



# **Comparaison de la productivité de plantations d'épinette blanche soumises à diverses modalités d'éclaircie**

**Mémoire**

**Meriam Bettaieb**

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

Québec, Canada

# **Comparaison de la productivité de plantations d'épinette blanche soumises à diverses modalités d'éclaircie**

**Mémoire**

**Meriam BETTAIEB**

Sous la direction de :

David POTHIER, directeur de recherche

## Résumé

L'utilisation de l'éclaircie commerciale (EC) permet de réduire la densité des arbres de façon à atténuer la compétition pour les ressources et à favoriser, par la suite, la croissance des arbres résiduels. Dans ce cadre, cette étude vise à mettre en évidence l'effet de différentes modalités de l'éclaircie commerciale sur une espèce indigène et largement répandue au Québec, l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss). L'objectif de ce présent manuscrit est de comparer la productivité des éclaircies commerciales hâtives et tardives appliquées selon trois modes d'application (par le haut, par le bas et neutre) et deux intensités de prélèvement (20 ou 33 % de la surface terrière initiale) dans une plantation d'épinette blanche. Pour y arriver, nous avons utilisé les données d'inventaires d'une expérience sylvicole qui a été établie en 2007 par la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) du Québec dans une plantation d'épinette blanche mise en terre en 1987 au nord-ouest de Rivière-à-Pierre. Le dispositif est composé de 65 placettes représentant 5 répétitions complètement aléatoires de 13 traitements d'éclaircie commerciale. Les mesures dendrométriques récoltées de 2007 à 2017 ont été complétées par des mesures de hauteur et de longueur de cime en 2021. Les données ont fait l'objet d'une analyse statistique en utilisant des modèles linéaires mixtes. Les résultats montrent qu'à l'échelle de la placette, les modalités appliquées ne diffèrent pas significativement entre elles en termes d'accroissement en volume marchand des peuplements. En effet, le taux de mortalité et l'accroissement en volume étaient similaires entre les placettes éclaircies et non éclaircies. À l'échelle de l'arbre, l'éclaircie a permis de réduire la compétition, surtout pour les petits arbres. Ceci a permis d'augmenter l'efficacité de la croissance et l'accroissement en volume marchand des petits arbres. Finalement, bien que l'épinette blanche ait réagi positivement aux traitements d'éclaircie commerciale, il n'a pas été possible d'identifier la meilleure modalité à appliquer.

## Abstract

Commercial thinning (CT) reduces tree density such that competition for resources between trees is reduced, which generally promotes the growth of residual trees. This study aims to compare the effect of different modalities of commercial thinning applied to a white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) plantation, a species that is widespread and common in Canada. The main purpose of this document is to compare the productivity of early and late commercial thinning applied according to three modes of application (high, low and neutral) and two intensities (20 or 33% of the initial basal area) in a white spruce plantation. The experimental design of this silvicultural experiment was established in 2007 by the Direction de la recherche forestière (DRF) of the Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) of Quebec, in a white spruce plantation established in 1987 at about 100 km northwest of Quebec City. The experimental design is composed of 65 circular plots within which 13 commercial thinning treatments were randomly applied 5 times. Usual inventory measurements were taken in these plots at 5-year intervals from 2007 to 2017 while we measured tree height and crown length in 2021. Mixed linear models revealed that at the plot level, tree mortality and volume growth rates were statistically equal among all treatments. At the tree level, the competition between trees was particularly reduced for small trees by the thinning treatments, which led to increases in their growth efficiency and merchantable volume. However, because of similar responses between treatments, we were unable to determine the thinning treatment that maximizes tree growth volume.

# Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des abréviations.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Remerciements.....	ix
Introduction.....	1
1. Matériel et méthodes.....	10
1.1. Station d'étude.....	10
1.2. Dispositif expérimental.....	11
1.3. Prises de mesures et compilation des données.....	12
1.3.1. Indice de compétition.....	13
1.3.2. Accroissement relatif en volume marchand.....	13
1.3.3. Efficacité de croissance de l'arbre.....	13
1.3.4. Surface foliaire des arbres.....	14
1.4. Analyses statistiques.....	14
2. Résultats.....	16
2.1. Échelle du peuplement.....	16
2.2. Échelle de l'arbre.....	19
3. Discussion.....	27
3.1. Effet de l'éclaircie commerciale à l'échelle du peuplement.....	27
3.2. Effet de l'éclaircie commerciale à l'échelle de l'arbre.....	29
Conclusion.....	32
Bibliographie.....	33

## Liste des abréviations

DHP : Diamètre à la hauteur de poitrine

DRF : Direction de la recherche forestière

EC : Éclaircie commerciale

NLME : modèles non linéaires et linéaires à effets mixtes

P : la probabilité d'obtenir un résultat égal ou plus extrême que ce qui a été effectivement observé dans les données.

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Localisation du dispositif expérimental situé au nord-ouest de Rivière-à-Pierre (Google Earth, 2020).....	10
<b>Figure 2.</b> Changement temporel en volume marchand pour chaque modalité d'éclaircie hâtive.....	17
<b>Figure 3.</b> Changement temporel en volume marchand pour chaque modalité d'éclaircie tardive .....	18
<b>Figure 4.</b> Indice de compétition en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie hâtive.....	19
<b>Figure 5.</b> Indice de compétition en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie tardive .....	20
<b>Figure 6.</b> Accroissement relatif en volume marchand en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie hâtive.....	21
<b>Figure 7.</b> Accroissement relatif en volume marchand en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie tardive .....	22
<b>Figure 8.</b> Efficacité de croissance en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie hâtive.....	23
<b>Figure 9.</b> Efficacité de croissance en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie tardive .....	23
<b>Figure 10.</b> Surface foliaire en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie hâtive .....	24
<b>Figure 11.</b> Surface foliaire en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie tardive .....	25
<b>Figure 12.</b> Accroissement relatif en volume marchand en fonction de la proportion en cime vivante et des traitements d'éclaircie hâtive.....	26
<b>Figure 13.</b> Accroissement relatif en volume marchand en fonction de la proportion en cime vivante et des traitements d'éclaircie tardive.....	26

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Pourcentage de prélèvement en surface terrière visé pour chaque traitement d'éclaircie commerciale.....	11
<b>Tableau 2.</b> Mortalité (arbre/ha) en fonction des traitements d'éclaircie .....	18

“Perfection is not attainable, but if we chase perfection, we can catch  
excellence”  
Vince Lombardi

## Remerciements

Au terme de la rédaction de ce rapport, je me fais un devoir agréable de témoigner ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail et qui m'ont permis de mener mon projet à bonne fin.

Je tiens à remercier et à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche David Pothier, pour son soutien, son encadrement scientifique, sa bienveillance, son suivi, ses efforts et ses conseils judicieux. Merci de m'avoir fait confiance.

Je remercie également M. Luca Serban, pour m'avoir donné un accès privilégié au terrain, aux bases de données et aux ressources nécessaires. Merci pour votre aide, votre générosité et vos recommandations. Ma gratitude s'adresse aussi à la direction de recherche forestière (DRF) du MFFP, qui a contribué au financement du projet

J'adresse mes vifs remerciements aux membres du Jury, pour avoir bien voulu examiner et juger mon travail.

Mes remerciements vont aussi à toute personne que j'ai contactée durant ma maîtrise et auprès desquelles j'ai trouvé l'accueil bienveillant, l'assistance et l'aide dont j'ai besoin.

A ma chère famille, ma source d'inspiration et ma joie de vivre, qui n'a jamais cessé de m'encourager dans tout ce que j'entreprenais, et qui m'a dotée d'une éducation digne. Sans elle, je ne serais pas la personne que je suis devenue aujourd'hui. Vous m'avez beaucoup soutenu durant toute cette période, merci.

À mes amis proches qui m'ont aidé et soutenu lors des moments propices. Je suis chaleureusement reconnaissante de vous avoir dans ma vie.

Ces quelques mots ne peuvent pas témoigner de toute la gratitude que je vous porte. Que ce travail soit le fruit des sacrifices et le témoignage de ma gratitude la plus sincère.

## Introduction

L'industrie forestière joue un rôle socio-économique primordial pour plusieurs régions canadiennes et représente le principal contributeur à l'équilibre commercial du pays (Asselin, 2007). Par exemple, en 2018, cette industrie a représenté environ 7 % des exportations totales du Canada et a contribué pour environ 25,8 milliards de dollars à l'économie canadienne. Elle a soutenu 300 municipalités et était la source principale de revenus et d'emplois de nombreuses collectivités rurales et autochtones (Gouvernement du Canada, 2020). De plus, la demande en bois est toujours en croissance, que ce soit pour le bois d'œuvre, les produits en bois massif, les pâtes, les papiers ou pour extraire des granules biocombustibles (Boukherroub *et al.* 2016). Pour contribuer à soutenir l'approvisionnement en bois des usines de transformation, de vastes superficies ont été reboisées annuellement (Thiffault et Jobidon, 2005). L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P), l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) constituent les principales espèces résineuses reboisées au Québec et le groupe d'espèces indigènes le plus récolté (MFFP, 2019 ; Rainville, 2003). L'épinette blanche est une espèce qui a une grande importance pour les industries du sciage et des pâtes et papiers de même que dans les programmes de reboisement (Prégent *et al.* 2010).

### 1. Caractéristiques de l'épinette blanche

L'épinette blanche est une espèce de la famille des pinacées qui est extrêmement rustique et répandue. Elle est originaire de l'Amérique du Nord et s'étend de l'Alaska (États-Unis) à Terre-Neuve (Canada) (Godt *et al.* 2001). Cette espèce se caractérise par un bois de densité élevée, une grande variabilité génétique, de bonnes caractéristiques morpho-physiologiques et une croissance rapide. De plus, elle se caractérise par une forte plasticité (Prévost et Charrette, 2019), tolère une grande variété de sols, peut croître sur la plupart des stations forestières dans son aire de répartition naturelle et pousse sous des climats variés (Lamhamedi *et al.* 2017). Ces caractéristiques justifient son utilisation pour le reboisement de vastes superficies précédemment récoltées (Lamhamedi *et al.* 2017).

Au jeune âge, l'arbre présente une silhouette pyramidale assez large alors qu'à la maturité, l'arbre se démarque par un tronc unique et droit qui se termine par une cime uniforme. Pour la production de plants, sa multiplication se fait par voie sexuée (par des graines provenant de croisements dirigés) ou par voie végétative (bouturage ou embryogénèse somatique) (Gilman et Watson, 1994).

La pollinisation de cette espèce est anémophile et la reproduction commence vers 20 ans quoiqu'une production fiable de graines débute généralement vers l'âge de 40 ans (Godt *et al.* 2001). Pour une bonne croissance, cette espèce a besoin de lumière directe, mais peut se satisfaire de conditions semi-ombragées (Gilman et Watson, 1994). Elle préfère les sols à texture limoneuse ayant une fertilité moyenne à bonne avec un pH supérieur à quatre et un bon drainage (Prégent *et al.* 2010).

En milieu naturel, cette espèce est souvent associée au sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) et forme rarement des peuplements purs (Pothier *et al.* 2012). Ces deux espèces possèdent des productivités similaires, mais des tolérances à l'ombre différentes. Le sapin baumier est plus tolérant à l'ombre (Bérubé-Deschênes *et al.* 2017), mais plus vulnérable à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)) (Pothier *et al.* 2012).

Ainsi, l'épinette blanche est un substitut intéressant au sapin baumier, ce qui explique sa grande importance pour les industries du sciage et des pâtes et papiers de même que dans les programmes de reboisement (Prégent *et al.* 2010). L'épinette blanche est donc une espèce candidate de haut niveau parmi celles visées pour une intensification de la production ligneuse (Gagné *et al.* 2012). En plus des stress biotiques, les plantations composées de cette espèce peuvent être exposées à des stress abiotiques, tels que les sécheresses estivales, des vents forts ou la compétition entre les arbres, qui causent des baisses de productivité (Bradford et Palik, 2009 ; Thiffault et Jobidon, 2005).

## 2. Effets de la compétition sur la croissance de l'épinette blanche

Étant donné l'importance de l'épinette blanche sur le plan économique, une baisse de la valeur des produits transformés de cette espèce due à la compétition peut être considérée comme indésirable (Carr *et al.* 2020). En effet, les conséquences observées de la compétition entre les arbres se manifestent par une diminution de la disponibilité de la lumière, en particulier pour les petits arbres (Carr *et al.* 2020). Ceci engendre une réduction de leur croissance relative surtout que cette espèce de tolérance intermédiaire à l'ombre est sensible au manque de lumière (Bérubé-Deschênes *et al.* 2017). De plus, en raison d'une forte compétition, les jeunes peuplements peuvent être affectés par la mortalité surtout chez les petits arbres (Pothier, 2017).

