



Évaluation de la qualité commerciale des tiges de bouleau jaune en peuplement mixte selon le patron de croissance juvénile en contexte de futaie jardinée

Mémoire

Olivier B. Duperron

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

Québec, Canada

Évaluation de la qualité commerciale des tiges de bouleau jaune en peuplement mixte selon le patron de croissance juvénile en contexte de futaie jardinée

Mémoire

Olivier Duperron

Sous la direction de :

Alexis Achim, directeur de recherche
Patricia Raymond, codirectrice de recherche

Résumé

À la suite de plusieurs décennies de pratiques sylvicoles inadaptées à l'autécologie de certaines espèces de la forêt mixte du Québec, la qualité commerciale du bouleau jaune s'est vue grandement diminuée. Afin de maintenir, voire augmenter, la composition en espèces et la qualité commerciale des tiges, il est nécessaire de développer des pratiques mieux adaptées aux peuplements mixtes tempérés.

L'objectif de cette étude est d'évaluer comment la croissance juvénile du bouleau jaune, telle qu'influencée par la taille des trouées et la dynamique de régénération, affecte la qualité commerciale des tiges de bouleau jaune dans la bétulaie jaune résineuse.

Des données de suivi individuel de tiges, des inventaires de gaules, des cellules de compétition et des données dendrochronologiques prises dans deux dispositifs expérimentaux ont été utilisées pour les analyses statistiques. Nous avons mesuré différentes variables dendrochronologiques et construit des modèles non linéaires mixtes permettant d'évaluer l'influence de la taille des trouées sylvicoles, 20 m, 30 m, 40 m et 100x100m, et de la nature et l'intensité de la compétition, sur la qualité commerciale des tiges à l'étude.

Nos résultats indiquent que la rectitude du fût, la hauteur du fût et la somme des débits clairs de nœuds sont influencées positivement par un patron de croissance juvénile présentant une croissance très rapide dans les 10 premières années, car cela permet à l'arbre d'atteindre le couvert dominant, suivi d'une stabilisation de la croissance radiale. De plus, la taille des trouées, leur composition ainsi que la densité de la végétation concurrente peuvent influencer la qualité des tiges. Les analyses statistiques suggèrent qu'un patron de croissance juvénile d'abord rapide, puis suivi d'une stabilisation de la croissance induite par la présence d'essences concurrentes commerciales et non-commerciales qui permet d'améliorer la qualité commerciale du bouleau jaune. Les résultats montrent aussi que les trouées de grandes tailles (2H et parquet d'un hectare, H = hauteur moyenne des arbres dominants) favorisent la qualité du bouleau tant par leur composition en espèces que par l'accès accru à la lumière.

Nous suggérons l'utilisation des grandes ouvertures (2H et parquet) pour favoriser la régénération naturelle et la production de bouleau jaune de qualité au sein des bétulaies jaunes résineuses appauvries ou dégradées par les pratiques passées. Pour optimiser la qualité des bois dans les grandes trouées des bétulaies jaunes résineuses, nous suggérons de maintenir une densité totale de 2300 tiges par hectare 20 ans après la coupe ou lorsque les bouleaux jaunes ont un DHP moyen de 11,2 cm. Cette densité semble créer une compétition latérale suffisante qui favorise la rectitude du fût et l'élagage naturel des tiges.

Table des matières

Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Remerciements.....	vii
Introduction	1
Coupe de jardinage par trouées et coupe de jardinage par pied d'arbres et groupes d'arbres	1
Constats observés sur les dispositifs SSAM I et SSAM II	2
Objectifs et hypothèses	4
1. Matériel et méthodes.....	6
1.1. Sites à l'étude.....	6
1.2. Échantillonnage.....	7
1.3. Chronologie des cernes de croissance	10
1.4. Analyses statistiques.....	10
1.4.1. Caractérisation de la composition et de la densité des espèces selon les trouées	10
1.4.2. Caractérisation de la qualité du bouleau jaune selon les trouées.....	11
1.4.3. Caractérisation de la croissance juvénile des bouleaux jaunes matures.....	11
1.4.4. Développement des modèles statistiques selon Σ_{dc}	12
2. Résultats	17
2.1. Différence entre les traitements de coupe.....	17
2.1.1. Effet des traitements sur la composition et la densité des gaules	17
2.1.2. Effet de la taille des ouvertures du couvert sur le DHP	19
2.1.3. Effet de la taille des ouvertures du couvert sur la hauteur.....	19
2.1.4. Effet de la taille des ouvertures du couvert sur la première branche vivante.....	19
2.1.5. Analyse de corrélation des variables de qualité substitut.....	21
2.2. Arbres matures.....	21
2.2.1. Caractérisation de la croissance juvénile des bouleaux jaunes matures	21
2.2.2. Modélisation de Σ_{dc} pour les arbres matures	22
2.3. Arbres juvéniles.....	25

2.3.1. Modélisation de Σ_{dc} chez les arbres juvéniles	25
3. Discussion.....	29
3.1. Qualité des tiges de bouleau jaune	29
3.2. Recommandations sylvicoles	32
Conclusion	34
Bibliographie	35

Liste des figures

Figure 1 : Dispositif expérimental de SSAM I établi en 1999 (Prévost et al., 2010). Chaque bloc aléatoire contient 5 traitements; témoin, parquet (1 ha), 3 trouées de taille différente distribuées systématiquement, 1H = 8 trouées de 20 m de diamètre (H = hauteur moyenne des arbres dominants), 1.5 H = 4 trouées de 30 m de diamètre, 2H = 2 trouées de 40 m. La matrice forestière entre les traitements a été récoltée à 33% de sa surface terrière. La moitié des ouvertures créées par la coupe ont été scarifiées par placeaux (>1000/ha, 2m²) en 2000. 7

Figure 2: A) Densité (ti/ha) selon le traitement (trouées 1H = 20 m de diamètre, trouées 1.5H = 30 m de diamètre, trouées 2H = 40 m de diamètre, PAR = parquet, TEM = témoin), des gaules d'érable à épis A) et des gaules de cerisier de Pennsylvanie dans les parcelles de dénombrement du dispositif SSAM I (n=80) 12 ans après la coupe. Pour chaque traitement, les différentes lettres indiquent une différence significative de densité selon le traitement. 18

Figure 3 : A) DHP (mm), B) hauteur totale (cm) et C) hauteur de la première branche vivante (cm) pour les gaules de bouleau jaune (n=350) dans les 5 traitements de coupe du dispositif SSAM I (trouées 1H = 20 m de diamètre, trouées 1.5H = 30 m de diamètre, trouées 2H = 40 m de diamètre, PAR = parquet 100 m x 100 m, TEM = témoin). Pour chaque traitement, les différentes lettres indiquent une différence significative entre la taille des trouées. 20

Figure 4 : Croissance annuelle moyenne des bouleaux jaunes matures (n=42) groupés selon la valeur positive (rouge) ou négative (vert) de la régression de croissance individuelle au cours de l'intervalle 5-25 ans (mm/an). 22

