modéliser la croissance en hauteur des deux espèces ont été faites. Pour les deux espèces, on a initialement inclus le pourcentage de lumière et la cime vivante mais, dans le cas du sapin baumier, l'effet de la cime verte n'était pas significatif et a été retiré. De même, les variables aléatoires qui ont été tenues en compte pour le modèle mixte sont : les sites, les blocs et les parcelles.

---

<sup>[1]</sup> SAS Institute Inc. 2011. **SAS OnlineDoc® 9.3**. Cary, NC: SAS Institute Inc.

# Résultats

## Capacité des indices de vigueur à refléter le niveau d'oppression de la régénération.

Les deux indices de vigueur testés sont corrélés à la croissance en diamètre et en hauteur du sapin (Tableau 3). Ils sont aussi corrélés à la disponibilité de la lumière. On peut remarquer que l'indice apical présente de meilleures corrélations que le rapport de cime vivante.

**Tableau 3. Coefficients de corrélation de Spearman entre les paramètres de croissance et les indices de vigueur pour le sapin baumier.**

	Cime vivante		Indice apical	
	$r_s$	P	$r_s$	P
% Lumière	0,24	0,03*	0,48	<,0001*
Croissance diamètre	0,21	0,007*	0,43	0,0001*
Croissance hauteur	0,34	0,005*	0,53	<,0001*

\* Relation statistiquement significative.

Dans le cas de l'épinette noire, seul l'indice apical était corrélé au pourcentage de lumière. Pour cette espèce, la cime vivante et les indices de vigueur n'ont pas présenté de relation significative avec la croissance (Tableau 4).

**Tableau 4. Coefficients de corrélation de Spearman entre les paramètres de croissance et les indices de vigueur pour l'épinette noire.**

	Cime vivante		Indice apical	
	$r_s$	P	$r_s$	P
% Lumière	0,11	0,32	0,30	0,0008*
Croissance diamètre	0,15	0,18	0,18	0,12
Croissance hauteur	0,14	0,21	0,21	0,07

\* Relation statistiquement significative.

## Effets des traitements sur le développement des espèces

La quantité de luminosité disponible cinq ans après la coupe était en lien étroit avec l'intensité du prélèvement (Figure 2). Pour le cas de la CPRS, on obtient une intensité lumineuse moyenne de  $63,7\% \pm 5,04$ , pour une intensité de coupe de 93 %. Pour la CPPTM, on obtient une moyenne de  $54,3\% \pm 4,74$  d'intensité lumineuse, pour une coupe de 85% de la surface terrière. Dans le cas du jardinage à sentiers temporaires, la lumière disponible est en moyenne  $34,2\% \pm 4,05$ , pour une coupe de 44%. La coupe de jardinage à sentiers permanents présente des résultats assez semblables, soit une moyenne de  $31\% \pm 3,12$  de la pleine lumière, pour une coupe de 43%. Finalement, le traitement témoin a obtenu une moyenne de  $18,2\% \pm 1,94$  de pourcentage de lumière.

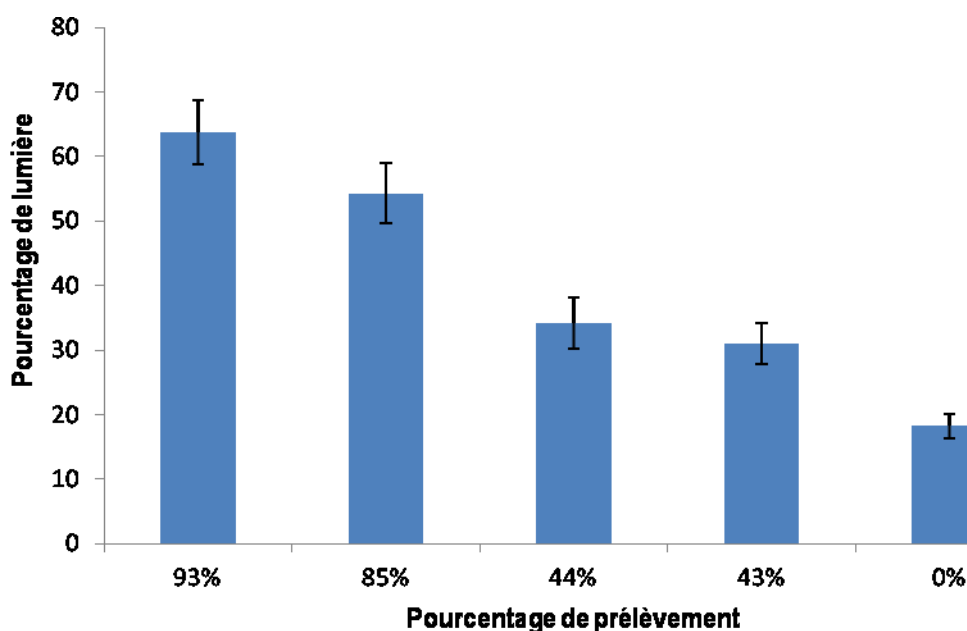


Figure 2. Pourcentage de l'intensité lumineuse pour chaque traitement : coupe avec protection de la régénération et de sols (CPRS), coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM), jardinage à sentiers temporaires (JST), jardinage à sentiers permanents (JSP) et Témoin non-traité

## Mortalité après coupe des deux espèces

Pour les deux espèces, les taux de mortalité des semis sont demeurés faibles cinq ans après les coupes. Pour la CPRS, la CPPTM, le JSP et le témoin, le taux de mortalité par espèce a été de 0,13 % pour le sapin baumier et le 0,13 % pour l'épinette noire. Dans le cas du JST, le taux de mortalité était de 0,26 % pour le sapin baumier et 0,39 % pour l'épinette noire. Ainsi, aucune analyse statistique n'a été réalisée sur cette variable, compte tenu des valeurs trop faibles.

## Réaction de croissance du sapin baumier

La croissance en diamètre du sapin baumier était constante et comparable entre les traitements avant les coupes ( $P > 0,05$ ). Après les interventions, la croissance en diamètre a évolué différemment selon les traitements (Tableau 5). Le tableau 6 comporte deux parties. Dans la première partie, on voit la réaction de chaque traitement par année. Ici on peut voir l'évolution de chaque traitement et le changement produit par les coupes, année après année. Dans la deuxième partie, on observe la comparaison des traitements pour une même année. De cette façon, nous pouvons remarquer que, à partir la sixième année (1 an après la coupe), il commence à y avoir des différences significatives entre les traitements. Pour tous les types de coupe, la croissance de l'année après la coupe diffère de celle d'avant la coupe. Aussi, on peut observer qu'immédiatement après les interventions, les coupes le plus sévères comme la CPRS et la CPPTM, commencent à montrer des différences significatives par rapport aux coupes de jardinage. D'autre part, on peut observer que les coupes de jardinage montrent des différences significatives par rapport au témoin, dès la première ou la deuxième année après la coupe. Par contre, elles ne se démarquent pas entre elles. (Tableau 6, Figure 3).

Tableau 5. Description de l'anova de type 3. Test des effets fixes pour le sapin baumier après la coupe.

Effet	Valeur de F	PR > F
Traitements	23,44	<,0001
Temps	122,44	<,0001
Traitements*Temps	8,61	<,0001

**Tableau 6. Effet du temps avec les traitements, et l'effet des traitements avec le temps sur la croissance en diamètre du sapin baumier.**

Traitement	Temps									
	Avant la coupe					Après la coupe				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CPRS	A* f**	A f	A f	A f	A e	A d	A c	A b	A a	A a
CPPTM	A f	A f	A f	A f	A e	A d	A c	B b	B a	B a
JSP	A f	A e	A e	A e	A d	B c	B b	C a	C a	C a
JST	A e f	A e f	A f	A f	A e	BC d	B c	C c	C b	C a
TEMOIN	A e	A d	A d	A d	A d	C c d	C b c	D a	D a b	D a

\* Lettres majuscules : comparaison des traitements par année.

\*\* Lettres minuscules : comparaison des années par traitement.