Il existe deux types de compétition, soit la compétition intra-spécifique dans les monocultures et la compétition interspécifique dans des peuplements mixtes (Bérubé-Deschênes *et al.* 2017). De plus, la compétition peut être symétrique à la taille, c'est-à-dire que la contribution de chaque arbre à la croissance totale du peuplement est proportionnelle à sa taille. La compétition peut aussi être asymétrique à la taille (Pothier, 2017), c'est-à-dire que les grands arbres acquièrent démesurément plus de ressources que les petits arbres, ce qui entraînerait des taux de croissance plus rapides pour les arbres dominants (Binkley et Kashian 2015).

La compétition peut être évaluée à l'aide d'indices dépendants ou indépendants de la distance (Bérubé-Deschênes *et al.* 2017). Les indices de compétition dépendants de la distance utilisent la position des arbres (Bérubé-Deschênes *et al.* 2017) afin de déterminer les distances entre les arbres (Filipescu et Comeau, 2007) et sont utilisés pour représenter l'hétérogénéité spatiale d'un peuplement (Boivin-Dompierre *et al.* 2017). Les indices de compétition indépendants de la distance peuvent être calculés en n'utilisant que les données usuelles d'inventaire forestier (Boivin-Dompierre *et al.* 2017), comme la surface terrière et la densité du peuplement, et donnent des résultats efficaces pour l'estimation de la compétition dans les plantations d'épinette (Filipescu et Comeau, 2007).

Par ailleurs, diverses pratiques sylvicoles sont proposées pour atténuer la compétition entre les arbres et améliorer leur croissance dans les plantations. Ces pratiques incluent l'application de l'éclaircie commerciale (Hiesl *et al.* 2017).

### **3. Éclaircie commerciale**

L'éclaircie commerciale est définie comme étant « un traitement sylvicole d'éducation qui vise à récolter une partie des arbres marchands d'une plantation ou d'un peuplement naturel au stade de prématurité de structure régulière afin d'en répartir le potentiel de production sur un nombre limité d'arbres bien distribués » (Latrémouille et Larouche, 2014).

#### **3.1. Étendue dans le monde**

Ce traitement est utilisé depuis plusieurs siècles autant en Asie qu'en Europe (Gagné *et al.* 2012) dans le but d'augmenter la croissance des arbres et d'améliorer la composition des espèces sur une base durable (Lei *et al.* 2007). Dans le cas de l'Europe, plus particulièrement au Royaume-Uni, le dégagement d'arbres élites était la méthode la plus utilisée pour favoriser la croissance des arbres les plus vigoureux et maintenir une hétérogénéité dans la distribution des arbres (Gagné *et al.* 2016). En Finlande, après la seconde guerre mondiale, c'étaient plutôt les éclaircies par le bas qui étaient préconisées par le gouvernement. Toutefois, l'intensité était généralement faible et la récolte était insuffisante (Mäkinen *et al.* 2006). Depuis les années 60, en raison de l'augmentation de la demande en bois, l'intensité de l'éclaircie a augmenté et les opérations ont été orientées vers le traitement semi-systématique (Mäkinen *et al.* 2006). En Corée, l'utilisation de l'éclaircie commerciale a commencé dans les années 70 dans le but de restaurer des espèces indigènes capables de produire des forêts saines et productives (Yeo et Lee, 2006). Au Québec, la pratique de l'éclaircie commerciale a connu une hausse de popularité vers la fin des années 90 dans le but d'augmenter la croissance des arbres individuels, et ce, autant en forêt naturelle qu'en plantation (Gagné *et al.* 2012).

### **3.2. Variantes et modalités de l'éclaircie commerciale**

Il existe trois variantes d'application de l'éclaircie commerciale (EC). L'EC systématique, qui est appliquée dans les plantations et est marginalement utilisée au Québec, consiste à récolter les arbres selon un patron spatialement géométrique (Poulin, 2013). La deuxième variante est l'EC sélective qui consiste à enlever prioritairement les arbres de mauvaise qualité, de faible vigueur et les moins prometteurs. Enfin, on trouve l'EC mixte qui rassemble les deux autres variantes (Poulin, 2013). L'application de l'éclaircie commerciale peut être envisagée sous différents modalités et intensités en fonction des objectifs fixés au préalable par les forestiers (Gagné *et al.* 2016 ; Barrette *et al.* 2018).

La modalité d'éclaircie par le haut prévoit la récolte des arbres dans la classe sociale des codominants et parfois des dominants (Smith *et al.* 1997). Cette technique d'éclaircie est utile pour augmenter la quantité de lumière sur la cime des arbres dominants (Bradford et Palik, 2009) et stimuler la croissance des arbres résiduels avec un minimum d'intervention (Smith *et al.* 1997). Ainsi, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) moyen d'une placette éclaircie par le haut est généralement plus petit que le DHP moyen de la même placette avant l'application de l'éclaircie. Du point de vue économique, cette éclaircie réduit les coûts d'exploitation et permet de récolter des arbres de bonnes dimensions et d'obtenir une certaine rentabilité (Eliasson et Lageson, 1999).

De son côté, l'EC par le bas vise principalement à prélever les arbres de petit diamètre, de mauvaise qualité et de faible vigueur (Barrette et Tremblay, 2015 ; Gagné *et al.* 2016). Ainsi, le DHP moyen d'une placette éclaircie par le bas est plus grand que le DHP moyen de la même placette avant l'application du traitement.

Quant à l'éclaircie neutre, elle vise aussi à récolter les arbres de faible vigueur, mais cette fois, dans toutes les classes sociales afin de répartir davantage le potentiel de croissance (Gagné *et al.* 2016).

En effet, la contribution des petits arbres à la suite de l'application du traitement pourrait contribuer à maximiser la croissance du peuplement si la lumière transmise par l'étage dominant est suffisante pour augmenter leur croissance (Smith *et al.* 1997). Le DHP moyen des arbres avant et après l'application de ce type d'éclaircie devrait être équivalent.

Les principales différences entre ces modalités sont les critères de sélection des arbres à prélever. Toutefois, certaines études indiquent que dans les peuplements monospécifiques, la croissance des arbres résiduels a tendance à être similaire, quelle que soit la modalité d'éclaircie (Bradford et Palik, 2009 ; Gagné *et al.* 2016).

### **3.3. Objectifs de l'éclaircie commerciale**

L'objectif de l'application de l'éclaircie commerciale est de réduire la densité de la population pour atténuer la compétition entre les arbres (Bradford *et al.* 2010) pour les ressources environnementales de la station (lumière, eau et éléments nutritifs) (Pelletier et Pitt, 2008 ; Bose *et al.* 2018) et la redistribuer entre les arbres résiduels (Forrester *et al.* 2013 ; Olson *et al.* 2014 ; Barette *et al.* 2018). La réaction de l'éclaircie commerciale peut être observée selon deux échelles, celle de l'arbre et celle du peuplement.

#### **3.3.1. À l'échelle de l'arbre**

L'éclaircie commerciale est appliquée principalement dans le but de favoriser la croissance diamétrale des arbres résiduels (Pelletier et Pitt, 2008 ; Càceres *et al.* 2017 ; Barette *et al.* 2018). Les arbres réagissent généralement à une éclaircie par une augmentation de leur taux de croissance en volume qui peut varier selon la position sociale de l'arbre dans le peuplement (Gagné *et al.* 2012) et selon leur efficacité d'utilisation de la lumière (Bose *et al.* 2018 ; Gupta *et al.* 2020). Plusieurs études ont rapporté l'importance relative de la surface foliaire et de l'efficacité de la croissance (Binkley et Kashian, 2015) dans la détermination de la réaction de la croissance en volume des arbres à l'éclaircie (McDowell *et al.* 2007 ; Omar et MacLean. 2015).

D'une part, la mesure de la surface foliaire (Binkley et Kashian, 2015) ou de la longueur de la cime vivante permet d'expliquer les interactions compétitives, telles que la quantité de lumière interceptée par les arbres (Filipescu et Comeau, 2007), et de tester la contribution des différentes classes de cime dans le mécanisme de croissance en volume des arbres (Berrill et O'Hara, 2007). Généralement, la croissance en diamètre d'un arbre augmente avec la longueur de sa cime vivante (Omari *et al.* 2016).

D'autre part, la mesure de l'efficacité de croissance peut être utilisée à la place du taux d'assimilation net (Omari *et al.* 2016). L'efficacité de croissance correspond au taux de production de bois par unité de biomasse accumulée ou par unité d'une partie productive de la plante telle que la taille de la cime, la biomasse foliaire ou la surface foliaire (McDowell *et al.* 2007 ; Carr *et al.* 2020). L'efficacité de croissance peut être stimulée par l'éclaircie (McDowell *et al.* 2007 ; Omari *et al.* 2016) ou peut rester inchangée (DeRose et Seymour, 2009 ; Omari *et al.* 2016).

### **3.3.2. À l'échelle du peuplement**

À l'échelle du peuplement, l'éclaircie commerciale est appliquée dans l'objectif de régulariser la taille des arbres et la croissance de la forêt (Gupta *et al.* 2020), de maintenir le potentiel de récolte dans les peuplements mûrs (Gagné *et al.* 2012 ; Boivin-Dompierre *et al.* 2017), de réduire la durée de la révolution et le taux de mortalité du peuplement (Smith *et al.* 1997 ; Gupta *et al.* 2020), et d'améliorer la valeur de la population résiduelle et la qualité du bois (Lafèche *et al.* 2013).

Théoriquement, l'éclaircie peut produire une hausse (Barette *et al.* 2018), une baisse (Stewart et Salvail, 2017 ; Gupta *et al.* 2020) ou le maintien (Boivin-Dompierre *et al.* 2017) de la production de bois d'un peuplement par rapport à un peuplement non éclairci. Lorsque la production de bois d'un peuplement résiduel est stimulée par une éclaircie (Barrette et Tremblay, 2015), les trajectoires volumiques des peuplements éclairci et témoin sont convergentes (Boivin-Dompierre *et al.* 2017). Ce résultat peut être observé à partir de l'application d'éclaircies de faible intensité répétées fréquemment sur des stations très productives (Pelletier et Pitt, 2008).

Lorsque la production en bois du peuplement résiduel est similaire à celle d'un peuplement non éclairci, le potentiel de croissance de la station est redistribué entre les arbres résiduels (Pelletier et Pitt, 2008), ce qui permet aux petits arbres résiduels de profiter d'avantage des ouvertures de la canopée que les grands (Moreau *et al.* 2020). Cette situation produit des trajectoires volumiques parallèles entre les peuplements éclairci et non éclairci (Stewart et Salvail, 2017 ; Gupta *et al.* 2020), ce qui est souvent observé dans les monocultures (Barette *et al.* 2018).

Quand la production en bois du peuplement éclairci est inférieure à celle du peuplement non éclairci, les courbes de production des peuplements éclairci et non éclairci sont alors divergentes (Stewart et Salvail, 2017 ; Gupta *et al.* 2020). Cette situation peut être causée par l'incapacité de l'éclaircie à réduire la mortalité des arbres peu productifs (Gupta *et al.* 2020), par l'application tardive du traitement ou par un prélèvement trop important qui mène à une densité insuffisante du peuplement résiduel (Bédard *et al.* 2003 ; Pelletier et Pitt, 2008).

#### **4. Objectifs et hypothèses**

Dans la littérature, les effets de l'application de l'éclaircie commerciale dans les plantations d'épinette blanche sont variés alors qu'on peut constater un manque de documentation sur les modalités d'application des éclaircies et les intensités de prélèvement à choisir. De ce fait, l'objectif général de ce projet est d'évaluer et de comparer la productivité en bois marchand de différentes modalités et intensités d'éclaircies commerciales appliquées dans une plantation d'épinette blanche afin de déterminer le meilleur traitement.