Figure 5 : Prédiction des moyennes de modèles des paramètres significatifs pour les bouleaux jaunes matures avec un intervalle de confiance de 95% pour la somme des débits clairs (Σdc) : A) régression de la croissance des années 5 à 25 (variable beta) et B) hauteur relative de l'arbre par rapport à la hauteur moyenne du couvert dominant (hauteurR), avec un intervalle de confiance de 95% pour la somme des débits clairs (Σdc) des bouleaux jaunes matures. 24

Figure 6 : Prédiction des moyennes de modèles des paramètres significatifs pour les bouleaux jaunes juvéniles, avec un intervalle de confiance de 95% pour la somme des débits clairs (Σdc) : A) hauteur relative par rapport à la hauteur moyenne du couvert dominant (hauteurR) et B) rayon du houppier moyen (rh_m). 27

Liste des tableaux

Tableau 1 : Variables dendrométriques prises sur le terrain des arbres études de dimension commerciale, des arbres matures et des arbres juvéniles échantillonnés.	9
Tableau 2 : Liste des variables explicatives utilisées dans le développement des modèles.	14
Tableau 3 : Composition et densité moyenne (ti/ha) des gaules avec écart-type par espèce (bouleau jaune (BOJ), cerisier de Pennsylvanie (PRP), érable rouge (ERR), érable à sucre (ERS), peupliers (PEUP), bouleau à papier (BOP), sapin baumier (SAB), érable de Pennsylvanie (ERP) et érable à épis (ERE)) dans les parcelles de dénombrement (n=80) selon le traitement de coupe 1H, 1.5H, 2H, parquet (PAR) et témoin (TEM) en 2011.	17
Tableau 4 : Composition et densité moyenne (ti/ha) avec écart-type par espèces dans les cellules de compétition (n=40) des parquets en 2020.	17
Tableau 5 : Comparaison des modèles de régressions linéaires multiples selon Σ_{dc} pour les tiges matures.	23
Tableau 6 : Comparaison des modèles de régression linéaire multiple selon la somme des débits clairs (Σ_{dc}) pour les tiges juvéniles de bouleau jaune.	26
Tableau 7 . Estimation des paramètres et de leur erreur standard ($\pm SE$) des variables significatives finales qui permettent d'estimer la valeur de Σ_{dc}	28

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier ma codirectrice, Patricia Raymond, chercheuse à la Direction de la recherche forestière (DRF). Elle m'a permis d'avoir accès à un projet de maîtrise où déjà beaucoup de données étaient disponibles. Patricia a su me guider et me garder motivé tout au long de ma maîtrise. Ton positivisme et ta bonne humeur ont rendu la rédaction de ce mémoire possible. Merci de m'avoir donné beaucoup de ton temps. Je garderai seulement de bons souvenirs de cette collaboration.

Je tiens également à remercier mon directeur de recherche, Alexis Achim, pour m'avoir donné la chance de poursuivre aux études graduées. Tu as su me donner du temps quand il le fallait et être flexible pendant ma maîtrise pandémique. Merci pour ton ouverture, ton enthousiasme et ta créativité, tu as su créer plusieurs étincelles au travers les différentes étapes de mon mémoire.

Ce projet de recherche n'aurait pas été possible sans la participation de la DRF et de son équipe technique. J'aimerais remercier Éric Saulnier et Serge Williams pour leur support et leur temps. Vos compétences sur le terrain m'ont grandement aidé lors de mes prises données.

Je souhaite remercier Ann Delwaide, responsable du laboratoire de dendrochronologie de la Faculté de Foresterie, Géographie et Géomatique de l'Université Laval, pour m'avoir guidé et aidé lors de mes travaux de dendrochronologie. Ton temps et tes conseils ont grandement amélioré la qualité et l'efficacité de mes analyses.

Un gros merci à Catherine Chagnon, professionnelle de recherche, pour m'avoir aidé dans l'analyse de mes données, ainsi que pour avoir répondu à plusieurs de mes questions. Sa participation a été cruciale pour la réalisation de ce mémoire.

Finalement, je veux remercier mes parents et ma famille pour leur éternelle patience dans mon cheminement académique long et sinueux. Je n'aurais jamais persévéré de cette façon sans votre aide et votre support. Merci de m'avoir poussé à donner le meilleur de moi-même. Je termine en remerciant ma copine, Eva, pour toujours croire en moi, mais surtout pour son assiduité et sa motivation au travail qui ont su m'inspirer pendant mon cheminement à la maîtrise.

Merci à tout le monde!

Introduction

La forêt mixte du Québec est un écotone diversifié qui fait la transition entre la forêt feuillue au sud dominée par l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et la forêt résineuse au nord dominée par le sapin baumier (*Abies balsamea*) et l'épinette noire (*Picea mariana*) (Baral et al., 2016; Castle et al., 2018; Gauthier et al., 2016; Prévost et al., 2010; Shabaga et al., 2019). Les principales formations végétales de fin de succession de la forêt mixte sont des peuplements mélangés de sapin baumier et de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) (Prévost et al. 2003). Puisque ces espèces ont des besoins écologiques bien différents, il est difficile d'adapter des traitements sylvicoles adaptés à une composition forestière aussi diversifiée. Ainsi, les coupes forestières des siècles derniers ont parfois laissé des peuplements appauvris ou dégradés. Dans ce contexte, il est important de comprendre l'effet des différents traitements sylvicoles en forêt mixte tempérée. La présente étude permettra de mieux comprendre l'influence du patron de croissance juvénile (≤ 25 ans) et de la taille des trouées sur la qualité commerciale des tiges de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), et ce, à l'échelle de l'arbre.

Coupe de jardinage par trouées et coupe de jardinage par pied d'arbres et groupes d'arbres

La coupe de jardinage par trouées a été développée entre autres pour résoudre les problèmes de régénération du bouleau jaune et des essences semi-tolérantes à l'ombre en forêt tempérée (Prévost et al., 2010; Shields et al., 2007; Webster & Lorimer, 2005). Appliquée dans le cadre d'un aménagement écosystémique, la coupe de jardinage par trouées vise à reproduire un régime de perturbations naturelles d'intensité modérée pour régénérer les essences moins tolérantes à l'ombre (Raymond et al. 2013). Quant à elle, la coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres a été développée pour régénérer tant des espèces ayant une tolérance à l'ombre intermédiaire qu'élevée (Raymond et al. 2013) et limiter l'envahissement des espèces concurrentes comme le framboisier (Prévost & Charrette 2015). Ce procédé de régénération constitue donc un compromis entre la coupe de jardinage par pieds d'arbres et la coupe de jardinage par trouées dans le but de satisfaire les besoins des espèces ayant des tolérances à l'ombre différentes. Il permet aussi de maintenir une structure inéquienne et conserver des attributs de vieilles forêts (Raymond et al. 2018).

Lors de l'application des traitements sylvicoles, la réaction des arbres à l'intensité des perturbations est en partie fonction de leur tolérance à l'ombre. Les espèces les moins tolérantes à l'ombre performant davantage lors d'une perturbation de forte intensité lors de laquelle le couvert forestier est grandement affecté (Shields et al., 2007). Le bouleau jaune, qui est de tolérance intermédiaire à l'ombre, s'installe plus facilement lors de perturbations d'intensité modérée à forte, c'est-à-dire dans des ouvertures plus grandes que 700 m² (Gasser et al., 2010; Kneeshaw & Prévost, 2007; Prévost et al., 2010; Prévost & Charette, 2015). Les essences tolérantes à l'ombre comme l'épinette rouge (*Picea rubens*) et le sapin baumier s'installent plus facilement sous un régime

de perturbations à l'échelle de l'arbre, c'est-à-dire dans des ouvertures de moins de 300 m² (Dumais & Prévost, 2016).