Note : Deux lettres différentes indiquent une différence significative selon le test de LSD protégé.

Pour le sapin baumier, la croissance cumulée en diamètre après la coupe a été la plus importante après la CPRS (figure 3). À la fin de l'étude, cette coupe a permis au sapin de croître de  $3,09 \text{ mm} \pm 0,61$ . La CPPTM pour sa part prend la seconde place pour la croissance en diamètre cumulée (mm) en obtenant  $1,77 \text{ mm} \pm 0,33$ . Les deux coupes de jardinage ne présentent pas de différence significative entre elles (jardinage à sentiers temporaires :  $0,301 \pm 0,060 \text{ mm}$ ; jardinage à sentiers permanents :  $0,361 \text{ mm} \pm 0,072$ ), mais différent toutefois du témoin ( $0,125 \text{ mm} \pm 0,025$ ).

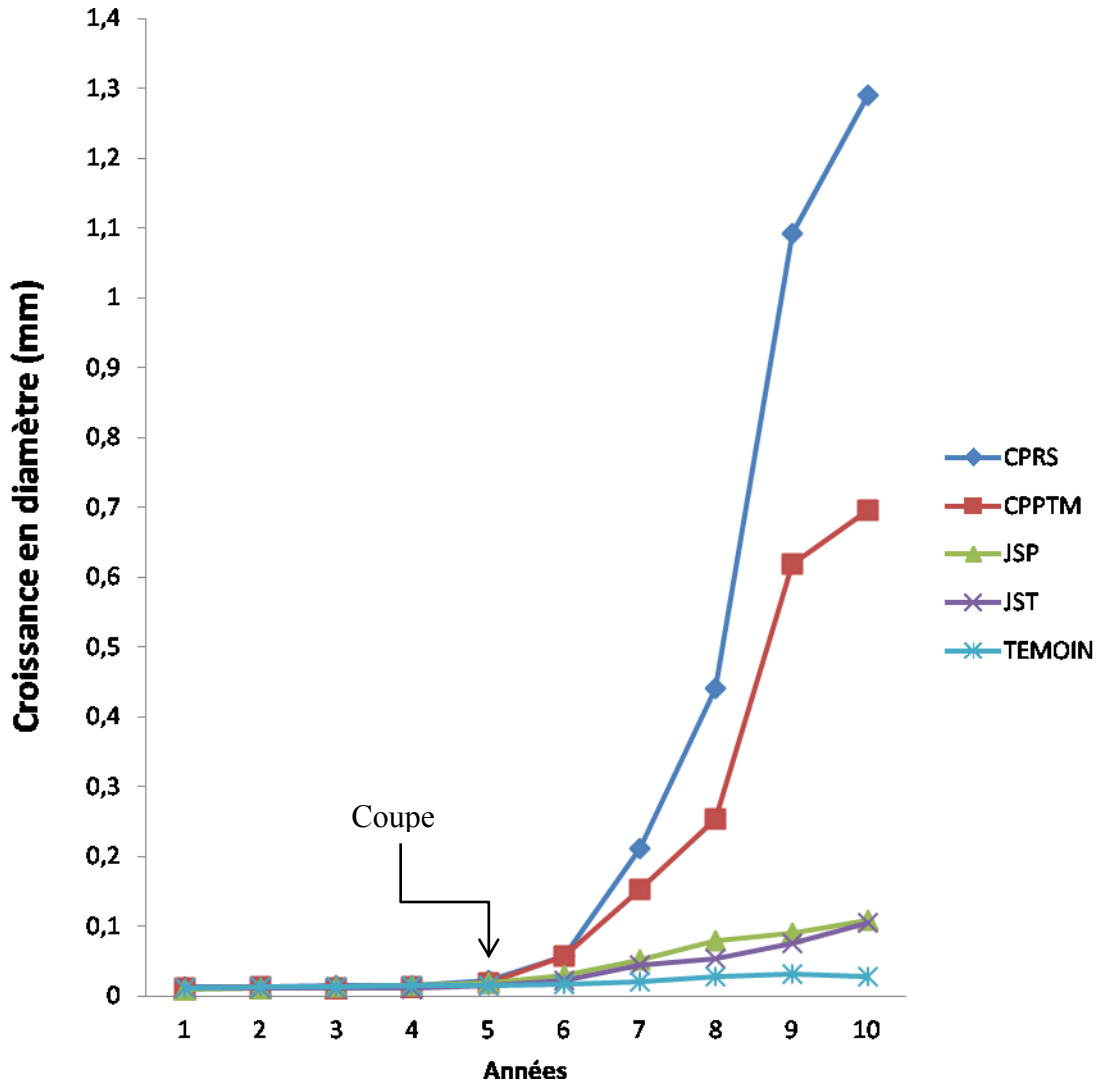


Figure 3. Croissance en diamètre (mm) du sapin baumier par traitement et par année

## Réaction de croissance de l'épinette noire

En ce qui concerne l'épinette noire, la croissance diamétrale était constante et comparable entre les traitements avant la coupe ( $P > 0,05$ ). Toutefois, après les interventions, des différences significatives apparaissent entre les traitements et entre les années (Tableau 7). Le tableau 8 comporte deux parties. Dans la première partie, on observe la réaction de chaque traitement par année. Ici on peut voir l'évolution de chaque traitement et le changement produit par les coupes année après année. Dans la deuxième partie, on



observe la comparaison des différents traitements pour une année donnée. De cette façon nous pouvons identifier une réaction immédiate aux divers types de coupe. De plus, à partir de la deuxième année après la coupe, il commence à y avoir des différences entre les différents traitements. Aussi, on peut observer qu'à partir de cette année, la CPRS présente la meilleure performance suivie par la CPPTM, le JSP et en dernier le JST.

**Tableau 7. Description de l'anova de type 3. Test des effets fixes pour l'épinette noire après la coupe.**

Effet	Valeur de F	PR > F
Traitements	17,79	<,0001
Temps	103,72	<,0001
Traitements*Temps	10,48	<,0001

**Tableau 8. Effet du temps par traitement, et l'effet des traitements dans la durée sur la croissance en diamètre de l'épinette noire durant toute l'étude.**

Traitement	Années									
	Avant la coupe					Après la coupe				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CPRS	A* <sub>g</sub> **	A <sub>fg</sub>	A <sub>g</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>e</sub>	A <sub>d</sub>	A <sub>c</sub>	A <sub>b</sub>	A <sub>a</sub>
CPPTM	A <sub>fg</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>g</sub>	A <sub>fg</sub>	A <sub>e</sub>	A <sub>d</sub>	B <sub>c</sub>	B <sub>b</sub>	B <sub>a</sub>	B <sub>a</sub>
JSP	A <sub>ef</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>e</sub>	A <sub>d</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>b</sub>	C <sub>a</sub>	C <sub>a</sub>
JST	A <sub>cd</sub>	A <sub>de</sub>	A <sub>e</sub>	A <sub>d</sub>	A <sub>d</sub>	B <sub>c</sub>	D <sub>b</sub>	D <sub>ab</sub>	D <sub>a</sub>	D <sub>a</sub>
TEMOIN	A <sub>cd</sub>	A <sub>cd</sub>	A <sub>d</sub>	A <sub>bc</sub>	A <sub>abc</sub>	B <sub>ab</sub>	E <sub>abc</sub>	E <sub>a</sub>	E <sub>ab</sub>	E <sub>ab</sub>

\* Lettres majuscules : comparaison des traitements par année

\*\* Lettres minuscules : comparaison par des années pour un traitement.

Note : deux lettres différentes indiquent une différence significative selon le test de LSD protégé.

Les croissances cumulées les plus importantes après la coupe ont été observées avec la coupe la plus sévère, la CPRS, (figure 4) avec une croissance de 1,65 mm ± 0,33, suivie de la CPPTM (0,97 mm ± 0,17), la coupe de jardinage à sentiers permanents (0,335 mm ± 0,067), la coupe de jardinage à sentiers temporaires (0,191 mm ± 0,038), et enfin le témoin (0,102 mm ± 0,020). Contrairement au sapin baumier, la croissance en diamètre de l'épinette noire diffère entre les coupes de jardinage, le jardinage avec sentiers permanents fournissant les meilleurs résultats. Leur croissance cumulée en diamètre est aussi supérieure à celle des témoins.