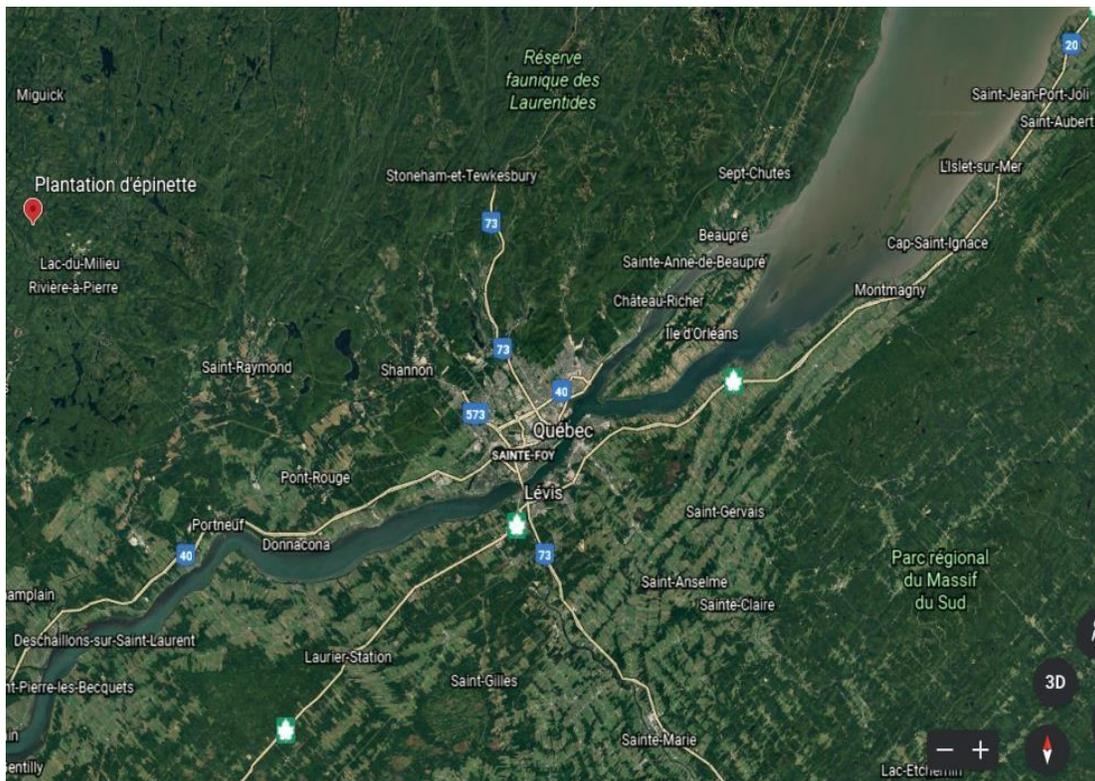
L'atteinte de cet objectif général passera par la réalisation d'objectifs spécifiques. En premier lieu, il s'agit de comparer la productivité à l'hectare des différentes éclaircies. De façon à comprendre la réaction de croissance des peuplements en fonction des éclaircies, le deuxième objectif spécifique vise à analyser la réaction de croissance des arbres individuels en tenant compte de l'environnement compétitif des arbres. Pour atteindre ces sous-objectifs, trois hypothèses ont été formulées.

La première hypothèse est que l'éclaircie commerciale permet de redistribuer le potentiel de croissance entre les arbres résiduels, ce qui conduit à une trajectoire volumique parallèle entre le peuplement éclairci et le peuplement non éclairci, et ce, pour toutes les modalités appliquées. La deuxième hypothèse stipule que l'éclaircie commerciale permet de diminuer davantage l'indice de compétition des petits arbres par rapport aux gros arbres et qu'en conséquence, l'écart d'efficacité de croissance entre arbres éclaircis et témoins augmentera avec une diminution de la taille des arbres. Finalement, la troisième hypothèse est que l'écart de croissance entre les arbres éclaircis et témoins augmente avec l'augmentation de la proportion de la cime vivante des arbres.

# 1. Matériel et méthodes

## 1.1. Station d'étude

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé un dispositif expérimental établi en 2007 par la Direction de la recherche forestière (DRF) du Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec dans une plantation d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) mise en terre en 1987 au nord-ouest de Rivière-à-Pierre (47° 03' 16" N – 72° 15' 45" O – Fig. 1). Cette région fait partie des collines du moyen St-Maurice appartenant au sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest (Saucier *et al.*, 2009). Elle est caractérisée par une forme topographique montagneuse avec des températures mensuelles moyennes variant de -14,6 °C en janvier à 17,3 °C en juillet et des précipitations annuelles moyennes de 1250 mm, dont 31 % sous forme de neige (Raymond et Bédard, 2017).



**Figure 1.** Localisation du dispositif expérimental situé au nord-ouest de Rivière-à-Pierre (Google Earth, 2020)

## 1.2. Dispositif expérimental

La densité initiale de la plantation était de 2900 plants/ha et les arbres ont atteint, à l'âge de 20 ans (juste avant l'application de la première éclaircie), une hauteur dominante de 12 m, un diamètre moyen de 12 cm et une surface terrière moyenne de 27,4 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Le dispositif expérimental est composé de 65 placettes permanentes d'une superficie de 400 m<sup>2</sup> et situées au centre de blocs de 2500 m<sup>2</sup> (50 x50 m) qui ont été disposées de façon complètement aléatoire. Ces 65 placettes correspondent à 5 répétitions de 12 traitements d'éclaircie commerciale et d'un témoin. Ces éclaircies ont été appliquées manuellement à l'aide d'une tronçonneuse et visaient à récolter prioritairement les arbres défectueux et peu vigoureux dans les classes de diamètre correspondant à chaque type d'éclaircie. Les types d'éclaircies sont classés selon trois facteurs (Tableau 1).

Le premier facteur est la période d'application de l'éclaircie. Ce facteur se décline en deux niveaux : une éclaircie hâtive appliquée au printemps de l'année 2008, c'est-à-dire lorsque la plantation avait 20 ans, ou une éclaircie tardive appliquée au printemps de l'année 2013 – c'est-à-dire à l'âge de 25 ans. Le deuxième facteur est le mode d'application de l'éclaircie qui est soit par le haut, par le bas ou neutre. Le troisième facteur est l'intensité de prélèvement des éclaircies qui ont été appliquées, c'est-à-dire 20 ou 33 % de la surface terrière initiale. De plus, les 30 placettes ayant subi une éclaircie hâtive au printemps 2008 ont été traitées une deuxième fois de la même façon au printemps de l'année 2018, c'est-à-dire à l'âge de 30 ans.

**Tableau 1.** Pourcentage de prélèvement en surface terrière visé pour chaque traitement d'éclaircie commerciale

période	Tardive (2013)						Hâtive (2008, 2018)					
	Bas		Haut		Neutre		Bas		Haut		Neutre	
Intensité	20%	33%	20%	33%	20%	33%	20%	33%	20%	33%	20%	33 %

### 1.3. Prises de mesures et compilation des données

Tous les arbres à l'intérieur des placettes ont été numérotés et mesurés avant l'application des éclaircies, puis inventoriés à nouveau immédiatement après l'application des éclaircies et à tous les cinq ans par la suite. L'inventaire consistait à déterminer l'état des arbres (mort ou vivant) et à mesurer le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ( $\pm 0,1$  cm). De plus, en 2021, la hauteur totale et la longueur de la cime vivante ( $\pm 0,1$  m) de chaque arbre ont été mesurées à l'aide d'un hypsomètre Haglof Vertex.

Le volume marchand de chaque arbre a été estimé en utilisant le tarif de cubage de Prégent *et al.* (2010 – Équation 1). Puisque la hauteur de tous les arbres n'a été mesurée qu'en 2021, une régression linéaire établie entre le DHP et la hauteur des arbres en 2021 a été calculée pour chaque traitement et ces relations ont ensuite été utilisées pour estimer le volume des arbres aux années 2007, 2012 et 2021.

$$V = \beta_1 D^{\beta_2} H^{\beta_3} P \quad [1]$$

où  $V$  est le volume marchand ( $\text{dm}^3$ ),  $D$  est le DHP (cm) de l'arbre,  $H$  est sa hauteur totale (m),  $\beta_1 = 0,0592$ ,  $\beta_2 = 1,8353$ ,  $\beta_3 = 1,0266$ , et  $P$  est la proportion du volume à un diamètre d'utilisation minimal de 9 cm ( $d$ ) avec :

$$P = \alpha_0 + \alpha_1 \left(\frac{d}{D}\right) + \alpha_2 \left(\frac{d}{D}\right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{d}{D}\right)^3 + (\alpha_4)I_a \left(\frac{d}{D} - a\right)^3 + (\alpha_5)I_b \left(\frac{d}{D} - b\right)^3 + (\alpha_6)I_c \left(\frac{d}{D} - c\right)^3 \quad [2]$$

$$\text{où } I_a = \begin{cases} 0, & d/D \leq a \\ 1, & d/D > a \end{cases}$$

$$I_b = \begin{cases} 0, & d/D \leq b \\ 1, & d/D > b \end{cases}$$

$$I_c = \begin{cases} 0, & d/D \leq c \\ 1, & d/D > c \end{cases}$$

Les coefficients sont ;  $d=9$ ,  $\alpha_0=0,9993$ ,  $\alpha_1=0,0169$ ,  $\alpha_2=-0,1151$ ,  $\alpha_3=-0,1691$ ,  $\alpha_4=-0,5561$ ,  $\alpha_5=-0,8694$ ,  $\alpha_6=-1,7024$ ,  $a=0,2$ ,  $b=0,5$ ,  $c=0,7$

### 1.3.1. Indice de compétition

Le degré de compétition entre les arbres de chaque placette a été évalué à l'aide d'un indice de compétition indépendant de la distance ( $IC$ ) (Tomé et Burkhardt 1989). Cet indice a été choisi parce qu'il a été utilisé avec succès dans le cas de la croissance des sapins baumiers éclaircis et non éclaircis (Boivin-Dompierre *et al.* 2017).

$$IC = \frac{1}{\left(\frac{10000}{N}\right) \times \left(\frac{g}{\bar{g}}\right)} \quad [3]$$

où  $g$  est la surface terrière de l'arbre sujet ( $\text{cm}^2$ ),  $\bar{g}$  est la surface terrière moyenne des arbres ( $\text{cm}^2$ ) et  $N$  est le nombre d'arbres par hectare.

### 1.3.2. Accroissement relatif en volume marchand

La croissance relative annuelle en volume marchand de chaque arbre a été estimée en faisant la différence entre les inventaires de 2021 et de 2017 à l'aide de l'équation 4.

$$RVMI = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1}\right) \left(\frac{1}{T_2 - T_1}\right) \quad [4]$$

où  $RVMI$  est la croissance relative en volume marchand,  $V_2$  et  $V_1$  sont respectivement les volumes marchands de 2021 ( $T_1$ ) et 2017 ( $T_2$ ).

### 1.3.3. Efficacité de croissance de l'arbre

L'efficacité de croissance, c'est-à-dire la quantité de bois produite par unité de surface foliaire et par unité de temps, de chaque arbre a été estimée à partir de l'équation de Omari *et al.* (2016) :

$$GE = \left(\frac{V_2 - V_1}{SF_2}\right) \left(\frac{1}{T_2 - T_1}\right) \quad [6]$$

où  $GE$  est l'efficacité de croissance d'un arbre ( $\text{dm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ),  $SF_2$  est la surface foliaire de l'arbre en 2021,  $V_2$  et  $V_1$  sont respectivement les volumes marchands de 2017 ( $T_1$ ) et 2021 ( $T_2$ ).

#### 1.3.4. Surface foliaire des arbres

La surface foliaire de chaque arbre a été estimée dans le but de calculer l'efficacité de la croissance des arbres individuels (en  $\text{dm}^3$  de bois  $\text{m}^{-2}$  de feuille  $\text{année}^{-1}$ ) et d'expliquer la contribution des arbres de chaque classe sociale à la croissance totale des peuplements. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur l'équation de Power *et al.* (2014) :

$$SF = b_1 D^{b_2} H^{b_3} C^{b_4} \quad [5]$$

où  $SF$  est la surface foliaire ( $\text{m}^2$ ),  $D$  est son DHP (cm),  $H$  est sa hauteur totale (m),  $C$  est la longueur de sa cime (m),  $b_1 = 0,115$ ,  $b_2 = 2,647$ ,  $b_3 = -1,230$ , et  $b_4 = 0,383$ .

#### 1.4. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec la programmation statistique de R (version 2020, 2.0.4), en utilisant le module nlme (Pinheiro et Bates, 2000) avec un seuil de signification  $\alpha=0,05$ . La normalité et l'homoscédasticité des données ont été vérifiées par une analyse graphique à l'aide des fonctions plot, qqnorm et qqline, leur indépendance par la distance de Cook, leur influence par le test de Levier et leur colinéarité par la fonction VIF (Variance Inflation Factor) de R. Lorsqu'une analyse de variance indiquait que les niveaux d'un facteur montraient des différences significatives, le test de comparaisons multiples de Tukey a été utilisé afin d'identifier les différences significatives entre les moyennes.

Un premier modèle mixte, à l'échelle du peuplement, a utilisé l'accroissement en volume marchand à l'hectare comme variable réponse, le traitement comme variable explicative fixe et les placettes comme variable explicative aléatoire. La variable explicative « traitement » inclut la période, l'intensité et le type d'éclaircie de même que le témoin. Lorsque les résultats statistiques du modèle indiquaient des différences significatives entre les niveaux du traitement, ce facteur a été subdivisé en trois groupes de traitement qui correspondent aux périodes d'application des éclaircies (hâtive 2008, hâtive 2018 et tardive 2013). Chaque groupe comprend les différents niveaux du traitement, c'est-à-dire l'intensité (2 niveaux) et le type (3

niveaux) d'éclaircie en plus du témoin. Ces analyses ont été réalisées dans le but de déterminer si les trajectoires temporelles de volume marchand associées à chaque traitement étaient différentes entre elles (hypothèse 1). Ensuite, la mortalité à l'échelle du peuplement a été analysée en la mettant en relation avec les traitements, les années de mesurages et l'interaction entre ces deux variables et les placettes comme variable aléatoire.