La dimension des trouées influence la quantité de lumière qui est disponible pour la régénération (Coates & Burton, 1997; Gendreau-Berthiaume & Kneeshaw, 2009; Lieffers et al., 1999; Prévost & Raymond, 2012). Ce facteur devient donc un élément important à considérer lorsqu'on veut régénérer une espèce en particulier (Marquis, 1965). Selon Kneeshaw et Prévost (2007), la dimension des trouées naturelles en forêt mixte varie de 20 à 2100 m². Le bouleau jaune se régénère mieux dans des trouées plus grandes que 800 m² (Prévost et al., 2010). Toutefois, Gasser et al. (2010), n'ont pas détecté de différence significative de régénération du bouleau jaune, 6 ans après la récolte, dans trois dimensions de trouées (<100 m², 100-300 m², ~1000 m²). Ce genre de tendance a aussi été observé dans le dispositif expérimental SSAM I (Figure 1) (Prévost et al., 2010). En effet, le bouleau jaune se comporte comme une espèce pionnière et colonise rapidement les espaces vacants lorsque les sources de semences sont disponibles et que la litière est perturbée (Prévost et al., 2010). De plus, dans un souci de résilience des forêts, Kern et al. (2013) soulignent que de grandes trouées (> 400 m²) apportent des défis à long terme pour maintenir un couvert arborescent de qualité. Toutefois, ces affirmations sont basées sur des études de jeunes peuplements (<10 ans), c'est pourquoi ce mémoire aborde pertinemment la dynamique de régénération du bouleau jaune dans les différentes dimensions de trouées à plus long terme (20 ans).

D'ailleurs, il n'y a pas que la dimension des trouées qui influence la disponibilité en lumière, mais aussi la topographie, la hauteur des arbres, la dimension de la trouée, l'orientation, l'inclinaison et la latitude à laquelle se trouve le site (Prévost & Raymond, 2012). Des facteurs biologiques comme la présence de végétation concurrente et le broutement sont aussi à prendre en compte puisqu'ils peuvent modifier les trajectoires de régénération (Kern et al., 2013).

Constats observés sur les dispositifs SSAM I et SSAM II

Ce mémoire est basé sur des données des dispositifs de Systèmes Sylvicoles Adaptés à la forêt Mélangée (SSAM) I et II. Dans le premier dispositif, la coupe de jardinage par trouées a été étudiée, alors que dans le deuxième, c'est la coupe de jardinage par pieds d'arbres et par groupe d'arbres qui a été étudiée. Voici quelques constats des recherches antérieures produits à l'aide de données tirées de ces sites de recherche.

Prévost et al. (2010) ont émis plusieurs constats concernant les résultats observés sur le dispositif SSAM I. Premièrement, le scarifiage par placeaux a été efficace pour favoriser la germination, la survie et la croissance initiale du bouleau jaune. De plus, une synchronisation du scarifiage du sol avec une bonne année semencière a amélioré la régénération de cette espèce. Cette régénération est d'ailleurs plus abondante dans les ouvertures

scarifiées et en bordure des trouées. Deuxièmement, la régénération du cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica*) s'est établie dans tous les traitements, mais davantage dans les grandes ouvertures, soit les trouées de 2 hauteurs d'arbre (2H), soit 40 mètres de diamètre et les parquets de 1 hectare (100 x 100 m) (Prévost et al., 2010). Troisièmement, les essences résineuses s'établissent difficilement dans les grandes ouvertures, notamment dans les parquets (Prévost et al., 2010).

Raymond et al. (2018) ont émis d'autres constats concernant les résultats observés dans le dispositif SSAM II. Un premier constat est que le scarifiage passif créé par les opérations forestières a grandement amélioré la qualité des lits de germination, ce qui a été favorable à l'établissement du bouleau jaune. Un deuxième constat concerne la régénération du bouleau jaune. La survie et la croissance de celui-ci ont été influencées par l'intensité du traitement. En effet une perturbation modérée a été nécessaire pour stimuler une phase de régénération chez le bouleau jaune (Raymond et al., 2018).

Une tendance peut donc être dégagée de ces résultats, la régénération du bouleau jaune dans les grandes ouvertures a été un succès, malgré qu'une forte proportion de cerisier de Pennsylvanie s'y soit installée. Selon Nyland et al. (2007), l'établissement d'une forte densité de cerisier de Pennsylvanie n'empêche pas la régénération et le développement des espèces semi-tolérantes et tolérantes. Cependant, d'autres études sont en contradiction avec cette affirmation. En effet, Heitzman et Nyland (1994) et Ristau et Horsley (1999) soulignent l'agressivité avec laquelle le cerisier de Pennsylvanie peut s'installer et nuire à la régénération des espèces désirables. Toutefois, un accompagnement par le cerisier de Pennsylvanie pourrait permettre une meilleure rectitude du fût des essences désirées comme le bouleau jaune (Ristau & Horsley, 1999). Baral et al. 2016 ont démontré, quant à eux, que les tiges longtemps opprimées ont tendance à avoir plus de défauts et à avoir une détente de croissance moins forte, ce qui limiterait les gains en productivité lors d'éclaircie. Il serait donc pertinent de connaître quel est le rythme de croissance optimal du bouleau jaune qui permet de produire des tiges de grande qualité. Il serait aussi pertinent de connaître quelles sont la nature et l'intensité de la compétition inter et intraspécifique qui permettent une bonne croissance et une survie du bouleau jaune. En connaissant ce rythme de croissance et la compétition idéale, il serait possible d'émettre des recommandations sylvicoles pour une production de bouleau jaune de qualité dans la bétulaie jaune résineuse afin d'augmenter la valeur des peuplements forestiers (Hasegawa et al., 2015).

Pour donner suite et bonifier les travaux du projet SSAM, ce mémoire vise à identifier quels sont les effets de la coupe de jardinage par trouées et la coupe de jardinage par pied d'arbre ou par groupes d'arbres dans les bétulaies jaunes résineuses. Plus précisément, nous souhaitons mieux comprendre comment elle influence la qualité des bouleaux jaunes résiduels, ainsi que la croissance et la qualité des tiges de bouleaux jaunes juvéniles afin de permettre un meilleur aménagement de la forêt mixte selon un objectif de production de tiges de qualité.

Objectifs et hypothèses

L'objectif principal du projet était de mieux comprendre comment la croissance du bouleau jaune influence la qualité commerciale des tiges dans les bétulaies jaunes résineuses. L'environnement exerce une influence sur le patron de croissance des tiges de bouleau jaune. En effet, il semble que l'intensité de la compétition induite sur le bouleau jaune peut influencer sa qualité en favorisant la rectitude du fût et son élagage naturel (Gagné et al., 2013; Raymond & Bédard, 2017). De plus, l'intensité du prélèvement des traitements sylvicoles a pu aussi influencer la qualité des tiges. En effet, plusieurs études démontrent l'importance de l'intensité des perturbations du couvert forestier et du sol et de la trajectoire de croissance des tiges pour mettre sur pied une cohorte de tiges de bouleaux jaunes en quantité et en qualité suffisante (Baral et al., 2016; Castle et al., 2018; Gauthier et al., 2016; Prévost et al., 2010; Shabaga et al., 2019). Cette étude permettra de mieux comprendre l'influence du patron de croissance juvénile (≤ 25 ans) et de la taille des trouées sur la qualité commerciale des tiges de bouleau jaune, et ce à l'échelle de l'arbre.