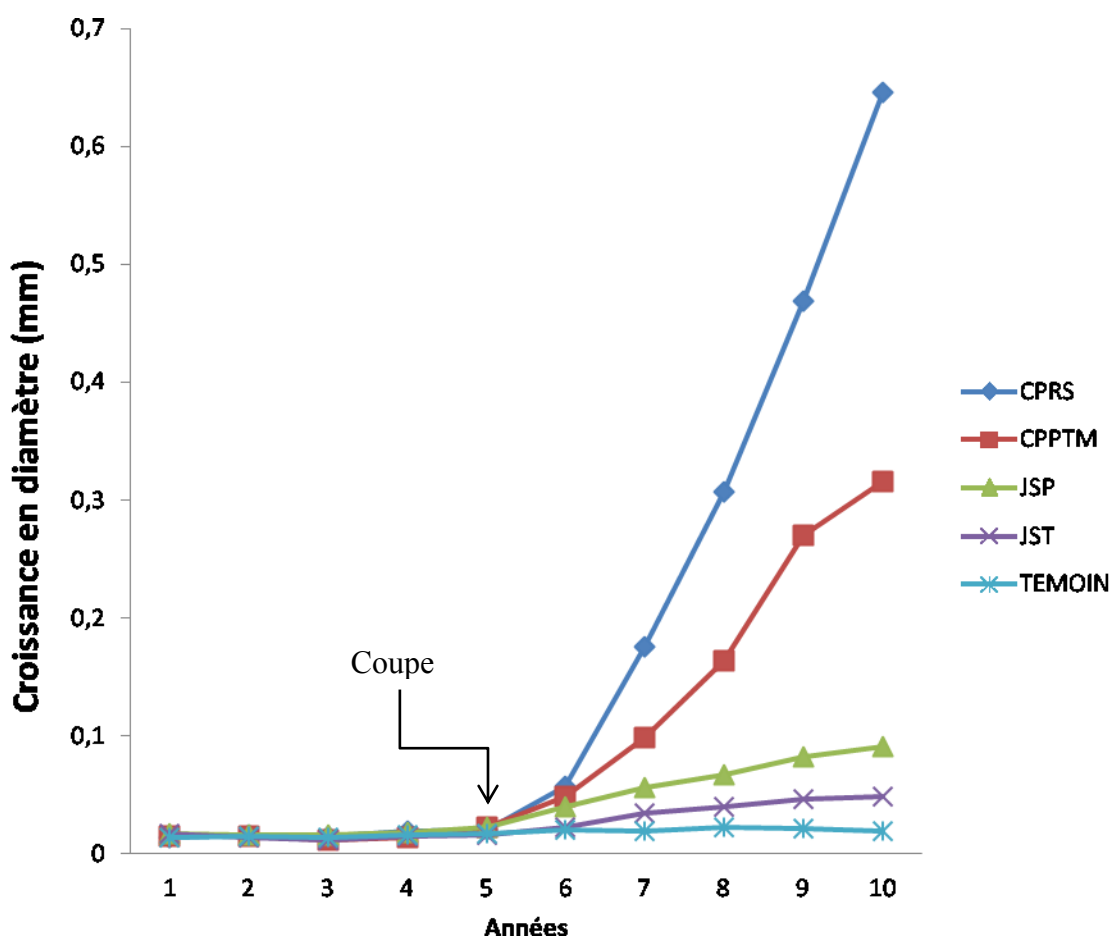


Figure 4. Croissance en diamètre (mm) d'épinette noire par traitement et par année

Quand on compare la croissance du sapin baumier et celle de l'épinette noire, on observe que le sapin baumier a eu une croissance plus élevée que celle de l'épinette noire. Son développement en ce qui concerne la croissance en diamètre le démontre (Figures 3 et 4). Il faut mentionner la différence en échelle de chaque figure, car le sapin baumier a montré une meilleure performance par rapport l'épinette noire. Par exemple, le sapin baumier a obtenu 50 % de plus en diamètre que l'épinette noire en ce qui concerne la CPRS. Dans le cas de la CPPTM, la différence entre le sapin baumier et l'épinette noire est de 55 %. En ce qui concerne la JSP, la différence entre le sapin baumier et l'épinette noire est de 18 %. Pour le JST il y a eu une différence de 54 %. Finalement, la différence en diamètre entre le sapin baumier et l'épinette noire en ce qui concerne le témoin n'est que de 5 %.

## Facteurs influençant la réaction à la coupe

La croissance cumulée des espèces, tant en diamètre qu'en hauteur, n'a pas été corrélée à la hauteur au moment de la coupe et ce, peu importe le type de coupe (Tableaux 9 et 10). On ne peut donc l'utiliser pour construire un modèle prédictif de cette relation.

**Tableau 9. Coefficients de corrélation de Spearman entre la hauteur initiale (mm) et la croissance en diamètre cumulée par traitement.**

	Sapin baumier		Épinette noire	
	$r_s$	P	$r_s$	P
CPRS	0,23	0,06	-0,08	0,50
CPPTM	0,13	0,28	0,07	0,54
JSP	-0,009	0,93	-0,11	0,32
JST	-0,09	0,42	-0,11	0,38

\* Relation statistiquement significative.

**Tableau 10. Coefficients de corrélation de Spearman entre la hauteur initiale (mm) et la croissance en hauteur cumulée par traitement.**

	Sapin baumier		Épinette noire	
	$r_s$	P	$r_s$	P
CPRS	-0,078	0,51	-0,037	0,74
CPPTM	-0,047	0,71	-0,053	0,65
JSP	-0,162	0,17	-0,026	0,81
JST	-0,041	0,73	-0,093	0,45

\* Relation statistiquement significative.

Dans le tableau 11, on voit que la proportion de la cime vivante a influencé la croissance cumulée en diamètre à la suite de la coupe pour les deux espèces et pour tous les types de coupes.

**Tableau 11. Coefficients de corrélation de Spearman entre la croissance cumulée en diamètre (mm) depuis la coupe et la proportion de cime vivante, par traitement.**

	Sapin baumier		Épinette noire	
	$r_s$	P	$r_s$	P
CPRS	0,48	<,0001*	0,61	<,0001*
CPPTM	0,55	<,0001*	0,39	0,0007*
JSP	0,55	<,0001*	0,47	<,0001*
JST	0,61	<,0001*	0,33	0,007*

\* Relation statistiquement significative.

Dans le cas du sapin, la corrélation entre la croissance cumulée en diamètre et l'indice apical a été significative dans toutes les coupes effectuées (tableau 12). Dans le cas de l'épinette noire, seulement les coupes les plus sévères (CPRS et CPPTM) montrent un effet significatif.

**Tableau 12. Coefficients de corrélation de Spearman entre la croissance cumulée en diamètre (mm) depuis la coupe et l'indice apical, par traitement.**

	Sapin baumier		Épinette noire	
	$r_s$	P	$r_s$	P
CPRS	0,57	<,0001*	0,24	0,0003*
CPPTM	0,58	<,0001*	0,16	0,02*
JSP	0,37	<,0001*	0,15	0,69
JST	0,45	<,0001*	0,06	0,27

\* Relation statistiquement significative.

La corrélation entre la croissance en hauteur cumulée et l'indice apical (Tableau 13) a été significative dans les deux espèces pour chaque traitement. Des résultats semblables ont été obtenus avec la proportion de cime vivante (Tableau 14). Dans la plupart des cas, la corrélation était meilleure avec l'indice apical.

**Tableau 13. Coefficients de corrélation de Spearman entre la croissance cumulée en hauteur (mm) depuis de la coupe et l'indice apical, par traitement.**

	Sapin baumier		Épinette noire	
	$r_s$	P	$r_s$	P
CPRS	0,60	<,0001*	0,50	<,0001*
CPPTM	0,73	<,0001*	0,63	<,0001*
JSP	0,84	<,0001*	0,68	<,0001*
JST	0,78	<,0001*	0,38	0,0009*

\* Relation statistiquement significative.