À l'échelle de l'arbre, deux analyses statistiques ont été effectuées en utilisant un modèle linéaire mixte. La première analyse consistait à appliquer un même modèle à quatre variables réponses : l'indice de compétition, la croissance relative en volume marchand des arbres, l'efficacité de la croissance et la production en surface foliaire des arbres. Les variables explicatives fixes de ce modèle sont les traitements, le diamètre de l'arbre et l'interaction entre le diamètre et les traitements, alors que les placettes ont été utilisées comme variable aléatoire. La significativité de l'interaction entre le DHP et les traitements indiquera si l'écart de croissance entre les traitements varie en fonction du DHP (hypothèse 2), et l'intervalle de confiance associé à chaque traitement indiquera quels traitements provoquent une croissance supérieure aux autres.

La deuxième analyse visait à expliquer l'écart de croissance entre les arbres éclaircis et non éclaircis. Le modèle utilisé a mis en relation la croissance en volume marchand des arbres comme variable réponse et la proportion de cime vivante, les traitements d'éclaircie et l'interaction entre ces deux variables comme variables explicatives. Cette analyse a permis de tester l'hypothèse 3.

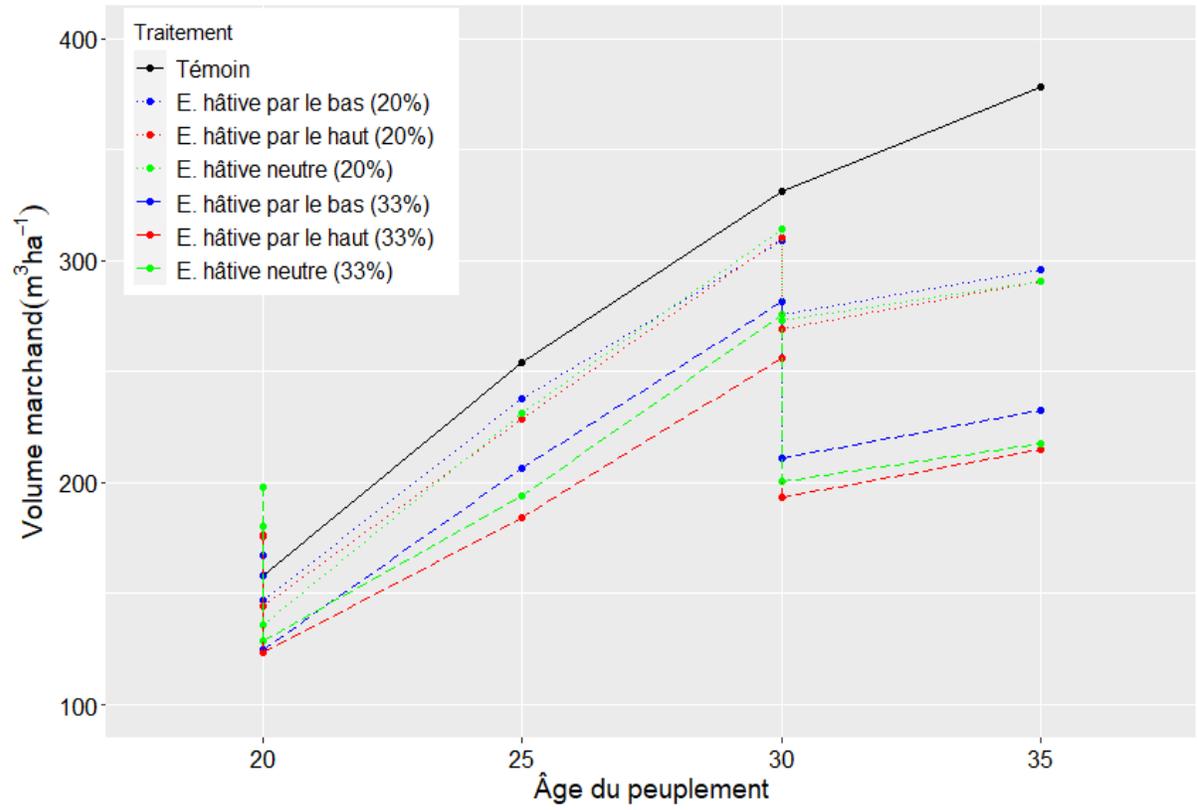
## 2. Résultats

### 2.1. Échelle du peuplement

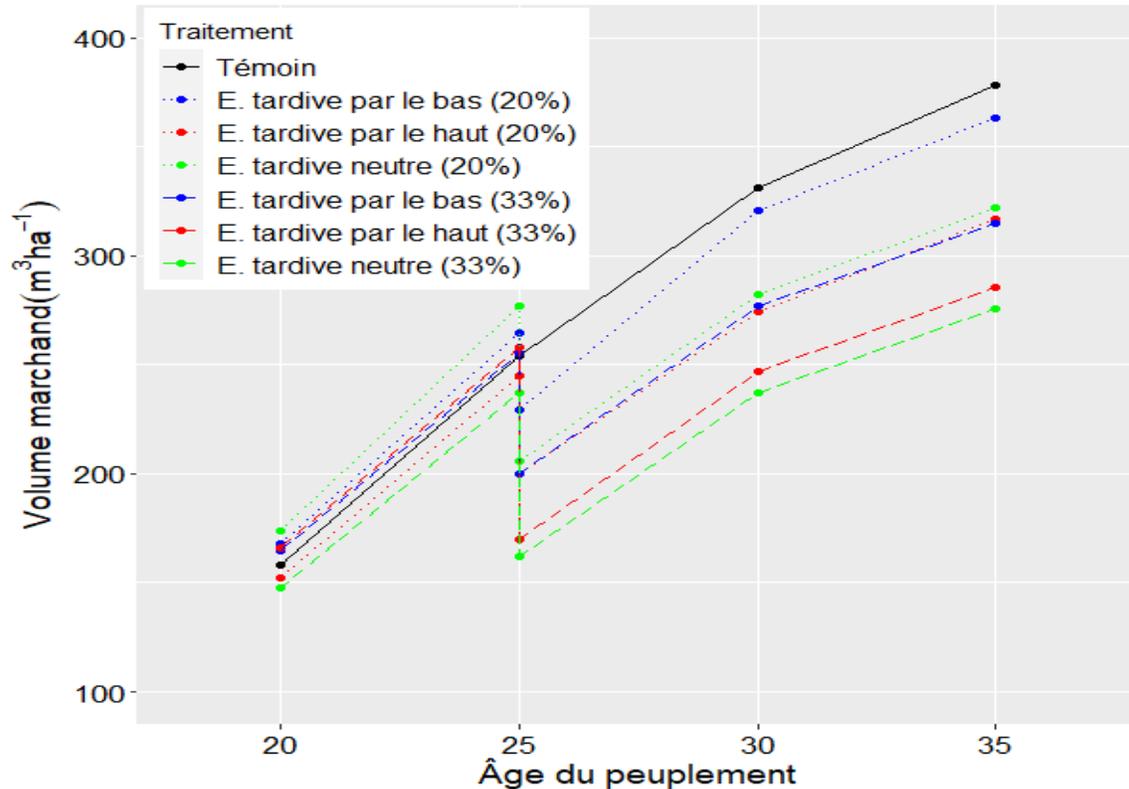
À l'âge de 20 ans, avant l'application de la première éclaircie commerciale, tous les traitements avaient une production en bois marchand statistiquement égale ( $p=0,09$ ).

Après l'application de la première éclaircie hâtive à l'âge de 20 ans, on remarque que les trois traitements de faible intensité (20 %) et le témoin ont suivi des trajectoires parallèles jusqu'à 30 ans, donc des accroissements en volume moyen statistiquement égaux pour les modalités par le haut ( $p=0,45$ ), par le bas ( $p=0,09$ ) et neutre ( $p=0,21$ ) (Fig. 2). L'effet de l'éclaircie est bien présent chez les traitements de forte intensité (33 %) qui ont suivi des trajectoires divergentes de celle du témoin avec des accroissements en volume moyen inférieurs pour les parcelles éclaircies par le haut ( $p=0,001$ ), par le bas ( $p=0,001$ ) et neutre ( $p=0,03$ ) (Fig. 2). Cinq ans après l'application de la deuxième éclaircie hâtive (de 30 à 35 ans), les trajectoires de volume marchand de l'ensemble des traitements d'éclaircie ont divergé davantage par rapport à ceux des témoins ( $p=0,001$ ) (Fig. 2).

En ce qui concerne les éclaircies tardives, tous les traitements ont présenté des trajectoires volumiques parallèles à celle des témoins avec des accroissements en volume moyen statistiquement égaux ( $p=0,16$ ) (Fig. 3).



**Figure 2.** Changement temporel en volume marchand pour chaque modalité d'éclaircie hâtive



**Figure 3.** Changement temporel en volume marchand pour chaque modalité d'éclaircie tardive

L'analyse de la mortalité à l'échelle du peuplement a montré que l'ensemble des éclaircies commerciales appliquées n'ont pas eu d'effet significatif sur la réduction de la mortalité des arbres au fil des années ( $p > 0,05$ ) (TAB. 2).

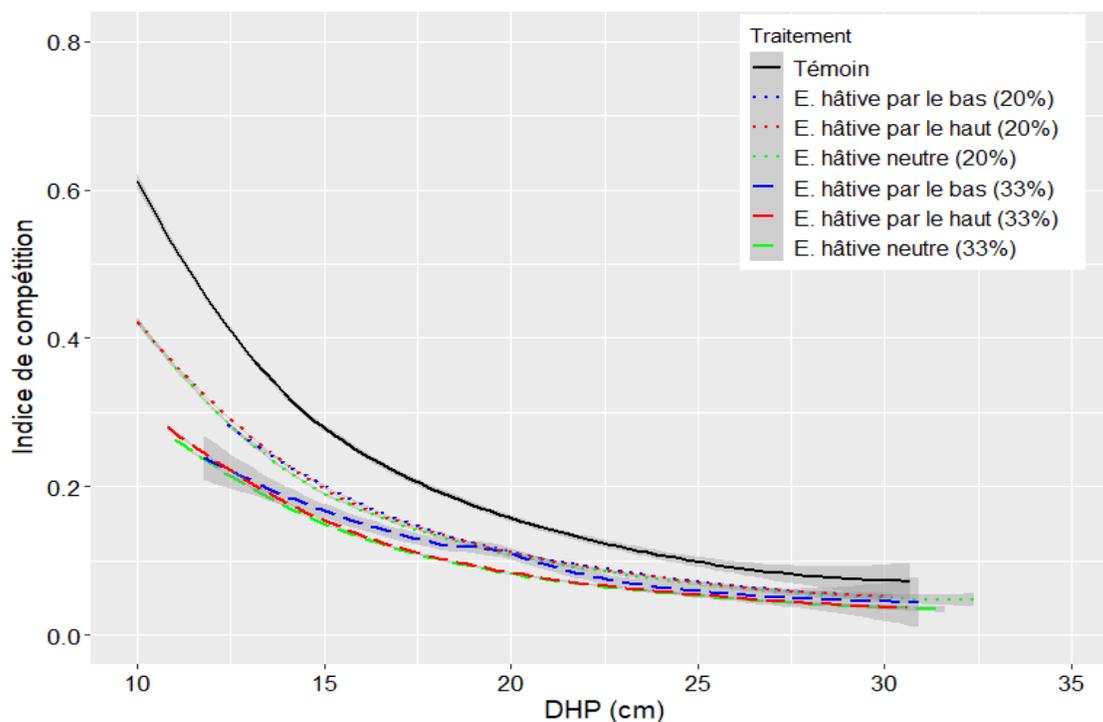
**Tableau 2.** Mortalité ( $m^3/ha$ ) en fonction des traitements d'éclaircie

Traitements	Témoin		Éclaircies hâtives		Éclaircies tardives	
	moyenne	p	moyenne	p	moyenne	p
2012	0,28±0,11	0,018	0,04	0,62	0,012	0,22
2017	0,36±0,14	0,01	0,39± 0,22	0,39	0,22 ±0,22	0,89
2021	0,026	0,008	0,15 ±0,10	0,17	0,27 ±0,11	0,80

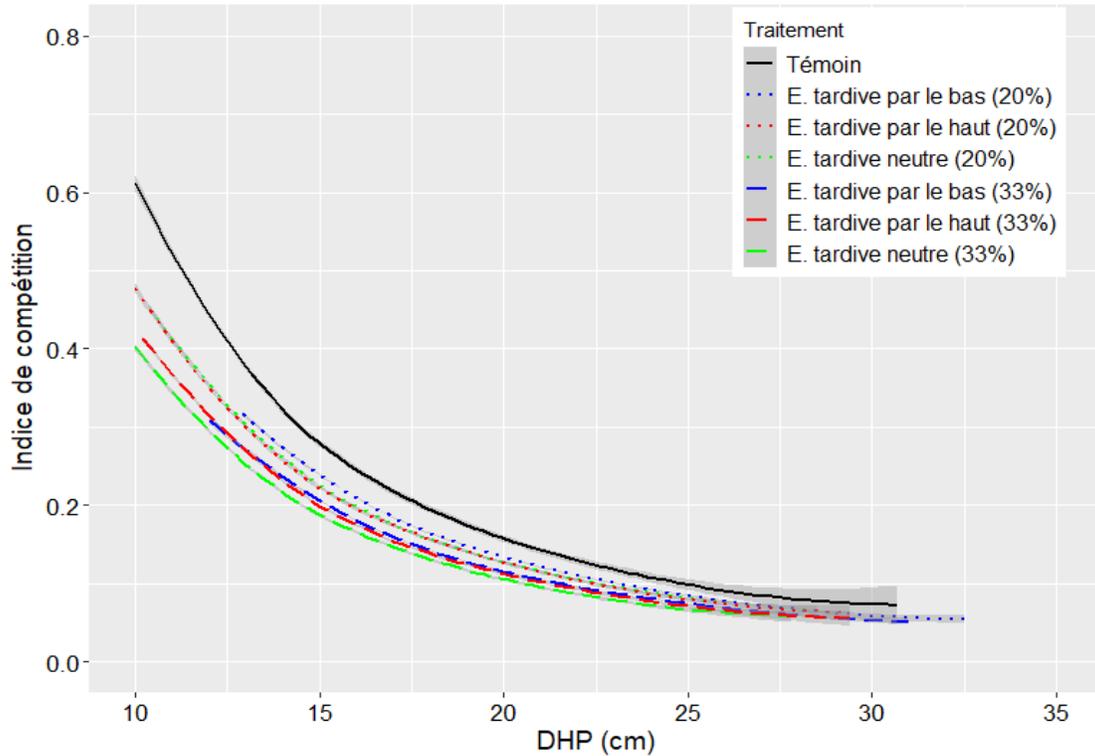
NB : P : la probabilité d'obtenir un résultat égal ou plus extrême que ce qui a été effectivement observé dans les données.