Objectif spécifique 1 :

Identifier le patron de croissance juvénile optimal pour la production de tiges de bouleau jaune à haute valeur commerciale.

Hypothèse 1 : le patron de croissance juvénile optimal sera observé sur une tige qui subit une compétition qui favorise une croissance verticale et un élagage naturel des branches basses.

Une croissance limitée par une compétition latérale influence positivement la rectitude du fût et l'élagage naturel, ce qui permet de produire des tiges de plus grande qualité (Gagné et al., 2013; Mäkinen et al., 2003; Prestemon & Service 1998; Ristau & Horsley, 1999). Toutefois, une tige opprimée qui subit une importante compétition verticale voit augmenter son risque de présenter des défauts et sa capacité de détente de croissance grandement diminuée (Baral et al., 2016). Le patron optimal de croissance s'observe donc sur des tiges ayant une croissance lente au départ, suivi d'un dégagement naturel à la suite du déclin des compétiteurs (Gagné et al., 2013; Ristau & Horsley, 1999).

Objectif spécifique 2 :

Identifier la taille optimale des ouvertures pour la production de tiges de bouleau jaune de qualité sciage et déroulage.

Hypothèse 2 : la dimension optimale des ouvertures pour la production de tiges de qualité sera celle où le bouleau jaune croîtra rapidement en limitant la compétition verticale, mais en favorisant une compétition latérale.

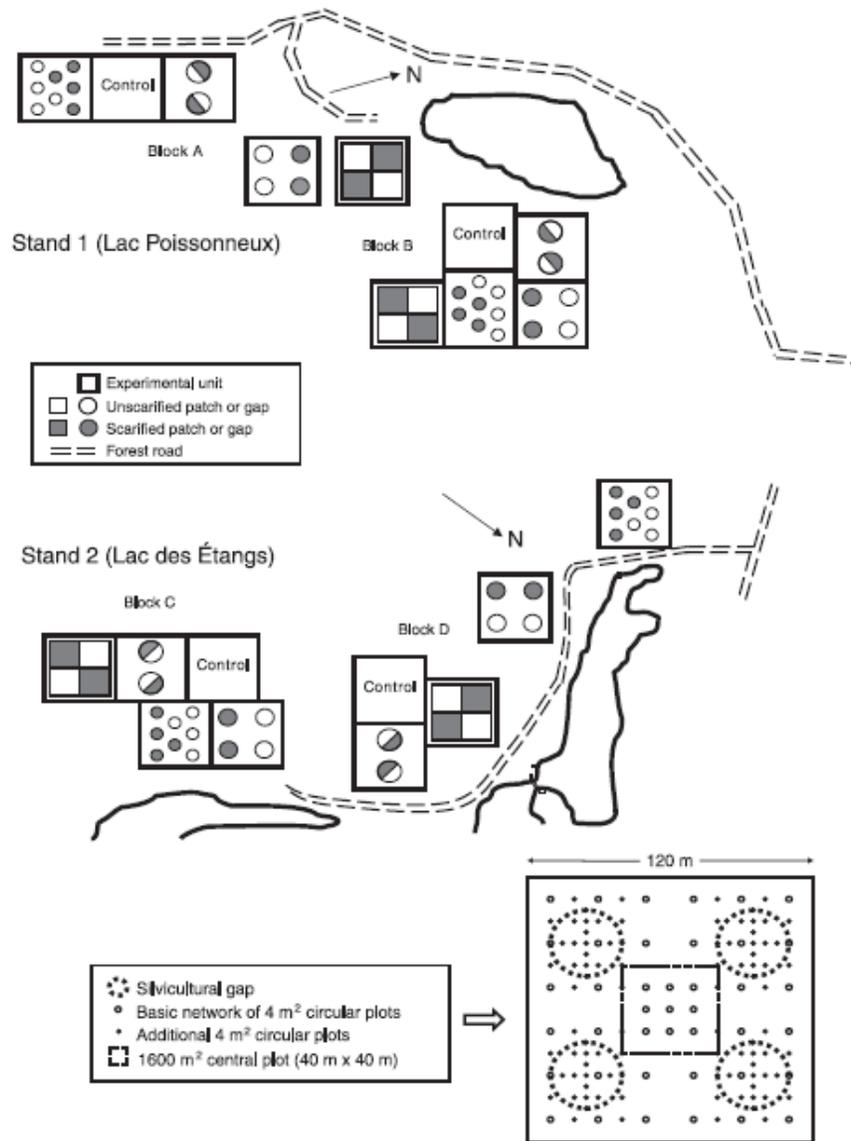
Les ouvertures de plus grande taille (2H et parquet) permettront au bouleau jaune d'avoir une croissance plus rapide en diamètre et en hauteur tout en ayant une compétition latérale suffisante, notamment à cause de la présence du cerisier de Pennsylvanie (Gagné et al., 2013; Mäkinen et al., 2003; Ristau & Horsley, 1999, 2006). Les trouées de plus petite taille limiteront l'accroissement en diamètre en plus d'offrir un patron de croissance moins régulier, ce qui implique une attente plus longue dans le sous-couvert forestier et un risque plus élevé d'apparition des défauts (Baral et al., 2016; Gagné et al., 2013). La taille optimale des ouvertures sera donc celle qui permettra une croissance rapide des tiges de bouleau jaune tout en favorisant une compétition latérale suffisante. En effet, le bouleau jaune s'installe et croît plus rapidement dans les trouées de grande taille étant donné sa tolérance intermédiaire à l'ombre (Duchesne & Prévost, 2013; Mäkinen et al., 2003).

1. Matériel et méthodes

1.1. Sites à l'étude

L'étude s'est déroulée dans deux dispositifs expérimentaux du projet Système Sylvicole Adapté à la forêt Mixte (SSAM I et SSAM II), près de Rivière-à-Pierre, à environ 80 km au nord-ouest de la ville de Québec, QC, Canada (47°N latitude, 72°O longitude). La région est caractérisée par des hautes collines aux sommets arrondis (Robitaille et Saucier 1998). Le sol a été classé comme un podzol humo-ferrique (Prévost et al., 2010). La moyenne annuelle de précipitations de la région est de 1253 mm, 31% de ces précipitations sont sous forme de neige (Raymond et al., 2016). Les sites se trouvent à la limite des domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune et de l'érablière à bouleau jaune (Saucier et al., 2009). Ils ont été établis dans des peuplements de qualité de structure inéquienne se trouvant à moins de 10 km l'un de l'autre (Raymond et al., 2016). Une coupe de jardinage par trouées, où les trouées représentent environ 18% de la surface des unités expérimentales et la coupe matricielle 30% de la surface terrière, a été faite sur le dispositif SSAM I en 1999. La taille des trouées était d'une hauteur d'arbre (1H), d'une hauteur d'arbre et une demie (1.5H), de 2 hauteurs d'arbre (2H) et de 100m par 100m, c'est-à-dire les parquets (PAR). De plus, 33% de la matrice forestière a été récoltée. La moitié des trouées créées ont été scarifiées par placeaux (>1000/ha, 2m²) en 2000. Des coupes de jardinage par pieds d'arbres et par groupes d'arbres de différentes intensités (0%, 20%, 31% et 42% de la surface terrière [m²/ha]) ont été appliquées dans le dispositif SSAM II en 2008. Les perturbations antérieures que ces peuplements ont subies sont des épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) en 1912 et 1947 (Lussier et al., 2000).