**Tableau 14. Coefficients de corrélation de Spearman entre la croissance en hauteur cumulée en (mm) depuis la coupe et la cime vivante, par traitement.**

	Sapin baumier		Épinette noire	
	$r_s$	P	$r_s$	P
CPRS	0,57	<,0001*	0,75	<,0001*
CPPTM	0,61	<,0001*	0,40	0,0004*
JSP	0,62	<,0001*	0,39	0,0005*
JST	0,59	<,0001*	0,35	0,002*

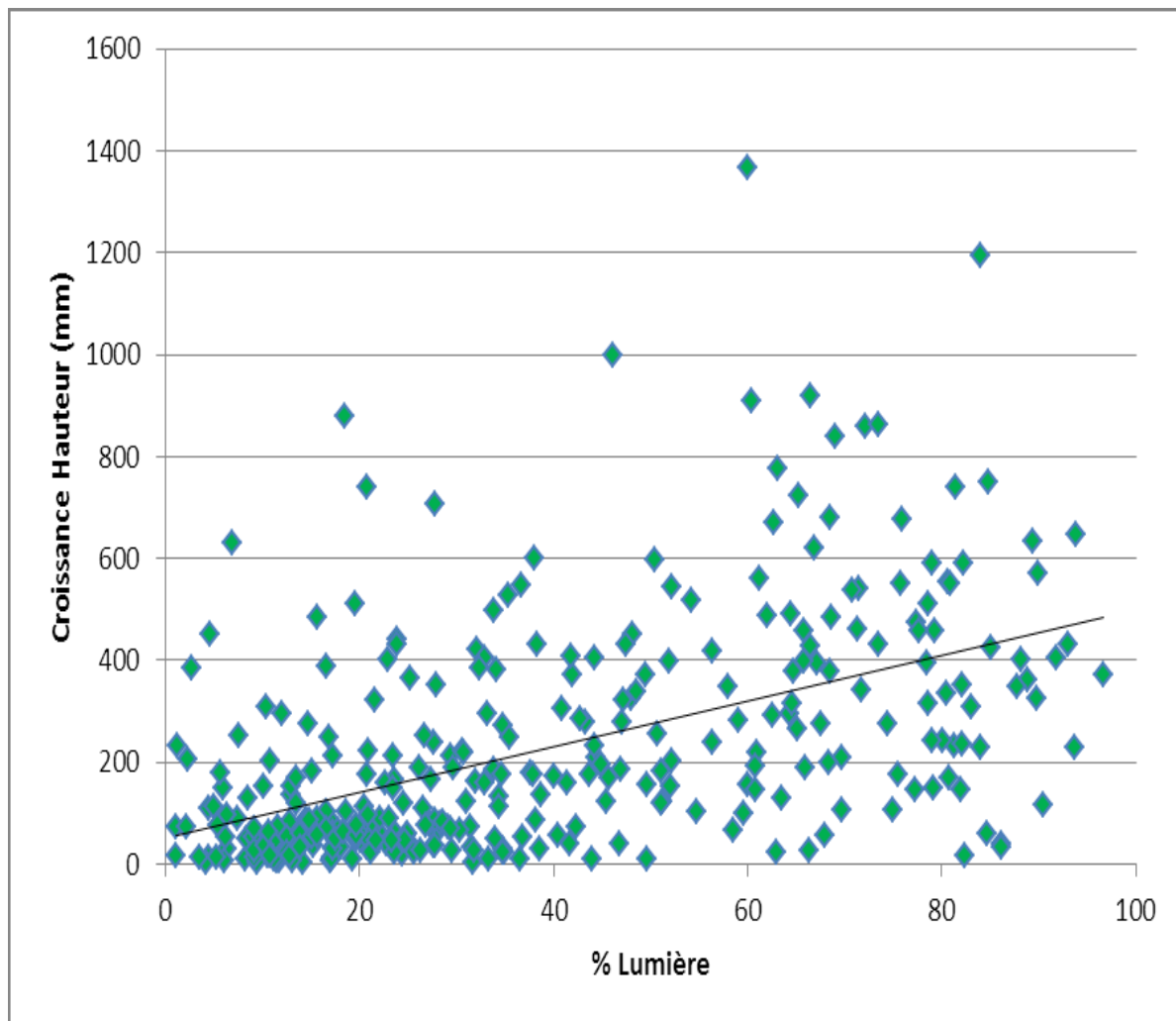
\* Relation statistiquement significative.

La croissance en hauteur est un paramètre de croissance qui nous montre d'une façon plus précise le développement d'un arbre. En particulier, il nous permet de voir l'évolution de la position concurrentielle des deux espèces en présence. Dans le cas du sapin baumier, dans une première tentative incluait à la fois la luminosité et la cime vivante mais l'effet de cette dernière s'est révélé non significatif et la variable a été retirée. La régression pour le sapin porte ainsi uniquement sur la croissance en hauteur totale (C.H) et la lumière (L). Cette régression nous montre que la relation est significative entre la croissance en hauteur et la lumière avec une  $R^2$  25,6%. La figure 5 montre la relation entre la croissance en hauteur et la luminosité, où on peut observer une dispersion assez importante des observations autour de la droite de régression. L'équation obtenue à partir de cette régression est (Équation 1) :

**Équation 1. Relation entre la croissance en hauteur totale dans la CPRS en fonction de la cime vivante.**

$$C.H = 53,88 + 4,40(L)$$

La relation que l'on observe dans cette équation nous montre que la lumière a un effet positif sur la croissance en hauteur totale.



**Figure 5. Relation du sapin baumier, entre la croissance en hauteur et le pourcentage de lumière.**

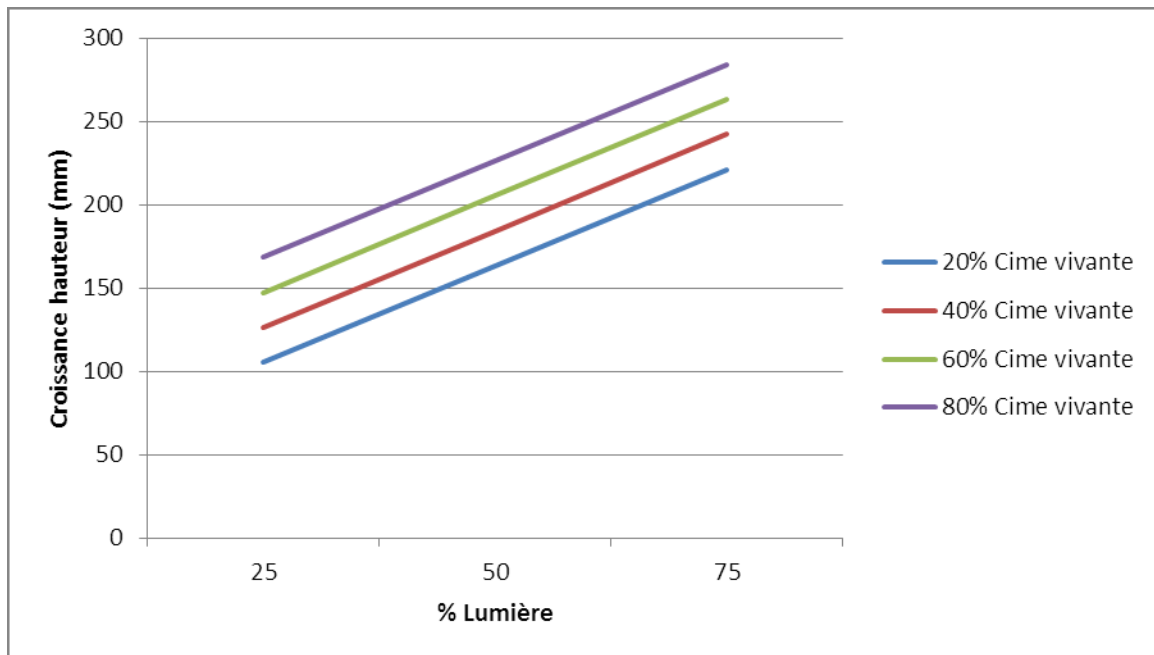
Dans le cas de l'épinette noire, les variables utilisés pour effectuer la régression pour expliquer la croissance en hauteur totale (C.H) sont la lumière (L) et la cime vivante (C). La régression nous montre que la relation entre la croissance en hauteur en fonction de la lumière et la cime vivante est significative comme le montre le tableau 15. Dans ce cas la régression montre un  $R^2$  22,6%. Aussi la Figure 6 montre la relation qui existe entre la luminosité, la cime vivante et la croissance en hauteur. Ainsi, pour un semis avec une cime bien développée (80% de cime vivante), la croissance double presque en passant de 25 à 75% de lumière. On constate aussi que l'importance de la cime verte a aussi un effet appréciable. L'équation obtenue à partir de cette régression est (Équation 2) :