## 2.2. Échelle de l'arbre

L'indice de compétition, calculé à partir des données de l'inventaire de 2021, était significativement plus faible dans les parcelles éclaircies que dans les témoins ( $p=0,001$ ). De plus, l'interaction entre le diamètre de l'arbre et les traitements était significativement positive ( $p=0,001$ ), ce qui indique que l'effet de la réduction de la compétition est plus accentué chez les petits arbres des placettes éclaircies par rapport aux témoins (Fig. 4 et 5). Ces différences ont été observées autant pour les éclaircies hâtives (Fig. 4) que pour les éclaircies tardives (Fig. 5).

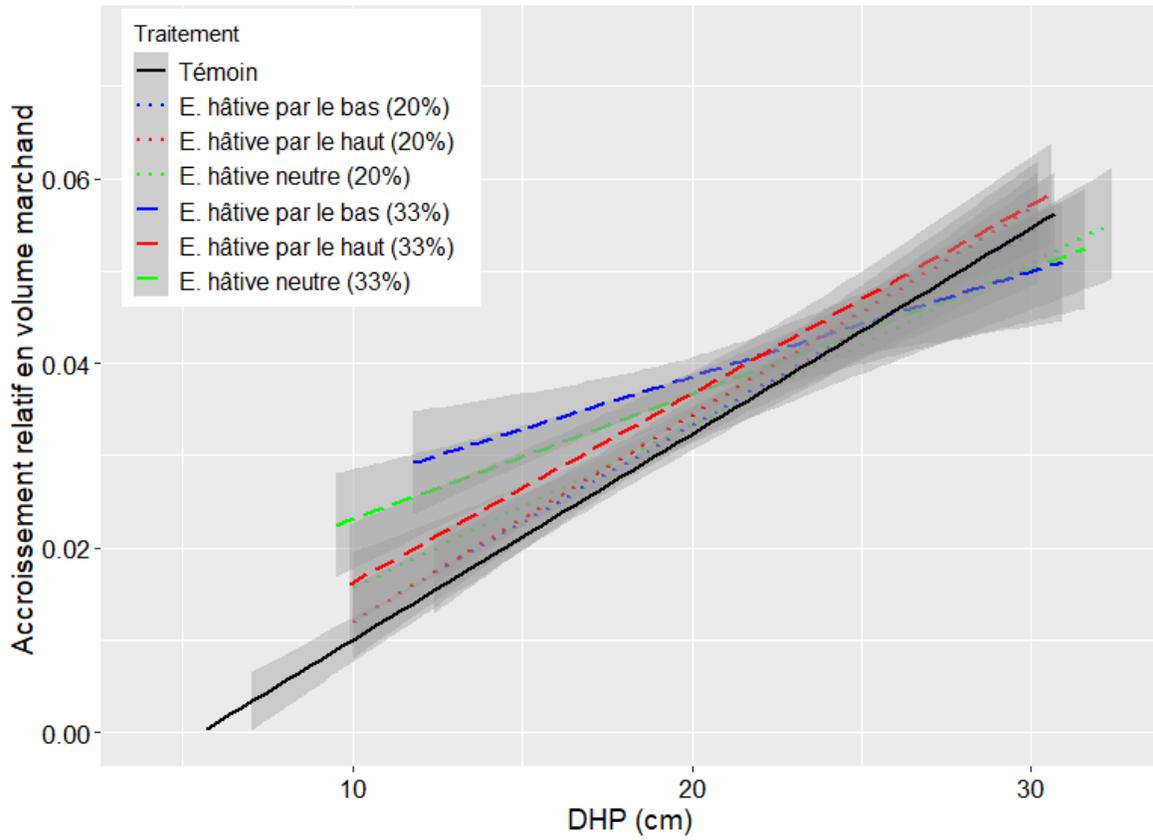


**Figure 4.** Indice de compétition en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie hâtive

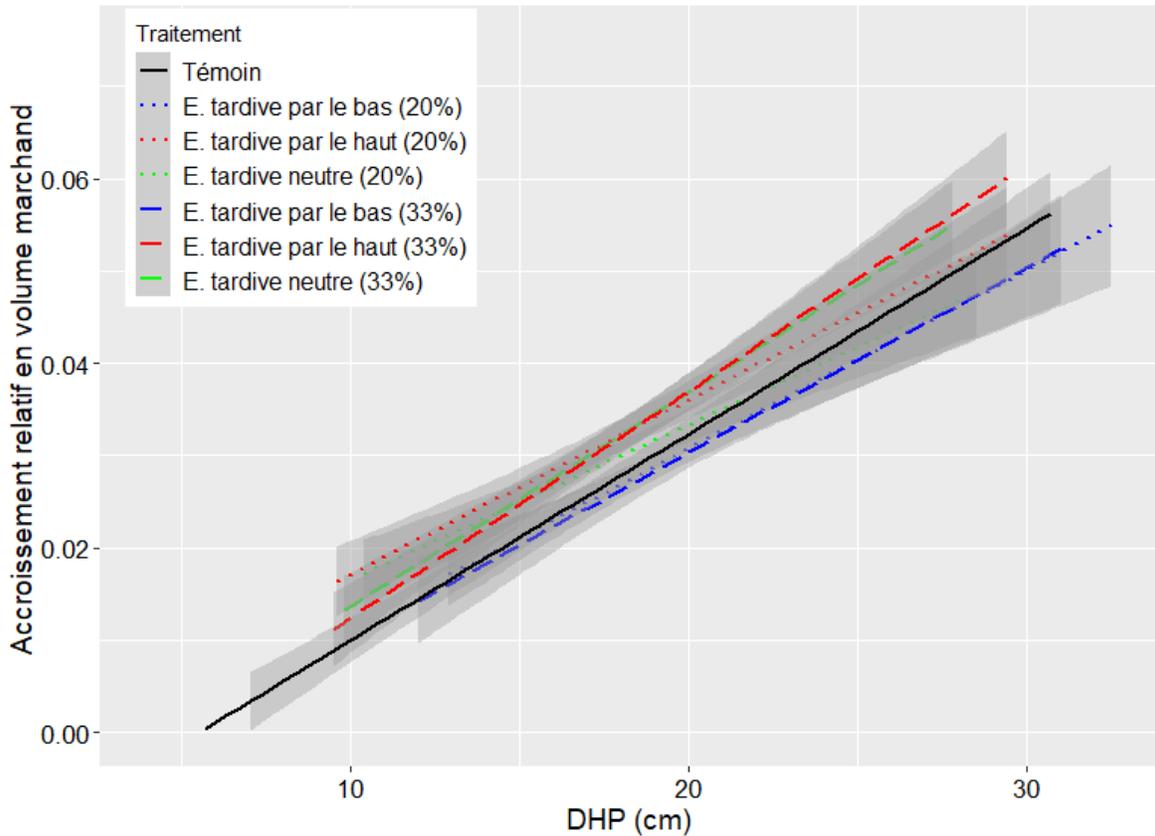


**Figure 5.** Indice de compétition en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie tardive

L'effet de la réduction de la compétition entre les arbres semble être à la source de différences de croissance relative en volume marchand entre les traitements. En effet, les éclaircies ont généralement stimulé la croissance relative en volume marchand des arbres éclaircis par rapport aux témoins (Fig. 6 et 7) ( $p=0,01$ ), et ce, particulièrement pour les arbres de petit diamètre et ayant subi l'éclaircie hâtive (Fig. 6).