Figure 1 : Dispositif expérimental de SSAM I établi en 1999 (Prévost et al., 2010). Chaque bloc aléatoire contient 5 traitements; témoin, parquet (1 ha), 3 trouées de taille différente distribuées systématiquement, 1H = 8 trouées de 20 m de diamètre (H = hauteur moyenne des arbres dominants), 1.5 H = 4 trouées de 30 m de diamètre, 2H = 2 trouées de 40 m. La matrice forestière entre les traitements a été récolté à 33% de sa surface terrière. La moitié des ouvertures créées par la coupe ont été scarifiées par placeaux (>1000/ha, 2m²) en 2000.



1.2. Échantillonnage

Le suivi des arbres études de dimensions commerciales (>9,0 au DHP, diamètre à hauteur de poitrine) a été fait plusieurs fois depuis l'établissement du dispositif, les tiges présentant des caractéristiques de tiges

d'avenir ont été sélectionnées. Dans le cadre de cette étude, nous avons traité les données recueillies en 2020 dans le dispositif SSAM I. L'échantillonnage des arbres études a été fait dans toutes les trouées et dans les témoins, ce qui représente 350 arbres études. Les informations récoltées étaient le DHP (mm), la hauteur totale (cm), la hauteur du fût (cm) et la hauteur de la première branche vivante (cm).

Le suivi des gaules a été réalisé sur 80 placettes de 40 m² distribuées uniformément entre les traitements (1H, 1.5H, 2H, parquet et témoin) dans les blocs de SSAM I. Le dénombrement de toutes les tiges de 1,1 à 9,0 cm de DHP par classe de 2 cm a été fait pour les espèces commerciales (bouleau jaune, érable à sucre, érable rouge (*Acer rubrum*), sapin baumier, épinette rouge, hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*), peupliers (*Populus sp.*) et bouleau à papier (*Betula papyrifera*) et non-commerciales (cerisier de Pennsylvanie, érable à épis (*Acer spicatum*), érable de Pennsylvanie (*Acer pensylvanicum*)). Les données utilisées ont été récoltées en 2011.

L'échantillonnage des arbres juvéniles âgés d'environ 17 ans (n=40) a été fait de façon aléatoire parmi les arbres établis dans les parquets de 1 ha du dispositif SSAM I à l'automne 2020. Les arbres sélectionnés ont été abattus et une rondelle a été prise à une hauteur de 1 m. Seulement les arbres au cœur sain ont été conservés afin de faciliter l'analyse dendrochronologique. Les mêmes mesures ont été prises pour les arbres juvéniles que pour les arbres matures (Tableau 1), avec quelques mesures supplémentaires, dont l'évaluation des rayons de cime (cm) de chaque arbre aux quatre points cardinaux (N, S, E, O) (Prévost & Charette, 2019). De plus, nous avons pris les mesures nécessaires pour être capable de produire l'indice de compétition interindividuelle de Schütz pour chaque rondelle d'arbre juvénile récoltée, c'est-à-dire la distance entre l'arbre central et ses compétiteurs, la hauteur et le rayon de cime moyen de chacun de ceux-ci. Cet indice a été choisi puisqu'il intègre à la fois une composante horizontale (distance de la cime de l'arbre voisin) et une composante verticale de la compétition (différence de hauteur entre les houppiers) :

$$[1] \quad \text{Schütz} = \Sigma(k\text{Ver} + \text{Hor})$$

avec

$$[2] \quad \text{Ver} = (H_v - H_c) / D_{vc}$$

et

$$[3] \quad \text{Hor} = 0,5 - (E_{vc} / D_{vc})$$

où D_{vc} est la somme des rayons de houppier de l'arbre central c et d'un voisin v , E_{vc} la distance entre les extrémités de rayons de houppier, H_v et H_c , les hauteurs de l'arbre voisin et de l'arbre central et n , le nombre de voisins (Ung et al., 1997). La constante k est le rapport de proportionnalité entre les effets verticaux (Ver) et horizontaux (Hor), égalant 0,65 pour le *Picea abies* (L.) Karst. Si la sommation des effets de chaque voisin résulte en un indice supérieur à zéro, l'arbre central est considéré opprimé. La cellule de compétition des arbres juvéniles récoltés était constituée d'un arbre central (bouleau jaune) et de ses compétiteurs immédiats, soit les arbres voisins dont une partie du houppier entrait en contact avec celui du bouleau jaune central. Les mesures suivantes ont été prises dans chaque cellule à rayon variable selon la distance des tiges concurrentes: DHP, hauteur totale, rayons de houppiers de l'arbre central et d'un arbre voisin (dans la direction reliant les deux arbres), distance et azimut entre l'arbre central et ses voisins.

L'échantillonnage des arbres matures ($n=42$) a été fait de façon aléatoire dans les deux dispositifs à l'automne 2020 (SSAM I = 20 et SSAM II = 22). Les arbres matures sélectionnés ne devaient pas se trouver près d'une ouverture du couvert afin de limiter la diminution de qualité provoquée par l'apparition de branches adventives à la suite de la récolte. Les arbres matures qui ont été sélectionnés devaient au moins avoir une dimension de sciage (≥ 23 cm). Deux carottes, à une hauteur de 1,3 m, ont été récoltées sur chacun d'eux aux endroits où la qualité de la carotte serait la meilleure. Seulement les arbres au cœur sain ont été conservés afin d'optimiser l'analyse dendrochronologique. Pour chacun des arbres, nous avons mesuré plusieurs variables (Tableau 1).

Tableau 1 : Variables dendrométriques prises sur le terrain des arbres études de dimension commerciale, des arbres matures et des arbres juvéniles échantillonnés.