**Tableau 15. Régression de la croissance en hauteur total en fonction de la lumière et la cime vivante.**

Variable	Valeur F	PR> t
Ordonnée à l'origine	1,64	0,1024
Cime vivante	3,96	<,0001
Lumière	9,35	<,0001

**Équation 2. Relation entre la croissance en hauteur totale dans l'épinette noire en fonction de la lumière et la cime vivante.**

$$C.H = 26,19 + 1,05 (L) + 2,32 (C)$$



**Figure 6. Relation entre la lumière, la cime vivante et la croissance en hauteur pour l'épinette noire.**

## Discussion

### Capacité des indices de vigueur à refléter le niveau d'oppression de la régénération.

#### Indice apical.

Dans cette étude, la relation entre l'indice apical et le pourcentage de lumière pour les essences forestières à l'étude montre des effets significatifs, c'est-à-dire que l'indice apical reflète l'environnement lumineux dans lequel croît le semis. La relation entre l'intensité lumineuse et l'indice apical indique une stratégie de capture de l'énergie lumineuse qui minimise l'ombrage entre les branches (Kohyama 1980; Sprugel et al. 1991). Pour le sapin, la croissance est en lien avec l'indice apical, ce qui confirme que l'indice représente bien le niveau d'oppression du semis. Le sapin étant une espèce très tolérante à l'ombre possède un très bon potentiel pour s'installer et se développer sous la canopée des arbres (Frank 1990). Dans le cas de l'épinette noire, le pourcentage de lumière a un effet significatif sur l'indice apical, mais celui-ci ne reflète pas nécessairement la croissance. Takahashi (1996) a aussi constaté une plus grande tendance à augmenter la croissance des branches latérales chez *Picea sachalinensis* par rapport à *Picea glehnii*. Ceci serait cohérent avec une meilleure corrélation entre la disponibilité de la lumière et l'indice apical chez le sapin dans notre étude. Par contre, même *Picea glehnii* était en mesure de modifier la croissance de ses branches latérales, ce qui pourrait expliquer la présence d'une relation significative entre ces deux mêmes variables pour l'épinette noire dans notre étude. Il serait intéressant de vérifier si nos deux espèces présentent les mêmes stratégies et si celles-ci peuvent être généralisées pour les genres concernés. Le fait que la régénération préétablie d'épinette noire soit surtout constituée de marcottes (Paquin et Doucet 1992) pourrait aussi atténuer le lien entre la morphologie et la croissance de la régénération puisque les marcottes pourraient bénéficier des hydrates de carbone produits par l'arbre-mère.

#### Cime vivante

La proportion de cime vivante reflète aussi l'environnement lumineux pour les semis de sapin. La relation est toutefois moins étroite que pour l'indice apical. La proportion de cime vivante est aussi en lien direct avec la croissance du sapin mais, ici encore, le lien est moins net que pour l'indice apical. Par contre, chez l'épinette noire, la proportion de cime vivante ne reflète pas l'environnement lumineux du semis et n'est pas en lien direct avec sa croissance. Ce résultat rejoindrait les observations de Takahashi (1996) pour d'autres espèces des mêmes genres, où il mentionne que *Abies sachalinensis* persiste en sous-étage en perdant ses vieilles branches et en formant des nouvelles, alors que *Picea glehnii* tend à les garder plus longtemps dans des



conditions lumineuses semblables. Cela peut nous indiquer qu'il s'agit possiblement de phénomènes propres à ces deux genres.

La différence de plasticité des deux espèces est très remarquable, car le sapin baumier montre un des liens plus étroits entre la morphologie de sa cime et l'environnement lumineux ainsi que les paramètres de croissance. Pour cette espèce, la croissance à l'ombre favorise donc le développement d'une cime en parapluie (Kohyama 1980) reflétant ainsi la stratégie de capture de l'énergie lumineuse tout en minimisant l'ombrage entre les branches (Kohyama 1980; Sprugel et al. 1991).

### **Effet de la modification de l'environnement lumineux par la coupe**

La réaction de la croissance a été en lien direct avec l'intensité de la coupe et la disponibilité de la lumière après la coupe. Le pourcentage de lumière a d'ailleurs été la seule variable retenue dans les régressions pour expliquer la croissance pour l'ensemble des conditions pour le sapin et il a aussi été retenu pour l'épinette noire. Il est reconnu que la lumière a une influence décisive sur le rapport entre la croissance verticale et latérale de la cime (Kohyama 1980; Klinka et al. 1992; O'Connell et Kelty 1994; Leiffers et Stadt 1994). La réaction rapide de la croissance en diamètre apparaît cohérente avec l'hypothèse d'un ajustement rapide de la capacité d'allocation à l'aubier en réponse aux nouvelles exigences hydriques du feuillage (Pothier et Margolis 1990; Collet et al. 2001; Kneeshaw et al. 2002; Parent et Ruel 2002). En ce qui concerne les effets des différentes coupes, la CPRS montre la réaction la plus forte pour les deux espèces. La CPPTM a été la deuxième coupe qui a obtenu les meilleurs résultats pour le sapin et pour l'épinette. Le sapin profite du changement dans le régime de lumière pour délaisser sa forme parapluie (Maufette 2006) et réagir immédiatement et positivement à une ouverture brutale (Parent et Ruel 2002; Fortier 2012). Selon Doucet et Boily (1995) et Doucet (2000), après une coupe, la régénération de l'épinette croît d'abord lentement mais poursuit son ascension pendant plusieurs années alors que le sapin augmente rapidement puis descend après quelques années. Une quantité de lumière incidente entre 30 et 40 % par rapport au plein ensoleillement serait suffisante pour optimiser la croissance en hauteur du sapin baumier (Logan 1969; Parent et Messier 1995; Duchesneau et al. 2001). Or, la CPRS et la CPPTM fournissent des disponibilités de lumière nettement supérieures. Pour sa part l'épinette noire présente une tolérance à l'ombre intermédiaire, et peut tolérer de longues périodes de faible intensité lumineuse (comme dix pour cents de plein ensoleillement), mais il pousse mieux en plein soleil (Logan 1969; Bell 1991). Si on compare la croissance en diamètre à la fin de la période, on peut dire que la croissance du sapin baumier demeure supérieure à celle de l'épinette noire.

Les deux coupes de jardinage présentent des accélérations de la croissance en diamètre, mais celles-ci sont plus tardives et d'une amplitude inférieure par rapport aux coupes les plus sévères. L'application de ces coupes favorise les espèces les plus tolérantes à l'ombre. Selon des résultats obtenus par Gendreau-Berthiaume (2012), le sapin baumier, augmente sa croissance après les coupes partielles, mais ce n'est pas le cas de l'épinette noire. Dans ce cas le sapin est plus opportuniste dans un milieu couvert, tandis que l'épinette peut se permettre d'attendre plus longtemps à l'ombre en attendant que les conditions s'améliorent (Messier et al. 1999).