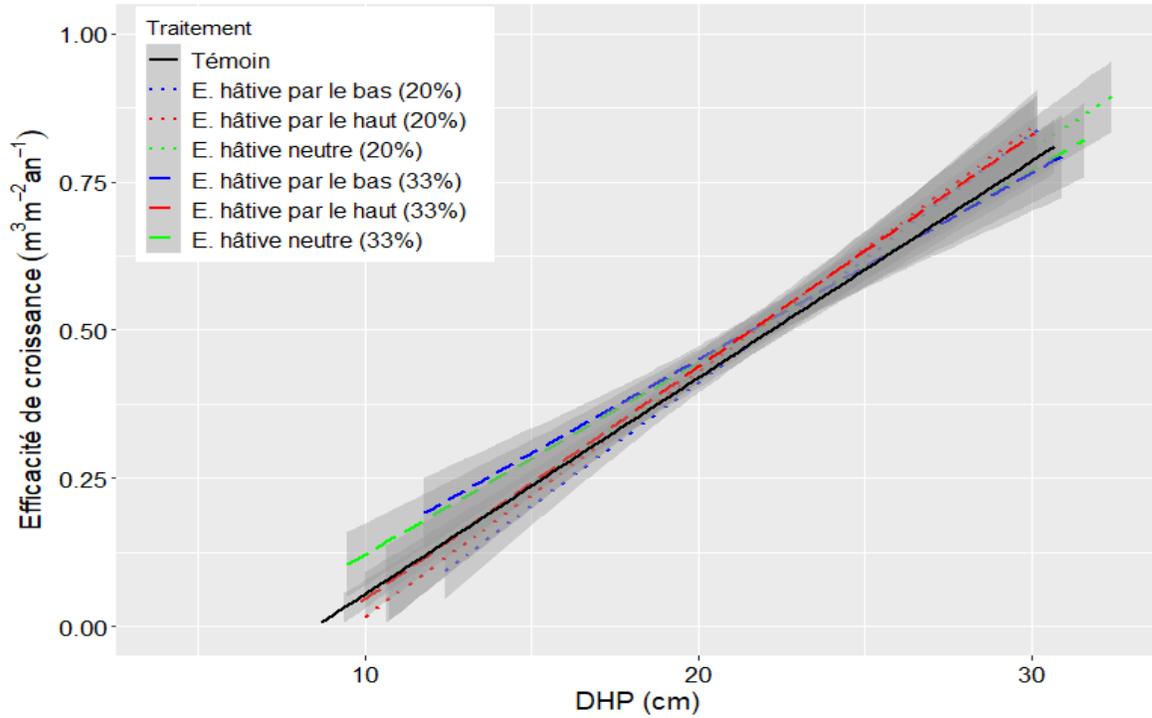


**Figure 6.** Accroissement relatif en volume marchand en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie hâtive

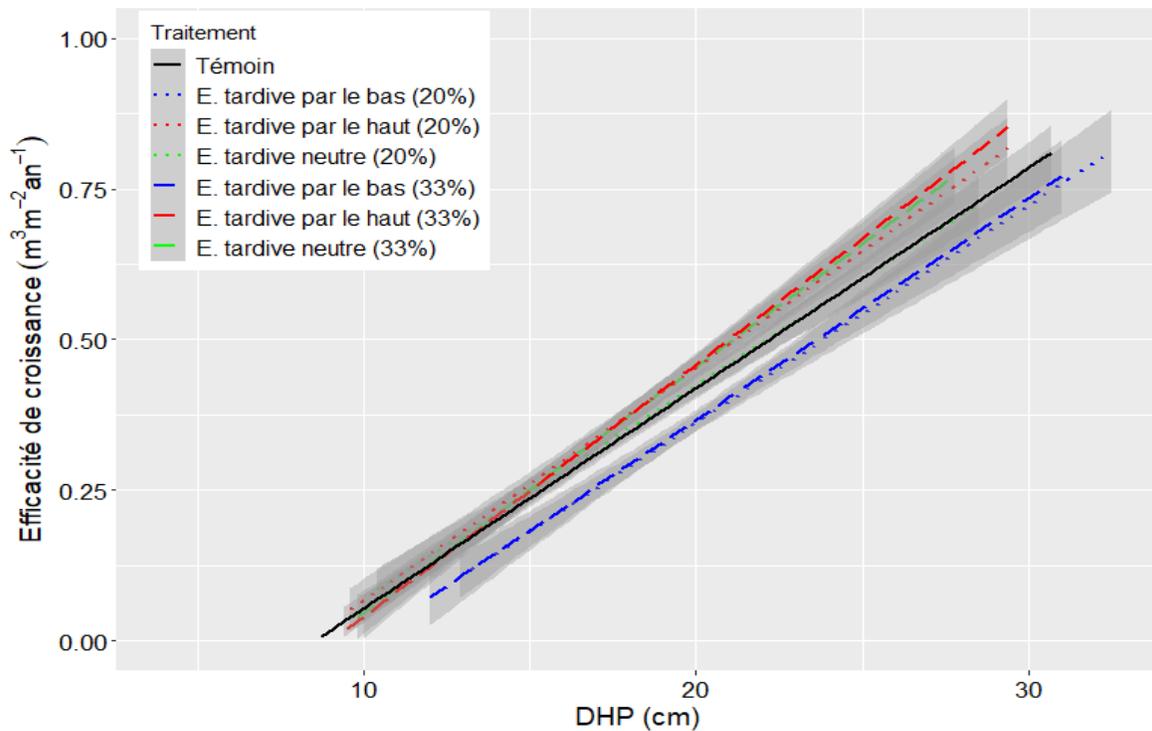


**Figure 7.** Accroissement relatif en volume marchand en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie tardive

Pour expliquer la hausse de croissance relative en volume marchand des petits arbres éclaircis, nous avons exploré le rôle joué par deux de leurs composantes fonctionnelles, soit l'efficacité de croissance des arbres et leur surface foliaire. En ce qui concerne l'efficacité de croissance, l'interaction entre le diamètre des arbres et les traitements était significative ( $p= 0,01$ ) et se rapprochait des résultats de la croissance relative en volume, mais de façon moins accentuée (Fig. 8 et 9).

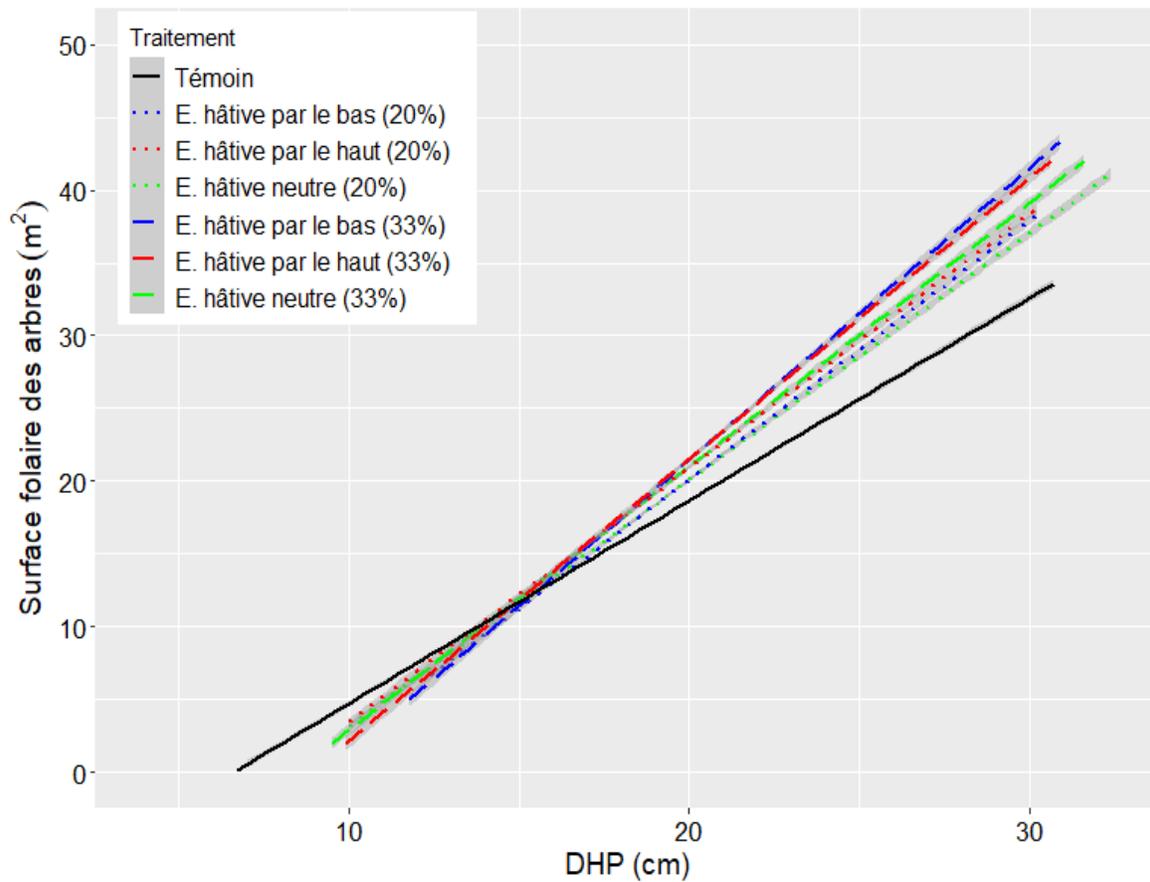


**Figure 8.** Efficacité de croissance en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie hâtive

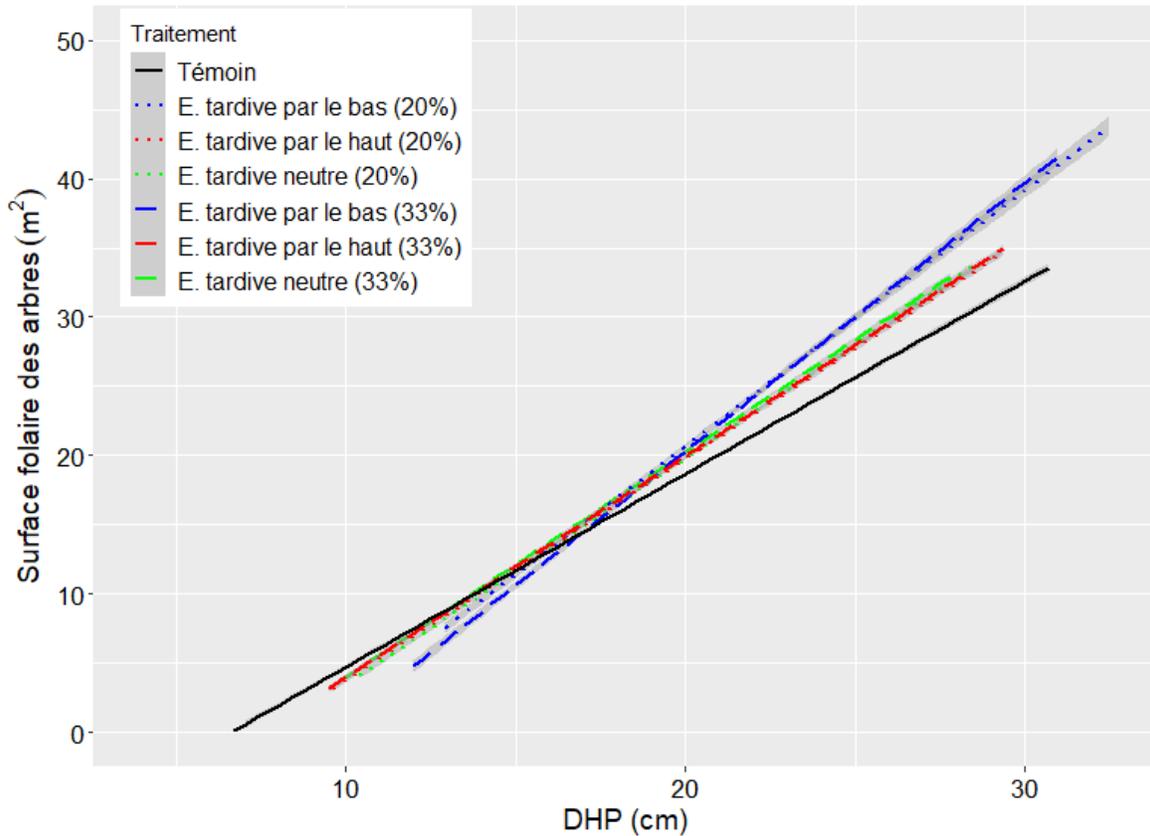


**Figure 9.** Efficacité de croissance en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie tardive

De son côté, la surface foliaire des arbres a été statistiquement stimulée par les éclaircies appliquées ( $p= 0,0001$ ), mais son effet est surtout apparent chez les arbres éclaircis des étages dominants et codominants (Fig. 10 et 11).