Mesures et données dendrométriques		
Arbres études	Arbres matures	Arbres juvéniles
DHP (mm)Hauteur (cm)	DHP (mm)	DHP (mm)
Hauteur du fût (cm)	Hauteur (cm)	Hauteur (cm)
Hauteur de la branche vivante la plus basse (cm)	Hauteur du fût (cm)	Hauteur du fût (cm)
	Hauteur de la branche vivante la plus basse (cm)	Hauteur de la branche vivante la plus basse (cm)
	Défauts (selon le guide de classification MSCR)	Défauts (selon le guide de classification MSCR)
	Somme des longueurs de débits clairs de nœuds (Σdc , cm)	Somme des longueurs de débits clairs de nœuds (Σdc , cm)
		Rayon de cime moyen (N, S, E, O, cm)
		Indice de Schütz

Lors de l'échantillonnage des arbres juvéniles et matures, nous avons aussi mesuré la variable dépendante utilisée dans cette étude, soit la somme des plus longs débits clairs (sans nœuds) pour chacune des quatre faces (Σdc , cm) (Gagné et al. 2013). Cette variable est dérivée du système de classification développé et utilisé

par le MFFP et connu sous le nom de « ABCD », lequel est dérivé du système de classification de qualité des billes développée par Hanks (1971) et adapté au Canada par Petro et Calvert (1976). Elle utilise quatre classes de qualité pour caractériser le potentiel de transformation d'un arbre : A (déroulage), B (gros sciage), C (petit sciage) et D (pâtes et papiers). Différents facteurs sont considérés dans la classification, tels que le DHP (A > 39 cm, B > 33 cm, C et D > 23 cm) et la présence de défauts sur la bille. Pour évaluer la qualité, il faut localiser le meilleur tronçon de 3,7 mètres de la bille dans le premier tronçon de 5 m. Ensuite, on le sépare en quatre faces virtuelles qu'on utilise pour caractériser la qualité de la bille (Steele, 1984). La classification utilise la troisième meilleure face et des réductions sont appliquées selon les défauts présents, comme des signes de pourriture. Fortin et al. (2009) ont démontré que le système de classification ABCD représente fidèlement la qualité commerciale d'un arbre selon son DHP. Pour les besoins de cette étude, des ajustements à ce système ont été faits puisque nous nous intéressons à quantifier la qualité de tiges des arbres de toutes les tailles, incluant des tiges plus petites que 23 cm de DHP. Comme pour la classification ABCD, les mesures ont été prises sur le premier tronçon de 5 m de la tige. Les réductions ont été appliquées selon la méthodologie de la classification ABCD. À l'instar de la classification ABCD, pour mesurer l'indice Σ_{dc} , nous avons additionné le débit sans défaut le plus long de chaque face. L'indice peut atteindre une somme maximale de 2000 cm sur les tiges sans défaut.

1.3. Chronologie des cernes de croissance

Toutes les carottes et les rondelles ont été séchées et collées sur des supports, puis finement sablées afin de pouvoir bien identifier les cernes de croissance. Un total de 84 carottes de bouleau jaune mature et 40 rondelles de bouleau jaune juvénile ont été mesurées à l'aide d'une planche micrométrique Velmex (± 0.002 mm). Nous avons construit une série de référence avec les carottes de bouleau jaune mature. La série de référence a été construite et évaluée à l'aide du programme COFECHA (Holmes, 1983). Celle-ci nous a permis d'uniformiser la datation des échantillons.

Tous les échantillons ont pu être utilisés dans le jeu de données final. La datation des rondelles de bouleau jaune juvénile a été plus simple étant donné la formation de cernes de croissance bien définis vu la croissance rapide des tiges dans les parquets. Une analyse visuelle des séries dendrochronologiques a été suffisante pour confirmer la datation.

1.4. Analyses statistiques

1.4.1. Caractérisation de la composition et de la densité des espèces selon les trouées

La caractérisation des trouées à l'échelle du dispositif SSAM I a été réalisée à l'aide des données de dénombrement de gaules de 2011. Cette année étant plus pertinente puisque les tiges étaient encore au stade

gaulis, alors que pour les mesures plus récentes le dénombrement de gaules était sous-estimé étant donné le passage de plusieurs tiges au stade perchis. Dans le but de quantifier la composition des espèces et d'identifier les différences entre les traitements, des études de variances (ANOVA) ont été faites pour chaque espèce. Les différences de densité significatives entre les traitements ont été évaluées à l'aide du test de Tukey. Le bloc a été considéré comme un effet aléatoire. Ces analyses visent à mieux comprendre quelles espèces étaient présentes dans les différentes trouées et quelles espèces pourraient favoriser la qualité du bouleau jaune selon leur densité.

La caractérisation de la densité des tiges dans les parquets a été faite à l'aide des données des cellules de compétition ($n=40$) mesurées en 2020. Puisqu'il s'agit du seul et même traitement de coupe, nous avons utilisé la moyenne et l'écart-type de la densité des compétiteurs présents dans les cellules de compétition.

1.4.2. Caractérisation de la qualité du bouleau jaune selon les trouées

Les variables dépendantes utilisées dans la caractérisation de la qualité du bouleau jaune sont la hauteur totale, le DHP, la hauteur du fût et la hauteur de la première branche vivante. Les variables ont été traitées comme des variables continues. Le choix de ces variables s'est basé sur l'influence directe qu'elles ont sur l'indice de qualité Σ_{dc} (Gagné et al., 2013). Dans le but de quantifier la qualité des arbres étudiés et d'identifier la variable ayant la plus forte corrélation avec l'indice de qualité Σ_{dc} , une analyse de corrélation a été faite avec les variables des tiges juvéniles, qui sont les mêmes, c'est-à-dire le DHP, la hauteur du fût et la hauteur de la plus haute branche vivante. Ces variables ont été considérées comme des « variables de qualité substitut » à l'indice de qualité Σ_{dc} , afin de permettre une analyse de qualité touchant à l'ensemble des traitements de coupe (1H, 1.5H, 2H, parquet, témoin).

Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel de programmation statistique R (Development Core Team 2022) et le package « stats » (R Development core team, 2022). Des ANOVA ont été faites séparément pour les différentes variables dépendantes. Le bloc a été considéré comme un effet aléatoire. L'analyse consistait à identifier les différences significatives entre les traitements. À l'aide du Test de Tukey, les moyennes du DHP, de la hauteur totale et de la hauteur de la première branche vivante ont été comparées pour les différents traitements.

1.4.3. Caractérisation de la croissance juvénile des bouleaux jaunes matures

Afin de caractériser la croissance initiale des bouleaux jaunes matures, la croissance annuelle (mm/an) de chaque échantillon a été utilisée afin de calculer la croissance annuelle moyenne (mm/an) de chaque bouleau jaune mature. À l'aide des packages « dplyr », « MAGGRITR » et « tidyverse » nous avons reconstitué la régression de croissance juvénile 5 à 25 ans de chaque bouleau jaune mature. Dans un souci de précision,

nous avons commencé la régression linéaire à l'âge cambial de 5 ans étant donné que nous avons minimalement cet âge pour tous les échantillons. Ensuite, nous avons séparé les échantillons en 2 groupes d'arbres, soit un groupe ayant des régressions positives et l'autre des régressions négatives. Finalement, nous avons calculé la moyenne annuelle de croissance par groupe pour chaque année (section 3.2.).

1.4.4. Développement des modèles statistiques selon Σdc

La variable dépendante utilisée dans le développement des modèles statistiques est la somme des plus longs débits clairs pour chacune des quatre faces (Σdc , cm) (Gagné et al., 2013). La qualité des tiges a donc été traitée comme une variable continue. Ce choix est inspiré du lien qui existe entre l'évaluation des faces proposée par la classification ABCD et la qualité de sciage des billes de feuillus de haute qualité (Gagné et al., 2013). Comme pour la classification ABCD, l'analyse s'est concentrée sur le premier tronçon de 5 m de la tige.