## **Effet des caractéristiques du semis sur sa réaction à la coupe**

### **Hauteur**

En ce qui concerne la hauteur initiale, les résultats des corrélations avec les paramètres de croissance n'ont montré aucun effet significatif. La réaction de croissance n'a ainsi pas été reliée à la hauteur au moment de la coupe, contrairement à plusieurs études sur la mortalité ou la croissance après la coupe. Dans notre étude, la taille de nos arbres variait entre 4 et 170 cm de hauteur alors que d'autres études couvraient des plages nettement plus étendues. C'est le cas de celle de Ruel et al. (1995) qui comportait des tiges de plus de 3 m. La croissance en hauteur avant la coupe aurait aussi pu être utilisée comme prédicteur de la réaction à la coupe. Ainsi, Ruel et al. (1991) ont constaté que, dans le cas du sapin baumier, il y avait une relation entre la survie et la croissance de l'année de la coupe. Aussi, plusieurs auteurs ont observé une relation entre la croissance en hauteur au cours des années précédant la coupe et la réaction du semis. (Hatcher 1960; Crossley 1976; Seidel 1980; Ferguson et Adams 1980; McCaughey et Schmid 1982; Ruel et al. 1991).

### **Indice apical**

L'indice apical est un bon indicateur du développement du sapin baumier après la coupe, peu importe le type de coupe. Cet indice traduisait bien le niveau d'oppression avant la coupe puisqu'il était lié à la fois à la disponibilité de la lumière et à la croissance. Cet indice était aussi efficace pour prédire la réaction de l'épinette noire après des coupes de fortes intensités mais n'était pas efficace pour prédire la réaction en diamètre après les coupes de jardinage. Il convient de rappeler que cet indice ne traduisait pas complètement le niveau d'oppression initial pour l'épinette noire puisqu'il était en lien avec le pourcentage de lumière disponible mais pas avec la croissance en absence de coupe.

On considère généralement que cet indice reflète le niveau d'oppression avant la coupe et l'importance des ajustements morphologiques qui devront être faits à la suite de la coupe. Le développement des sapins et d'épicéas, dépend de la reconnaissance des différences assez subtiles de l'architecture de leur couronne et

de la croissance (Messier et al. 1999). La plus grande plasticité du sapin baumier par rapport à l'épinette noire et sa capacité à privilégier la croissance des branches latérales semble un trait commun à d'autres espèces du même genre (Takahashi 1996).

## Cime vivante

De même que pour l'indice apical, la proportion de cime vivante s'est avéré un bon indicateur de la croissance de chacune des espèces après les différents types de coupe. On observe ainsi une relation positive entre la proportion de cime vivante et la croissance après coupe. Pour le sapin, cette variable reflétait le niveau d'oppression en absence de coupe, quoique le lien ait été moins étroit que pour l'indice apical. Pour l'épinette, la relation a aussi été significative, même si cette variable ne reflétait pas la lumière disponible et n'était pas en lien direct avec la croissance en absence de coupe.

Différentes études ont aussi constaté un lien positif entre le développement de la cime vivante et la croissance. De tels liens ont été constatés pour l'épinette noire, le sapin baumier, le Douglas taxifolié (*Pseudotsuga mensiesii* (Mirb)), le sapin argenté (*Abies concolor* (Gordon & Glend.) Lindl. ex Hildebr.) et le sapin rouge de Californie (*Abies magnifica*, A.Murray,) après l'ouverture de la canopée (Helms et Standiford 1985, Tesch et al. 1993, Ruel et Doucet 1998; Ruel et al. 2000).

La proportion de cime vivante a permis d'expliquer de 33 à 43 % de la variation de la croissance en hauteur du sapin à la suite des différents types de coupes. Cet indice serait ainsi applicable autant dans l'étude de coupes de fortes intensités que dans l'étude des coupes partielles. Il convient toutefois de noter que, lorsque l'on inclue le témoin, la proportion de cime vivante n'est pas retenue dans les régressions et seule la disponibilité de la lumière joue. Le jeu de données inclut dans ce cas plusieurs semis bénéficiant de moins de 20% de lumière et, dans ce contexte, les variations de proportion de cime vivante seront faibles et le manque de lumière aura un effet dominant. La proportion de variance expliquée s'est avérée en général plus faible pour l'épinette noire, devenant même non significative pour le jardinage avec sentiers temporaires. Ceci pourrait refléter une plus faible plasticité morphologique de l'épinette noire, comme le suggérait l'absence de relation entre cet indice et l'intensité lumineuse. Par contre, la régression établie pour l'ensemble des conditions retient à la fois la lumière et le pourcentage de cime vivante.

## **Survie des semis.**

Dans notre étude, cinq années après la coupe, le taux de mortalité est presque nul et ce, peu importe le traitement. Dans une étude de Ruel et al. (1995), l'effet de la coupe à blanc dans des peuplements de sapin baumier et d'épinette noire a été analysé. Dans cette étude, les auteurs ont pris en considération la qualité des tiges et le temps après la coupe. Les résultats pour la première année montrent que les arbres les plus petits (0 - 100 cm), ont présenté un taux de mortalité élevée pour les deux espèces (24 % pour le sapin baumier et 21 % pour l'épinette noire). Pendant la deuxième et troisième année après la coupe, le taux de mortalité a été plus bas. Dans notre étude, la taille de nos arbres variait entre 4 et 170 cm de hauteur alors que l'étude précitée comportait des tiges de plus de 3 m. De plus, l'étude de Ruel et al. (1995) visait à échantillonner une gamme de qualité de semis, sans nécessairement une représentativité au niveau du parterre de coupe.

## Conclusion

Notre étude démontre que les indices de vigueur reflètent bien le niveau d'oppression pour les semis de sapin baumier mais que ce lien est moins net pour l'épinette noire. La proportion de cime vivante était corrélée avec la croissance après coupe des deux espèces mais le lien était moins étroit pour l'épinette noire. Ceci pourrait être en lien avec le fait qu'il traduit imparfaitement le niveau d'oppression initial. Il est intéressant de noter que cet indice performait toutefois bien avec la CPRS, ce qui correspond davantage aux conditions de coupe totale dans lesquelles ces indices ont été testés. Lorsque l'on élargit la gamme de conditions examinées pour inclure les témoins, la disponibilité de la lumière joue un rôle dominant pour le sapin, la proportion de cime vivante devenant non significative. Des études spécifiques aux coupes partielles, particulièrement des coupes de faible intensité conduisant à de faibles intensités lumineuses, sont ainsi justifiées.

La réaction à la coupe a aussi varié fortement selon l'espèce, le sapin réagissant plus vigoureusement aux divers types de coupe. Sa réaction est aussi plus marquée après les coupes les plus sévères comme la CPRS et la CPPTM. Les réactions de croissance des deux espèces ont été clairement moins marquées après les coupes de jardinage. Des études additionnelles seraient ainsi souhaitables pour mieux comprendre ses mécanismes de réaction.

Puisque les prédictions de réaction étaient moins bonnes avec les coupes de jardinage, tout au moins pour l'épinette noire, il semblerait pertinent d'approfondir les connaissances dans ce domaine. En particulier, il faudrait vérifier à plus long terme comment chaque traitement risque de favoriser le sapin baumier par rapport à l'épinette noire. Ceci demandera de documenter non seulement la réaction de la régénération préétablie à la coupe à plus long terme, mais aussi l'installation d'une régénération complémentaire.

# Bibliographie

**Aarssen, L. W. 1994.** Hypotheses for the evolution of apical dominance in plants: implications for the interpretation of overcompensation. *Oikos* 74: 149-156.

**Aussenac, G. 1973.** Effets de conditions microclimatiques différentes sur la morphologie et la structure anatomique des aiguilles de quelques résineux. *Ann. Sci. Forest.* 30 : 375–392.

**Bell, F.W. 1991.** Critical Silvics of Conifer Crop Species and Selected Competitive Vegetation in Northwestern Ontario. For. Can., Ont. Reg., Sault Ste. Marie, ON. and Northwestern Ont. For. Technol. Dev. Unit, Ont. Min. Nat. Resour., Thunder Bay, ON. COFRDA Rep. 3310/NWOFTDU Rep. 19. 177 pp.