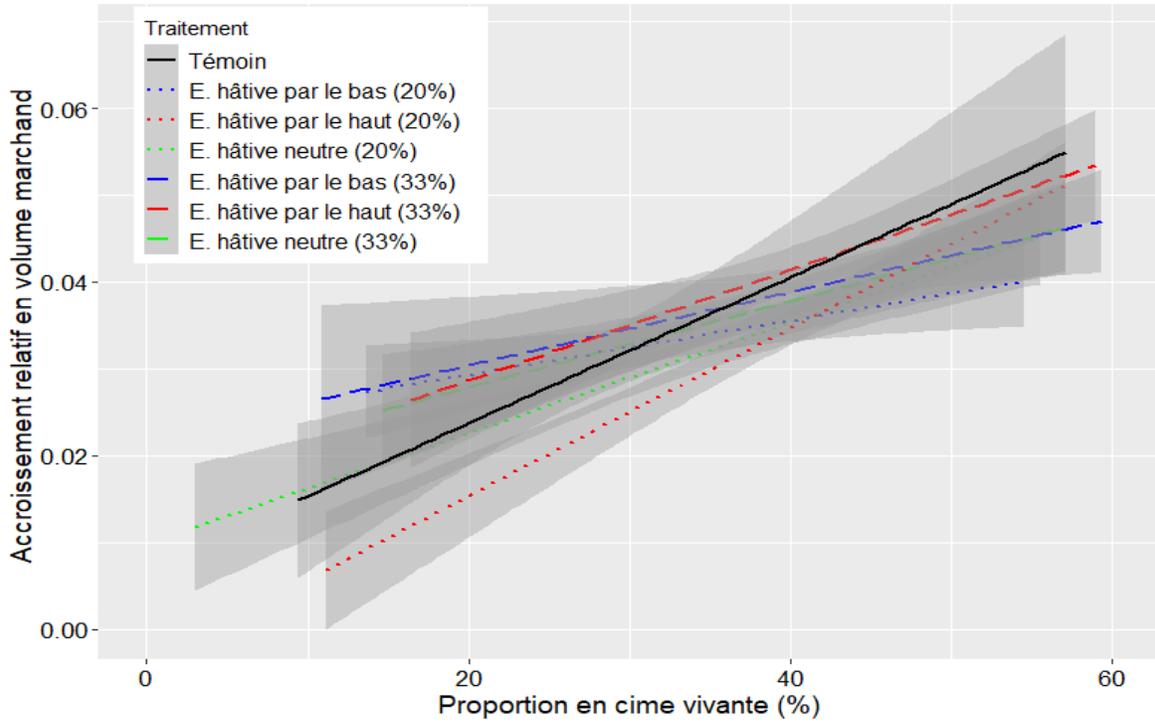


**Figure 10.** Surface foliaire en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie hâtive

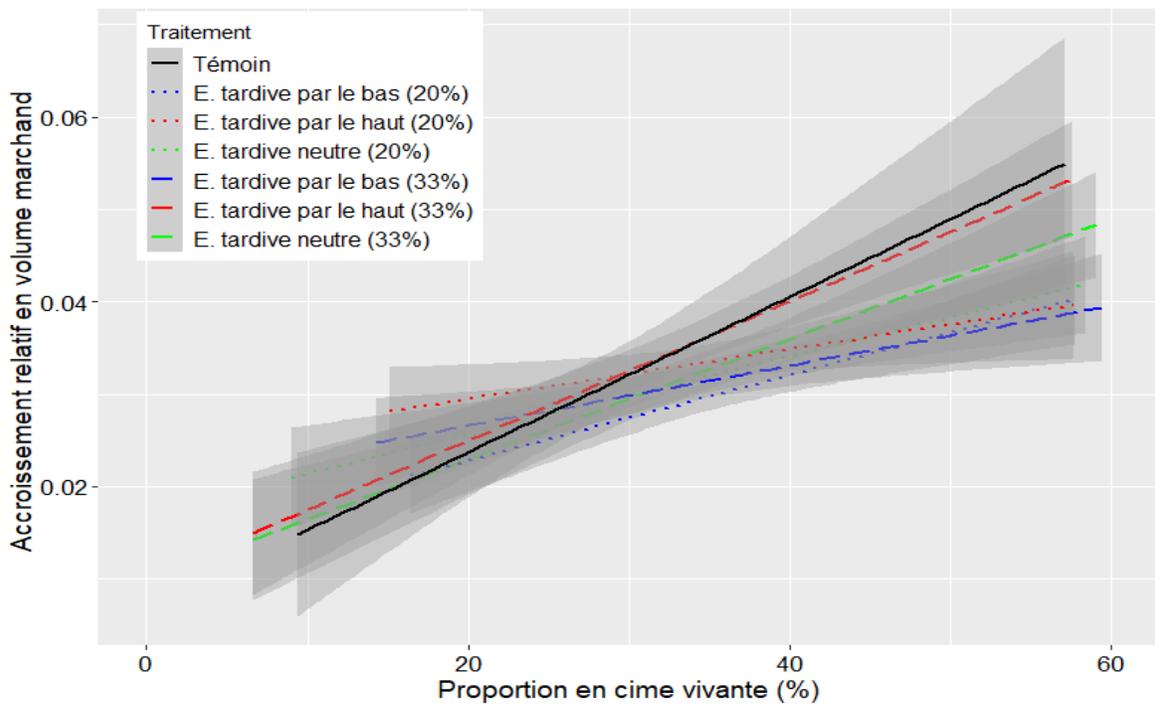


**Figure 11.** Surface foliaire en fonction du DHP et des traitements d'éclaircie tardive

Finalement, nous avons déterminé l'influence de la proportion de la cime vivante sur la croissance relative en volume marchand des arbres traités et non traités. Les résultats statistiques montrent que l'accroissement relatif en volume augmente avec une augmentation de la proportion de la cime vivante ( $p= 0,02$ ) (Fig. 12 et 13). Toutefois, l'interaction entre les traitements et la proportion de cime des arbres est non significative ( $p= 0,09$ ). Ceci signifie que l'influence de la proportion de la cime vivante sur l'accroissement relatif en volume est statistiquement la même pour tous les traitements, y compris les témoins.



**Figure 12.** Accroissement relatif en volume marchand en fonction de la proportion en cime vivante et des traitements d'éclaircie hâtive



**Figure 13.** Accroissement relatif en volume marchand en fonction de la proportion en cime vivante et des traitements d'éclaircie tardive

### 3. Discussion

Les peuplements étudiés étaient de structure équiennne et la variabilité intra-peuplement était très faible. Les résultats de notre analyse statistique sur la réaction de l'épinette blanche ont montré que la croissance des arbres de petite taille est améliorée après une éclaircie commerciale, quelles que soient la modalité d'application et l'intensité de prélèvement. Cependant, cette augmentation a varié selon le temps écoulé depuis la première application du traitement.

#### 3.1. Effet de l'éclaircie commerciale à l'échelle du peuplement

Dans les plantations monospécifiques, l'éclaircie commerciale produit généralement un peuplement ayant une production en volume de bois marchand similaire à celle des placettes témoins (Stewart et Salvail, 2017 ; Gupta *et al.* 2020). En lien avec cet énoncé, nous avons posé l'hypothèse que l'éclaircie commerciale permet de redistribuer le potentiel de croissance entre les arbres résiduels, ce qui conduit à une trajectoire volumique parallèle entre le peuplement éclairci et le peuplement non éclairci, et ce, pour toutes les modalités appliquées. Cette hypothèse a été partiellement appuyée par les résultats statistiques. L'accroissement volumique des peuplements éclaircis était soit similaire soit inférieur à celui du peuplement témoin.

Cette différence d'accroissement est causée principalement par la variation de l'intensité de prélèvement par rapport à la surface terrière initiale. L'application de l'éclaircie commerciale à 20 % de prélèvement a maintenu un accroissement en volume marchand similaire entre les placettes éclaircies et non traitées (trajectoires volumiques parallèles) (Fig. 2, Fig. 3). Cependant, la forte intensité de prélèvement (33 %) a causé une baisse de la croissance en volume marchand comme l'indique la trajectoire volumique des placettes traitées qui s'éloigne de celle des placettes non traitées (Fig. 2). Ce résultat est cohérent avec les réactions obtenues pour l'épinette blanche (Wagle *et al.* 2022) de même que quatre autres espèces résineuses (Bose *et al.* 2018) aux États-Unis à la suite de l'application d'éclaircies commerciales de faibles et de fortes intensités.

Bien que la disponibilité des ressources pour les arbres résiduels soit plus grande après une éclaircie prélevant 33 % de la surface terrière initiale, la suppression d'environ 20 % de la surface terrière initiale est efficace pour un meilleur partage et une exploitation optimale des ressources de la station entre les arbres résiduels. En effet, la forte intensité a probablement conduit à la création d'un plus grand nombre de trouées ou de trouées de plus grande taille, ce qui a possiblement mené à une sous-utilisation du potentiel de croissance de la station (Moreau *et al.* 2020 ; Wagle *et al.* 2022).

L'application de la deuxième éclaircie hâtive a provoqué un écart important de trajectoire volumique entre les placettes éclaircies et non éclaircies. Comme mentionné par Dupont-Leduc *et al.* (2020), il est possible que le plein avantage de l'éclaircie ne puisse être observé qu'au-delà de 10 ans après l'application de l'éclaircie commerciale. De même, Wagle *et al.* (2022) ont aussi remarqué que les avantages de l'éclaircie se concrétisent à partir de la 16<sup>ième</sup> année après son application. Ainsi, il aurait été préférable de retarder l'application de la deuxième éclaircie au-delà de 10 ans pour que la première éclaircie ait eu le temps d'augmenter de façon marquée le rendement en bois marchand à l'hectare (Dupont-Leduc *et al.* 2020).

La modalité d'éclaircie n'a pas été une variable prédictive importante pour expliquer la variation de l'accroissement en volume marchand à l'échelle du peuplement, probablement en raison de la courte période d'observation (10 ans). Donc, prélever les arbres de différentes classes sociales a produit un accroissement semblable en volume de bois marchand. Ce résultat est similaire aux résultats de Dupont-Leduc *et al.* (2020).

Un autre effet présumé de l'application de l'éclaircie commerciale est la réduction de la mortalité (Qu *et al.* 2022). Cette baisse de mortalité est le résultat du prélèvement des arbres peu vigoureux et susceptibles de mourir par l'effet de la compétition en plus d'être sensibles aux attaques des ravageurs et d'agents pathogènes (Smith *et al.* 1997 ; Pelletier et Pitt, 2008 ; Boivin-Dompierre *et al.* 2017 ; Wagle *et al.* 2022).

Les résultats de notre analyse de la mortalité à l'échelle du peuplement ont montré que le traitement d'éclaircie n'a pas diminué significativement la mortalité. En effet, la mortalité était déjà faible dans les placettes témoins probablement parce que la plantation d'épinette était jeune. Ainsi, il a été difficile pour les éclaircies de se démarquer des témoins en termes de mortalité (Tableau 2).

### **3.2. Effet de l'éclaircie commerciale à l'échelle de l'arbre**

L'épinette blanche est une espèce ligneuse de tolérance intermédiaire à l'ombre (Bérubé-Deschênes *et al.* 2017). Ainsi, une forte compétition entre les arbres limite la croissance des arbres, particulièrement les petits arbres non éclaircis à cause de la présence d'arbres de grande taille autour d'eux (Gagné *et al.* 2012). Ceci peut être expliqué par le fait que les grands arbres occupent le haut de la canopée et peuvent intercepter plus de lumière et ont accès à plus de ressources du sol que les arbres de taille inférieure. L'application d'une éclaircie devrait réduire la compétition et maintenir ou améliorer le taux de croissance des arbres des classes sociales inférieures, ou les empêcher de décliner aussi rapidement qu'ils le feraient sans intervention (Smith *et al.* 1997).

C'est dans ce contexte que nous avons émis notre deuxième hypothèse qui postule que l'éclaircie commerciale permet de diminuer davantage l'indice de compétition des petits arbres par rapport à celui des gros arbres. En conséquence, l'écart d'efficacité de croissance entre les arbres éclaircis et témoins devrait augmenter avec une diminution de la taille des arbres. Cette hypothèse est appuyée par une diminution de l'indice de compétition des arbres éclaircis par rapport aux arbres non éclaircis, et ce, particulièrement pour les petits arbres (Fig. 4 et 5).

De plus, comme déjà observé par Qu *et al.* (2022), les petits arbres résiduels ont davantage bénéficié des ouvertures de la canopée que les grands arbres. Ainsi, on peut supposer que la compétition entre les arbres était asymétrique à la taille avant l'application de l'éclaircie, c'est-à-dire que les gros arbres avaient accès à une quantité disproportionnée des ressources et, à l'inverse, que les petits arbres avaient accès à une quantité limitée des ressources (Pothier, 2017).

Après l'application des éclaircies, surtout celles à 33 %, davantage de ressources étaient disponibles pour les petits arbres, ce qui a fait augmenter leur croissance alors que le mode de compétition entre les arbres devenait de plus en plus symétrique à la taille.

Ainsi, la réduction de la compétition pour les petits arbres éclaircis a eu pour effet d'augmenter leur accroissement relatif en volume marchand par rapport aux témoins alors que celui des grands arbres était semblable aux arbres témoins (Fig. 6 et 7). Ces résultats concordent avec les résultats des travaux de Pelletier et Pitt (2008), Bose *et al.* (2018) et Moreau *et al.* (2020). Cette augmentation est surtout perceptible chez les arbres ayant bénéficié d'une intervention hâtive. En effet, les arbres ayant subi les éclaircies tardives ont moins réagi que ceux des éclaircies hâtives probablement parce que les arbres des éclaircies hâtives ont bénéficié de 15 ans de croissance après la première éclaircie alors que ceux des éclaircies tardives ont bénéficié de 10 ans après la première éclaircie.

La réaction des petits arbres à la suite de l'application des éclaircies se manifeste aussi par une meilleure production de bois marchand par unité de surface foliaire. En effet, l'écart d'efficacité de croissance est légèrement plus grand entre les petits arbres traités et témoins (Fig. 8 et 9) surtout pour les arbres ayant subi une éclaircie hâtive. Cela signifie que les petits arbres résiduels ont augmenté leur investissement en bois marchand dans le tronc (Waring et Schlesinger, 1985) plutôt que d'allouer les ressources carbonées à la production de feuillage (Qu *et al.* 2022). Donc, on peut avancer qu'à court et moyen termes, la réaction des petites épinettes blanches face à l'application des éclaircies se manifeste par une augmentation de l'efficacité de leurs feuilles à produire du bois marchand comme l'ont déjà constaté Boivin-Dompierre *et al.* (2017).

Cette interprétation est cohérente avec le résultat d'analyse de la production en surface foliaire pour laquelle une augmentation a seulement été observée chez les gros arbres éclaircis par rapport aux arbres non éclaircis (Fig. 10 et 11).

Cette augmentation de la surface foliaire des gros arbres éclaircis peut être expliquée par la création de trouées autour de ces arbres qui a probablement diminué l'élagage naturel et stimulé le développement latéral des cimes pour fermer la canopée.

Pour mieux cerner la réaction de croissance des arbres éclaircis, nous avons posé une troisième hypothèse qui stipule que l'écart de croissance entre les arbres éclaircis et témoins augmente avec l'augmentation de la proportion de la cime vivante de l'arbre. Les résultats n'appuient pas cette hypothèse. En effet, la croissance en volume marchand des arbres a augmenté avec l'augmentation de la proportion en cime vivante des arbres pour tous les traitements, y compris les témoins (Fig. 12 et 13). Ces résultats ne concordent pas avec ceux d'Omari *et al.* (2016) qui ont observé que le meilleur accroissement en volume marchand des arbres éclaircis a été induit par une augmentation de leur surface foliaire plutôt que par une augmentation de leur efficacité de la croissance. Ces résultats divergents peuvent possiblement être expliqués par la différence de variables comparées. En effet, Omari *et al.* (2016) ont mesuré la surface foliaire alors que dans la présente étude, c'est la proportion de cime. Ces deux variables sont généralement liées, mais avec une bonne variabilité puisque pour un même rapport de cime, la densité du feuillage peut grandement varier, ce qui fait varier la surface foliaire. Quoiqu'il en soit, l'augmentation générale de la croissance des arbres avec l'augmentation de la proportion de cime vivante implique qu'on devrait favoriser de conserver les arbres ayant une forte proportion de cime lors de l'application d'une éclaircie de façon à maximiser leur futur accroissement.