Des modèles linéaires mixtes ont été développés séparément pour les arbres juvéniles et matures avec les packages respectifs « lme4 » et « stats » (Bates et al., 2015; R Development Core Team, 2020). Des packages différents ont été utilisés étant donné la présence d'un effet aléatoire pour les arbres juvéniles. En effet, le bloc a été considéré comme un effet aléatoire pour les arbres juvéniles conformément à la méthode d'échantillonnage. Pour les arbres matures aucun effet aléatoire ne s'est montré significatif, vu l'utilisation de seulement deux sites d'échantillonnage, donc l'effet aléatoire du bloc pour les arbres matures a été retiré. Les premières étapes de l'analyse visaient à sélectionner différentes variables indépendantes dendrométriques et dendrochronologiques, lesquelles ont permis de construire différents modèles statistiques (Tableau 1). Pour évaluer l'importance des variables explicatives, les modèles ont été comparés en utilisant le critère d'information d'Akaike (AICc) (Burnham et Anderson 2002). Cette statistique a guidé le développement des modèles en équilibrant l'ajustement (*i.e.*, *log-likelihood*) et la parcimonie (*i.e.*, *number of parameters*) pour chaque modèle. Afin d'éviter un ajustement excessif et un effet parasite, un nombre limité de modèles a été utilisé pour tester l'hypothèse (Anderson 2008; Burnham & Anderson 2002).

1.4.4.1. Modèles bouleaux jaunes matures

Nous avons développé et comparé 20 modèles multi-niveaux pour les bouleaux jaunes matures afin d'identifier les principaux facteurs liés à la variable Σdc . Le premier groupe de modèles incluait des caractéristiques individuelles d'arbres comme la hauteur relative, c'est-à-dire la hauteur relative, c'est-à-dire la hauteur de l'arbre par rapport à la hauteur moyenne du couvert dominant (*hauteur* ÷ *hauteur moyenne* × 100, cm), l'âge (*i.e.*, âge cambial à 1m) et le DHP (mm) (Tableau 2). Ces variables sont connues pour avoir une relation sigmoïdale avec la qualité du bouleau jaune (Gagné et al., 2013; Moreau et al., 2018; Pothier et al., 2013).

Tableau 2 : Liste des variables explicatives utilisées dans le développement des modèles.

Variable	Description
Arbres matures	
hauteurR	Hauteur relative de l'arbre par rapport à la hauteur moyenne du couvert dominant (cm)
age	Âge cambial à 1 m du sol
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine (mm)
mean	Moyenne de croissance annuelle (mm/an) des 20 premières années
meanFIN	Moyenne de croissance annuelle (mm/an) des 20 dernières années
beta	Régression de la croissance des années 5 à 25
betaFIN	Régression de la croissance des 20 dernières années
BAI20	Moyenne de croissance annuelle en surface terrière (cm ² /an) des 20 premières années
BAIFin	Moyenne de croissance annuelle en surface terrière(cm ² /an) des 20 dernières années
Ndetente	Nombre d'épisodes de détente des 20 premières années
NdetenteFIN	Nombre d'épisodes de détente des 20 dernières années
MeanV5Abs	Moyenne absolue de PGC (pourcentage de changement de la croissance radiale) avec fenêtre de 5 ans
MeanV5	Moyenne de PGC (pourcentage de changement de la croissance radiale) avec fenêtre de 5 ans
SCSD	Somme des PGC (pourcentage de changement de la croissance radiale) avec fenêtre de 5 ans
Arbres juvéniles	
hauteurR	Hauteur relative de l'arbre par rapport à la hauteur moyenne du couvert dominant (cm)
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine (DHP; cm)
rhM	Rayon moyen du houppier (cm)
betaJ	Régression de la croissance totale
BAI	Moyenne de croissance annuelle en surface terrière (cm ² /an)
MV5	Moyenne de PGC avec fenêtre de 5 ans
SCSD	Somme des PGC avec fenêtre de 5 ans

Un deuxième groupe de modèles a été créé pour caractériser l'accroissement en surface terrière des arbres matures (Tableau 2). Les variables explicatives « beta » et « betaFIN » représentaient les pentes de régression de la croissance radiale (mm/an) des 20 premières années et des 20 dernières années. Ces pentes sont des régressions linéaires appliquées à une série de cernes comptant 20 ans. Ces variables caractérisent la tendance de croissance juvénile et finale des arbres. Les variables explicatives « BAI20 » et « BAIFin » représentent l'accroissement annuel moyen en surface terrière (cm²/an) des 20 premières années et des 20 dernières années.

Un troisième groupe de modèles a été créé pour caractériser la variabilité de croissance de l'arbre. Le nombre de détentes totales par individu (Ndetente) et le nombre de détentes par individu durant les 20 dernières années (NdetenteFIN) ont été dérivés de l'accroissement annuel des cernes de croissance (cm²/an) selon la méthode « détente limite » de Black et Abrams (2004) avec une fenêtre de 5 ans et des seuils de 20 % pour les détentes modérées et un seuil de 50% pour les détentes prononcées. Une fenêtre de 5 ans a été utilisée pour observer davantage de variation annuelle et pour avoir une détection plus étendue des détentes sur la période de croissance, c'est-à-dire 5 ans de moins qu'avec une fenêtre recommandée de 10 ans (Moreau et al., 2019). Comme Black et al. (2009) suggèrent qu'un minimum de 50 000 échantillons soit mesuré pour développer la « détente limite » d'une espèce, nous avons utilisé le jeu de données assemblé par le laboratoire de dendrochronologie de l'Université Laval contenant plus de 50 000 mesures (Laboratoire de dendrochronologie

du Centre d'études nordiques (Université Laval, 2021). Ce jeu de données provient de plusieurs sites situés au sud du Québec.

D'autres indices de variabilité de croissance ont été créés à l'aide de la méthode de Nowacki et Abrams (1997). Cette méthode consiste à calculer le pourcentage de changement de la croissance radiale (PGC, mm/an) :

$$PGC = \left(\frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \right) * 100$$

Ici aussi nous avons utilisé une fenêtre de 5 ans afin de pouvoir observer une plus grande variabilité annuelle. Donc, M_1 correspond à la moyenne de croissance radiale des 5 années avant l'année d'intérêt, et M_2 est la moyenne de croissance radiale des 5 années après l'année d'intérêt. Pour les variables « MeanV5Abs » et « MeanV5 », nous avons calculé la moyenne des PGC de chaque année, le premier en valeur absolue et le deuxième en valeur exacte. Pour la variable « Somme des PGC = SCSD », nous avons additionné les PGC de chaque année pour chaque arbre.

1.4.4.2. Modèles bouleaux jaunes juvéniles

Nous avons développé et comparé 20 modèles multi-niveaux pour les bouleaux jaunes juvéniles afin d'identifier les principaux facteurs liés à la variable Σdc . Le premier groupe de modèles incluait les caractéristiques individuelles d'arbres suivantes: hauteur relative, DHP (mm) et rayon moyen du houppier (rhm; cm). Les deux premières variables sont connues pour être associées avec la qualité du bouleau jaune (Gagné et al., 2013; Moreau et al., 2018, Pothier et al., 2013).