**Baskerville, G.L. 1975.** Spruce budworm: super silviculturist. *For. Chron.* 51: 138-140.

**Belanger, L. 1993.** Une expérience de gestion écosystémique d'une forêt boréale : le cas de la forêt Montmorency (Québec), dans comptes rendus du congrès conjoint Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (OIFQ et Institut forestier du Canada (IFC), Québec, sept. 1993, p-F27-F35.

**Bergeron, Y., Harvey, B., Leduc, A., et Gauthier, S. 1999.** Stratégies d'aménagement forestier qui s'inspirent de la dynamique des perturbations naturelles: considérations à l'échelle du peuplement et de la forêt. *For. Chron.* 75: 55-61.

**Boily, J., et Doucet, R. 1993.** Croissance juvénile de marcottes d'épinette noire en régénération après récolte du couvert dominant. *Can. J. For. Res.* 23:1396-1401.

**Boucher, D., De Grandpré, L., et Gauthier, S. 2003.** Développement d'un outil de classification de la structure des peuplements et comparaison de deux territoires de la pessière à mousses du Québec. *For. Chron.* 79 : 318-328.

**Carter, R.E., et Klinka, K. 1992.** Variation in shade tolerance of Douglas-fir, western hemlock, and western red cedar in coastal British Columbia. *For. Ecol. Manage.* 55: 87–105.

**Collet, C., Lanter, O., et Pardos, M. 2001.** Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. *Ann. For. Sci.* 58: 127–134.

**Simon-Morin, J. 2009.** Développement d'approches sylvicoles alternatives adaptées aux peuplements irréguliers de Sapin Baumier et d'Épinette noire. Mémoire de Maîtrise, faculté de foresterie et Géomatique, Université Laval, Québec, 101p.

**Simon-Morin, J., Ruel, J.-C. et Darveau, M. 2010.** Short term effects of alternative silvicultural treatments on stand attributes in irregular balsam fir-black spruce stands. *For. Ecol. Manage.* 260: 907-914.

**Crossley, D. I., 1976.** Growth response of spruce and fir to release from suppression. *For. Chron.* 52: 189-193.

**Doucet, R. 2000.** L'épinette noire : aussi prolifique que le sapin. *Info Forêt*, no 63, fév. 2000. MRNQ. Québec, p. 6.

**Doucet R., et Boily, J. 1987.** Bibliographie annotée sur le marcottage de l'épinette noire. Min. de l'énergie et des Ressources du Québec, direction de la recherche et du développement, Mémoire N° 90, 32p.

**Doucet, R., et Boily, J., 1995.** Croissance en hauteur de la régénération d'Épinette noire et de Sapin baumier après de la coupe. Gouvernement du Québec Ministère de Ressources Naturelles. Note de recherche forestière. N° 68. 4p.

**Duchesneau, R., Lesage, I., Messier, C., et Morin, H. 2001.** Effects of light and intraspecific competition on growth and crown morphology of two size classes of understory balsam fir saplings. *For. Ecol. Manage.* 140 : 215–225.

**Fenton, N., Bescond, H., Imbeau, I., Boudreault, C., Drapeau, P., et Bergeron, Y. 2008.** Évaluation sylvicole et écologique de la coupe partielle dans la forêt boréale de la ceinture d'argile. Dans *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Sous la direction de S. Gauthier, M.-A. Vaillancourt, A. Leduc, L. DeGrandpré, D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau et Y. Bergeron. Presses de l'Université du Québec, Québec, Qué. p. 393–415.

**Ferguson, D.E., et Adams D.L. 1980.** Response of advance grand fir regeneration to overstory removal in northern Idaho. *For. Sci.* 26: 537-545.

**Ford, D. 1992.** The control of tree structure and productivity through the interaction of morphological development and physiological processes. *Int. J. Plant Sci.* 153 : s147 – s162.

**Fortier, G. 2012.** Mesure de la compétition de l'épinette noire par le sapin baumier en Gaspésie. Mémoire M.Sc. Université du Québec à Montréal.

**Frank, R.M. 1990.** *Abies balsamea* (L.) Mill. Dans R.M. Burns et B. H. Honkala (éditeurs). Silvics of North America, volume 1: Conifers. Agriculture Handbook 654. V.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. 26-35.

**Gendreau-Berthiaume, B., Kneeshaw, D.D., et Harvey, B.D. 2012.** Effects of partial cutting and partial disturbance by wind and insects on stand composition, structure and growth in boreal mixedwoods. *For.* 4: 551-565.

**Ghent, A.W. 1958.** Studies of regeneration in forest stands devastated by the spruce budworm II. Age, height growth, and related studies of balsam fir seedlings. *Forest Sci.* 4: 135-146.

**Gordon, D.T. 1973.** Released advance reproduction of white fir and red fir: effects on growth, damage, and mortality. Research paper PSW-95. Berkeley, CA: U.S. Dep. of Agric., For. Serv., Pac. Southwest For. and Range Exp. Stn. 12 p.

**Groot, A. 2002.** Is uneven-aged silviculture applicable to peatland black spruce (*Picea mariana*) in Ontario, Canada? *Forestry* 75: 437-442.

**Groot, A., Lussier, J.M., Mitchell, A.K., et MacIsaac, D.A. 2005.** A silvicultural systems perspective on changing Canadian forestry practices. *For. Chron.* 81: 50-55.

**Hatcher, R.J., 1960.** Croissance du sapin après une coupe rase dans le Québec Canada, Min. du Nord canadien, Dir. des recherches sylvicoles, Mémoire technique n° 87. 24p.

**Helms, J.A., et Standiford, R.B. 1985.** Predicting release of advance reproduction of mixed conifer species in California following overstory removal. *For. Sci.* 31: 3-15.

**Johnstone, W.D. 1978.** Growth of fir and spruce advance growth and logging residuals following logging in west central Alberta. *Can. for. serv., Northern For. Res. Cent., NOR-X-203.*

**Klinka, K., Wang, Q., Kayahara, G.J., Carter, R.E., et Blacwell, B.A. 1992.** Light-growth response relationships in pacific silver fir (*Abies amabilis*) and subalpine fir (*Abies lasio carpa*). *Can. J. Bot.* 70: 1919-1930.

**Kohyama, T. 1980.** Growth pattern of *Abies mariesii* sapling under conditions of open-growth and suppression. *Bot. Mag. Tokyo*, 93 : 13-24.



**Kneeshaw, D.D., Williams, H., Nikinmaa, E., et Messier, C. 2002.** Patterns of above- and below-ground response of understory conifer release 6 years after partial cutting. *Can. J. For. Res.* 32 : 255–265.

**Kramer, P.J., et Boyer, J.S. 1995.** Water relations of plants and soils. Academic Press. New York.

**Larouche, C. 2005.** Effet du patron de réparation des coupes et des variables du milieu sur les pertes par chablis dans les lisières cas de la sapinière à bouleau blanc de l'Est. Mémoire de Maîtrise, faculté de foresterie et Géomatique, Université Laval, Québec, 79p.

**LeBlanc, M., et Bélanger, L. 2000.** La sapinière vierge de la Forêt Montmorency et de sa région : une forêt boréale distincte. Mémoire de recherche forestière no 136, ministère des Ressources naturelles, 91 p.

**Legendre L., et Legendre, P. 1984.** Écologie numérique la structure des données écologiques. Masson et presses de l'Université du Québec. 335p.

**Lesage, I. 1997.** Effets d'un gradient de lumière et de compétition intraspécifique sur la croissance et la morphologie de la cime du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) MILL.). Mémoire de Maîtrise, l'université du Québec à Chicoutimi, Québec, 50p.

**Lieffers, V.J., et Stadt, K.J. 1994.** Growth of understory *Picea glauca*, *Calamagrostis Canadensis*, and *Epilobium angustifolium* in relation to overstory light transmission. *Can. J. For. Res.* 24 : 1193 – 1198.