## Conclusion

Les résultats de notre étude indiquent que les traitements d'éclaircie commerciale sont efficaces pour augmenter la croissance de l'épinette blanche qui représente une espèce résineuse d'importance commerciale au Canada. Dans les conditions de notre étude, le traitement qui semble le meilleur pour augmenter la production en bois marchand des arbres résiduels est l'éclaircie commerciale hâtive prélevant 20 % de la surface terrière initiale visant à conserver les arbres à forte proportion de cime vivante. En effet, l'application de l'éclaircie hâtive à faible prélèvement a augmenté la production en bois marchand par rapport à la forte intensité de prélèvement. Toutefois, l'application rapide de la deuxième éclaircie a fait baisser la croissance à l'échelle du peuplement. Par conséquent, il semble préférable d'attendre au moins de 15 ans avant d'appliquer une deuxième éclaircie de façon à maximiser la productivité en volume marchand.

## Bibliographie

- Asselin, H. (2007). Emplois en dents de scie: Exploration des facteurs invoqués pour expliquer les crises dans l'industrie forestière québécoise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Barrette, M., & Tremblay, S. (2015). Réaction convergente du volume marchand 10 ans après l'éclaircie d'une sapinière très dense. *Forestry Chronicle*, 91 (3), 252-259.
- Barrette, M., Tremblay, S., & Auger, I. (2018). Commercial thinning that maintained species diversity of a mixed black spruce–jack pine stand enhanced productivity. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33(8), 756-763.
- Bédard, S., De Grandpré, L., Duchesne, L., Grondin, P., Jetté, J. P., Jobidon, R., Lussier, J. M., Pothier, D., Prigent, G., & Ruel, J. C. (2003). Éclaircie commerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM. Gouvernement du Québec. Forêt Québec. 94.
- Berrill, J. P., & O'Hara, K. L. (2007). Patterns of leaf area and growing space efficiency in young even-aged and multiaged coast redwood stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(3), 617-626.
- Bérubé-Deschênes, A., Franceschini, T., & Schneider, R. (2017). Quantifying competition in white spruce (*Picea glauca*) plantations. *Annals of Forest Science*, 74(2), 1-15.
- Binkley, D., & Kashian, D. M. (2015). Tree-level patterns of lodgepole pine growth and leaf area in Yellowstone National Park: explaining anomalous patterns of growth dominance within stands. *Ecosystems*, 18(2), 251-259.
- Boivin-Dompierre, S., Achim, A., & Pothier, D. (2017). Functional response of coniferous trees and stands to commercial thinning in eastern Canada. *Forest Ecology and Management*, 384, 6-16.
- Bose, A. K., Weiskittel, A., Kuehne, C., Wagner, R. G., Turnblom, E., & Burkhart, H. E. (2018). Tree-level growth and survival following commercial thinning of four major softwood species in North America. *Forest Ecology and Management*, 427, 355-364.
- Boukherroub, T., LeBel, L., & Lemieux, S. (2016). Woody biomass supply chain development in Eastern Canada: A case study in Québec, CIRRELT, CIRRELT-2016-24. Disponible à l'adresse suivante : [www.cirreлт.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2016-24.pdf](http://www.cirreлт.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2016-24.pdf). Consulté le 12/08/2022.

- Bradford, J. B., & Palik, B. J. (2009). A comparison of thinning methods in red pine: consequences for stand-level growth and tree diameter. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(3), 489-496.
- Bradford, J. B., D'Amato, A. W., Palik, B. J., & Fraver, S. (2010). A new method for evaluating forest thinning: growth dominance in managed *Pinus resinosa* stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(5), 843-849.
- Cáceres, C. B., Hernández, R. E., & Koubaa, A. (2017). Effects of log position in the stem and commercial thinning on jack pine chip dimensions produced by a chipper-canter. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(3), 359-373.
- Carr, S., Larocque, G. R., Luckai, N., & Bell, F. W. (2020). Effect of competition on individual white spruce production in young boreal mixedwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(8), 726-735.
- DeRose, R. J., & Seymour, R. S. (2009). The effect of site quality on growth efficiency of upper crown class *Picea rubens* and *Abies balsamea* in Maine, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(4), 777-784.
- Dupont-Leduc, L., Schneider, R., & Sirois, L. (2020). Preliminary results from a structural conversion thinning trial in Eastern Canada. *Journal of Forestry*, 118(5), 515-533.
- Eliasson, L., & Lageson, H. (1999). Simulation study of a single-grip harvester in thinning from below and thinning from above. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 589-595.
- Filipescu, C. N., & Comeau, P. G. (2007). Aspen competition affects light and white spruce growth across several boreal sites in western Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(9), 1701-1713.
- Forrester, D. I., Collopy, J. J., Beadle, C. L., & Baker, T. G. (2013). Effect of thinning, pruning and nitrogen fertilizer application on light interception and light-use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. *Forest Ecology and Management*, 288, 21-30.
- Gagné, L., Lavoie, L., & Binot, J. M. (2012). Croissance et propriétés mécaniques du bois après éclaircie commerciale dans une plantation d'épinette blanche (*Picea glauca*) âgée de 32 ans. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(2), 291-302.
- Gagné, L., Sirois, L., & Lavoie, L. (2016). Comparaison du volume et de la valeur des bois résineux issus d'éclaircies par le bas et par dégagement d'arbres-élites dans l'Est du Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(11), 1320-1329.

- Gilman, E. F., & Watson, D. G., (1994). *Picea glauca* White Spruce. University of Florida. 3.
- Godt, M. J., Hamrick, J. L., Edwards-Burke, M. A., & Williams, J. H. (2001). Comparisons of genetic diversity in white spruce (*Picea glauca*) and jack pine (*Pinus banksiana*) seed orchards with natural populations. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(6), 943-949.
- Gouvernement du Canada., 2020., De quelle façon l'industrie forestière contribue-t-elle à l'économie du Canada?. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/foretsforesterie/letat-des-forets-au-canada-rappo/lindustrie-forestiere-contribue/16518>. Consulté le 01/11/2020.
- Gupta, S. D., Pinno, B. D., & McCreedy, T. (2020). Commercial thinning effects on growth, yield and mortality in natural lodgepole pine stands in Alberta. *The Forestry Chronicle*, 96(2), 111-120.
- Hiesl, P., Crandall, M. S., Weiskittel, A., Benjamin, J. G., & Wagner, R. G. (2017). Evaluating the long-term influence of alternative commercial thinning regimes and harvesting systems on projected net present value of precommercially thinned spruce–fir stands in northern Maine. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(2), 203-214.
- Lafèche, V., Bernier, S., Saucier, J. P., & Gagné, C. (2013). Indices de qualité de station des principales essences commerciales en fonction des types écologiques du Québec méridional. Ministère des Ressources Naturelles (Provincial Department of Natural Resources). Quebec, Canada.
- Lamhamedi, M. S., Deblois, J., Renaud, M., & Beaulieu, J. (2017). Optimisation de l'intégration opérationnelle des clones somatiques dans la filière de bouturage de l'épinette blanche (*Picea glauca*) au Québec. Version corrigée de novembre (2019). *Revue Forestière Française*, AgroParisTech, 69 (2), 121-146.
- Latrémouille, I., & Larouche, C. (2014). L'éclaircie commerciale. Direction de l'Aménagement et de l'Environnement Forestiers et Direction de la Recherche Forestière. 5.
- Lei, X., Lu, Y., Peng, C., Zhang, X., Chang, J., & Hong, L. (2007). Growth and structure development of semi-natural larch-spruce-fir (*Larix olgensis–Picea jezoensis–Abies nephrolepis*) forests in northeast China: 12-year results after thinning. *Forest Ecology and Management*, 240(1-3), 165-177.

- Mäkinen, H., Isomäki, A., & Hongisto, T. (2006). Effect of half-systematic and systematic thinning on the increment of Scots pine and Norway spruce in Finland. *Forestry*, 79(1), 103-121.
- McDowell, N. G., Adams, H. D., Bailey, J. D., & Kolb, T. E. (2007). The role of stand density on growth efficiency, leaf area index, and resin flow in southwestern ponderosa pine forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(2), 343-355.
- Ministère des forêts, de la faune et des parcs. (2019). En résumé : la production de semences et de plants forestiers au Québec., Disponible à l'adresse suivante : <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/production-semences-plants-forestiers/resume/> . Consulté le 01/11/2022.
- Moreau, G., Auty, D., Pothier, D., Shi, J., Lu, J., Achim, A., & Xiang, W. (2020). Long-term tree and stand growth dynamics after thinning of various intensities in a temperate mixed forest. *Forest Ecology and Management*, 473, 118311.
- Olson, M. G., Meyer, S. R., Wagner, R. G., & Seymour, R. S. (2014). Commercial thinning stimulates natural regeneration in spruce–fir stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(3), 173-181.
- Omari, K., & MacLean, D. A. (2015). Do biomass removal and structure-enhancing treatments influence deadwood characteristics following commercial thinning in spruce plantations in New Brunswick, Canada? *Canadian Journal of Forest Research*, 45(10), 1407-1418.
- Omari, K., MacLean, D. A., Lavigne, M. B., Kershaw Jr, J. A., & Adams, G. W. (2016). Effect of local stand structure on leaf area, growth, and growth efficiency following thinning of white spruce. *Forest Ecology and Management*, 368, 55-62.
- Pelletier, G., & Pitt, D. G. (2008). Silvicultural responses of two spruce plantations to midrotation commercial thinning in New Brunswick. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(4), 851-867.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., & R Core Team. (2000). nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-122.
- Pothier, D., Elie, J. G., Auger, I., Mailly, D., & Gaudreault, M. (2012). Spruce budworm-caused mortality to balsam fir and black spruce in pure and mixed conifer stands. *Forest Science*, 58(1), 24-33.
- Pothier, D. (2017). Relationships between patterns of stand growth dominance and tree competition mode for species of various shade tolerances. *Forest Ecology and Management*, 406, 155-162.

- Pothier, D. (2019). Analysing the growth dynamics of mixed stands composed of balsam fir and broadleaved species of various shade tolerances. *Forest Ecology and Management*, 444, 21-29.
- Poulin, J., (2013). Éclaircie commerciale. Fascicule 3.5. Dans Bureau du forestier en chef. Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018., Gouvernement du Québec, Roberval, Qc. 95-98.
- Power, H., Schneider, R., & Berninger, F. (2014). Understanding changes in black (*Picea mariana*) and white spruce (*Picea glauca*) foliage biomass and leaf area characteristics. *Trees*, 28(2), 345-357.
- Prégent, G., Picher, G., & Auger, I. (2010). Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec. Ministère des ressources naturelles et de la faune, Direction de la Recherche Forestière. 94.
- Prévost, M., & Charette, L. (2019). Rehabilitation silviculture in a high-graded temperate mixedwood stand in Quebec, Canada. *New Forests*, 50(4), 677-698.
- Qu, Y., Wang, H., Dean, T. J., Zhang, J., & Zhang, X. (2022). Growth dominance and growth efficiency in response to thinning treatments in Chinese fir plantations with long-term spacing trials. *Forest Ecology and Management*, 521, 120438.
- Rainville, A. (2003). L'amélioration des arbres au Québec: un outil de performance industrielle et environnementale. Direction de la Recherche Forestiere, Ressources Naturelles, Faune et Parcs. 9.
- Raymond, P., & Bédard, S. (2017). The irregular shelterwood system as an alternative to clearcutting to achieve compositional and structural objectives in temperate mixedwood stands. *Forest Ecology and Management*, 398, 91-100.
- Saucier, J. P., Grondin, P., Robitaille, A., Gosselin, J., Morneau, C., Richard, P. J., H., Brisson, J., et al. (2009). Écologie forestière. In: Manuel de foresterie, 2<sup>ième</sup> édition, Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec. Éditions Multimondes. Québec, QC, Canada. 181–316.
- Smith, D. M., Larson, B. C., Kelty, M. J., & Ashton, P. M. S. (1997). The practice of silviculture: Applied Forest Ecology (No. Ed. 9). John Wiley and Sons, Inc.
- Stewart, J. D., & Salvail, J. C. (2017). Evaluation of precommercial thinning of lodgepole pine from long-term research installations in Alberta. Natural Resources Canada= Ressources Naturelles Canada.

- Thiffault, N., & Jobidon, R. (2005). Existe-t-il une interaction entre le scarifiage et le type de plants? Le cas des PMD et des PFD d'épinettes. Note de Recherche Forestière n° 129.
- Tomé, M., & Burkhart, H. E. (1989). Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science*, 35(3), 816-831.
- Wagle, B. H., Weiskittel, A. R., Kizha, A. R., Berrill, J. P., D'Amato, A. W., & Marshall, D. (2022). Long-term influence of commercial thinning on stand structure and yield with/without pre-commercial thinning of spruce-fir in northern Maine, USA. *Forest Ecology and Management*, 522, 120453.
- Waring, R.H., & Schlesinger, W.H. (1985). *Forest ecosystems: concepts and management*. Academic Press, Orlando, FL, USA, pp. 340.
- Yeo, U. S., & Lee, D. K. (2006). Early regeneration of *Fraxinus rhynchophylla* in the understorey of *Larix kaempferi* stands in response to thinning. *Forestry*, 79(2), 167-176.