**Logan, K.T. 1969.** Growth of tree seedling as affected by light intensity. IV. Black spruce, white spruce, balsam fir, and eastern white cedar. *Can. For. Serv. Dep. Fish. For. Publ.* N° 1256.

**MacLean, D.A., SJ. Woodley, M.G. Weber et R.W. Wein, 1983.** Fire and nutrient cycling. In: The role of fire in northern circumpolar ecosystems. Ed. by Wein, R.W. and MacLean, D.A., John Wiley & Sons Ltd., Ottawa, p. 11 1-132.

**Majcen, Z. 1994.** Historique des coupes de jardinage dans les forêts inéquiennes au Québec. *Revue Forestière Française* : 375-384.

**McCaughey, W., et Schmidt, M. 1982.** Understorey tree release following harvest cutting in spruce-fir forests of the Intermountain West. USDA, For. Serv., Intermountain For. And Range Exp. Stn., Res. Pap. INT-285. 19 p.

**Maufette, Y. 2006.** Rôle des épidémies de la livrée des forêts dans la dynamique forestière : effets potentiels sur les trajectoires successionales. UQAM. Montréal. 7 p.

**Messier, C., Doucet, R., Ruel, J.-C., Claveau, Y., Kelly, C., et Lechowicz, M. 1999.** Functional ecology of advanced regeneration in relation to light in boreal forests. *Can. J. For. Res.* 29 : 812–823.

**Messier, C., et Puttonen, P. 1995.** Spatial and temporal variation in the light environment of developing Scots pine stands: the basis for a quick and efficient method of characterizing light. *Can. J. For. Res.* 25: 343-354.

**Ministère des Ressources Naturelles du Québec, 1994.** Une stratégie. Aménager pour mieux protéger les forêts. Québec, Min. Res. Nat.

**Ministère des Ressources naturelles, faune et parcs, Québec. 2002.** Manuel d'aménagement forestier 4e édition. 14 p.

**Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) 2009.** Ressources et industries forestières – Édition complète, Québec, Qc.

**Nikinmaa, E. 1993.** Analyses of the growth of Scots pine; matching structure with function. *Acta Forestalia Fennica*. No: 235.

**O'Connell, B.M., et Kelty, M.J. 1994.** Crown architecture of understory and open-grown white pine (*Pinus strobus* L.) sapling. *Tree Physiol.* 14 : 89-102.

**Oliver, C.D., et Larson, B.C. 1990.** Forest Stand Dynamics. Biological Resource Management. McGraw-Hill, Inc. New York.

**Paquin, R., et Doucet, R. 1992.** Croissance en hauteur à long terme de la régénération préétablie dans des pessières noires boréales régénérées par marcottage, au Québec. *Can. J. For. Res.* 22: 613-621.

**Parent, S. 1995.** Effets d'un gradient de lumière sur la croissance en hauteur et morphologie de la cime du sapin baumier. Mémoire M.Sc. Université du Québec à Montréal.

**Parent, S., et Messier, C. 1995.** Effets d'un gradient de lumière sur la croissance en hauteur et la morphologie de la cime du sapin baumier régénéré naturellement. *Can. J. For. Res.* 25: 878-885.

**Parent, S., et Ruel, J.-C. 2002** Chronology of growth in balsam fir seeds, *Abies balsamea* (L.) Mill., after clearcutting with regeneration protection. *For. Chron.* 78(6):876-885.

**Pothier, D., et Margolis, H. 1990.** Changes in the water relations of balsam fir and white birch saplings after thinning. *Tree physiol.* 6: 371–380.

- Riopel, M., Bégin, J. et Ruel, J.-C. 2010.** Probabilités de pertes cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes appliquées dans des forêts résineuses du Québec. *Can. J. For. Res.* 40:1458-1472.
- Robitaille, A., et Saucier, J.-P. 1998.** Paysages régionaux du Québec méridional. Publications du Québec. Sainte-Foy. Québec. 213 p. traitements sylvicoles. 37p.
- Roy, V., P. Meek et J.-M. Lussier. 2006.** Recherche opérationnelle pour la mise au point de systèmes sylvicoles adaptés à la forêt boréale irrégulière. Chaire de faune et sylviculture. Rapport de projet 2.1. Université Laval. Québec. 70 p.
- Ruel, J.-C. 1989.** Importance de la régénération préexistante dans les forêts publiques du Québec. *Ann. Sci. For.* 46: 345-359.
- Ruel, J.-C. 2000.** Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies. *Forest Ecology and Management* 135: 169-178.
- Ruel, J.-C., et Doucet, R. 1998.** Élaboration de classes de qualité pour les inventaires de régénération. Québec. Min. des Ressources Naturelles. Dir. Rech. For. Note de rech. For n° 91.
- Ruel, J.-C., R. Doucet et J. Boily. 1991.** Étude de la mortalité initiale de la régénération préétablie de sapin et d'épinette noire après une coupe avec protection de la régénération. Québec. Min. des Ressources Naturelles. Dir. Rech. For. Note de rech. For n° 44.
- Ruel, J.-C., Doucet, R., et Boily, J. 1995.** Mortality of balsam fir and black spruce advance growth, three years after clearcutting. *Can. J. For. Res.* 25: 1528-1537.
- Ruel, J.-C., Messier, C., Doucet, R., Claveau, Y., .et Comeau, P. 2000.** Morphological indicators of growth response of coniferous advance regeneration to overstory removal in the boreal forest. *For. Chron.* 76: 633-642.
- Ruel, J.-C., Roy, V., Lussier, J.-M., Pothier, D., Meek, P., et Fortin, D. 2007.** Development of a silviculture adapted to the irregular boreal forest. *For. Chron.* 83(3):367-374.
- Seidel, K.W. 1980.** Diameter and height growth of suppressed grand fir saplings after overstory removal. USDA For. Serv., Pac. Northwest For. and Range Exp. Stn, res. Pap. PNW-275.
- Smith, D.M. 1986.** The practice of Silviculture: Applied Forest Ecology. J. Wiley and Sons, New York.

**Sprugel, D.G., Hinckley, T.M., et Schaap, W. 1991.** The theory and practice of branch autonomy. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 22:309–334.

**Takahashi, K. 1996.** Plastic response of crown architecture to crowding in understory trees of two co-dominating conifers. *Ann. Bot. (Lond.)*, 77: 159–164.

**Tang, Y., Washitani, I., et Iwaki, H. 1992.** Seasonal variations of microsite light availability within a *Miscanthus sinensis* canopy. *Ecol. Res.* 7: 97-106.

**Tesch, S.D., et Korpela, E.J. 1993.** Douglas –fir and white fir advance regeneration for renewal of mixed-conifer forests. *Can. J. For. Res.* 23: 1427-1437.

**Thorpe, H.C., Thomas, S.C. et Caspersen, J.P. 2007.** Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (*Picea mariana*) boreal forest. *Can. J. For. Res.* 37, 1563–1571.

**Tucker, G.F., Hinckley, T.M., Leverenz, J.W., et Jiang, S.-M. 1987.** Adjustment of foliar morphology in the acclimation of understory pacific silver fir following clearcutting. *For. Ecol. Manage.* 21: 249-268.

**Viereck, L.A. et Johnston, W.F. 1990.** *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Dans : Burns, R.M. et B.H. Honkala *Silvics of North America. Volume I, Conifers*, U.S. Dept. Agric., For. Serv., Washington, D.C. : 227-237.

**Waring, R.H. 1987.** Characteristics of trees predisposed to die. *Bio-Science* 37: 569-574.

**White, P.S., MacKenzie, M.D., et Busing, R.T. 1985.** Natural disturbance and gap phase dynamics in southern Appalachian spruce-fir forests. *Can. J. For. Res.* 15: 233–240.

**Williams, H. 1996.** La dynamique de croissance de la régénération préétablie de sapin Douglas et de pin lodgepole sur le plateau Fraser, Colombie-Britannique. M.Sc. thesis. Université du Québec à Montréal.