Un deuxième groupe de modèles a été créé pour caractériser la croissance de l'arbre. La variable explicative « beta » représentait la pente de régression de la croissance (mm/an) totale. Ces pentes sont des régressions linéaires appliquées à une série de cernes comptant entre 14 et 18 ans. La variable explicative « BAI » représente la moyenne d'augmentation de la surface terrière (cm²/an) des tiges juvéniles.

Un troisième groupe de modèles a été créé pour caractériser la variabilité de croissance de l'arbre. De la même façon que pour les bouleaux jaunes matures, nous avons utilisé le PGC (Nowacki & Abrams, 1997) sur une fenêtre de 5 ans pour quantifier la variabilité de croissance des tiges juvéniles. Les variables « MV5 » et « SCSD » ont été calculés de la même façon pour les tiges juvéniles.

1.4.4.3. Modèle nul et sélection du meilleur modèle

Un modèle nul a été ajouté aux deux groupes de modèles afin de s'assurer qu'ils ne performaient pas mieux que les modèles plus complexes. Un sommaire de toutes les variables est présenté dans le Tableau 2. La corrélation entre les variables a été vérifiée durant la construction des modèles en utilisant le facteur

d'inflation de la variance (VIF) (Zuur et al., 2010). Les postulats des modèles linéaires ont été vérifiées et aucun problème majeur n'a été détecté. La distribution de la variable Σ_{dc} des tiges matures et juvéniles n'est pas normale étant donné le petit échantillonnage. Toutefois, on suppose une distribution normale vu la nature continue de celle-ci. Tous les modèles sélectionnés ont montré des distributions d'erreurs normales, des variances homogènes et aucune valeur extrême. Pour simplifier l'interprétation et pour limiter le nombre de modèles, seulement les effets additifs ont été considérés (*i.e.*, pas d'interactions). Avant de comparer les modèles, nous nous sommes assurés que tous les échantillons ne présentaient pas de données aberrantes. Les modèles ont été sélectionnés à l'aide du package R AICcmoavg (Mazerolle 2020). Ce qui a permis de négocier dans l'incertitude du choix du meilleur modèle en utilisant la technique de la moyenne des modèles (*model averaging/multimodel inference*). Le package calcule le poids de l'estimation de la prédiction d'une variable prédictive dans tous les modèles sélectionnés. Le poids de l'estimation du paramètre est donné par les probabilités du modèle, lesquelles sont dérivées du poids d'Akaike (w_i). Pour une description plus détaillée de cette méthode, se référer à Burnham et Anderson (2002) ou Mazerolle (2006).

2. Résultats

2.1. Différence entre les traitements de coupe

2.1.1. Effet de la taille des ouvertures sur la composition et la densité des gaules

La composition et la densité des tiges situées dans les ouvertures des traitements de coupe sont présentées au Tableau 3. La densité des tiges par espèce selon les trouées a été différente pour l'érable à épis (ERE) et le cerisier de Pennsylvanie (PRP). En effet, la densité de l'ERE était plus élevée dans le parquet que dans les autres traitements, alors que la densité du PRP était plus élevée dans la trouée 2H et le parquet que dans le témoin (Figure 2). Ainsi, les parquets étaient dominés par l'ERE, l'érable rouge (ERR) et le PRP en 2011. Plus de 20 ans après traitement, l'étude des cellules de compétition montrait plutôt que les parquets étaient essentiellement composés de bouleau jaune et de cerisier de Pennsylvanie (Tableau 4).

Tableau 3 : Composition et densité moyenne (ti/ha) des gaules avec écart-type par espèce (bouleau jaune (BOJ), cerisier de Pennsylvanie (PRP), érable rouge (ERR), érable à sucre (ERS), peupliers (PEUP), bouleau à papier (BOP), sapin baumier (SAB), érable de Pennsylvanie (ERP) et érable à épis (ERE)) dans les parcelles de dénombrement (n=80) selon le traitement de coupe 1H, 1.5H, 2H, parquet (PAR) et témoin (TEM) en 2011.

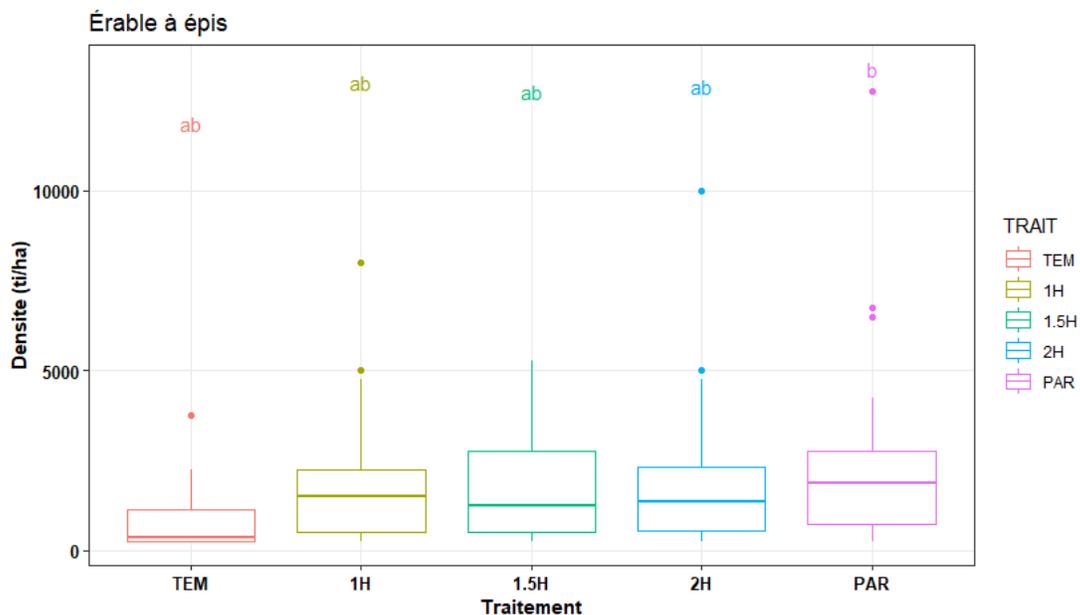
Traitement	Densité moyenne (ti/ha)									Total
	BOJ	PRP	ERR	ERS	PEUP	BOP	SAB	ERP	ERE	
1H	525 ±	760 ±	550 ±	292 ±	0 ± 0	125 ±	312 ±	781 ±	1789 ±	5134
	531	670	497	485		177	116	891	1606	
1.5H	750 ±	920 ±	875 ±	562 ±	0 ± 0	375 ±	250 ±	214 ±	1671 ±	5617
	797	564	520	826		177	0	267	1342	
2H	682 ±	1458 ±	1118 ±	458 ±	63 ±	0 ± 0	200 ±	150 ±	1943 ±	6071
	623	1312	830	679	125		209	224	2224	
PAR	977 ±	1185 ±	1528 ±	1000 ±	812 ±	850 ±	404 ±	833 ±	2812 ±	10401
	1139	1212	2229	2000	1125	627	240	382	2992	
TEM	250 ±	0 ±	500 ±	125 ±	0 ± 0	0 ± 0	361 ±	438 ±	847 ±	2521
	0	0	433	250			18	259	967	

Tableau 4 : Composition et densité moyenne (ti/ha) avec écart-type par espèces dans les cellules de compétition (n=40) des parquets en 2020.

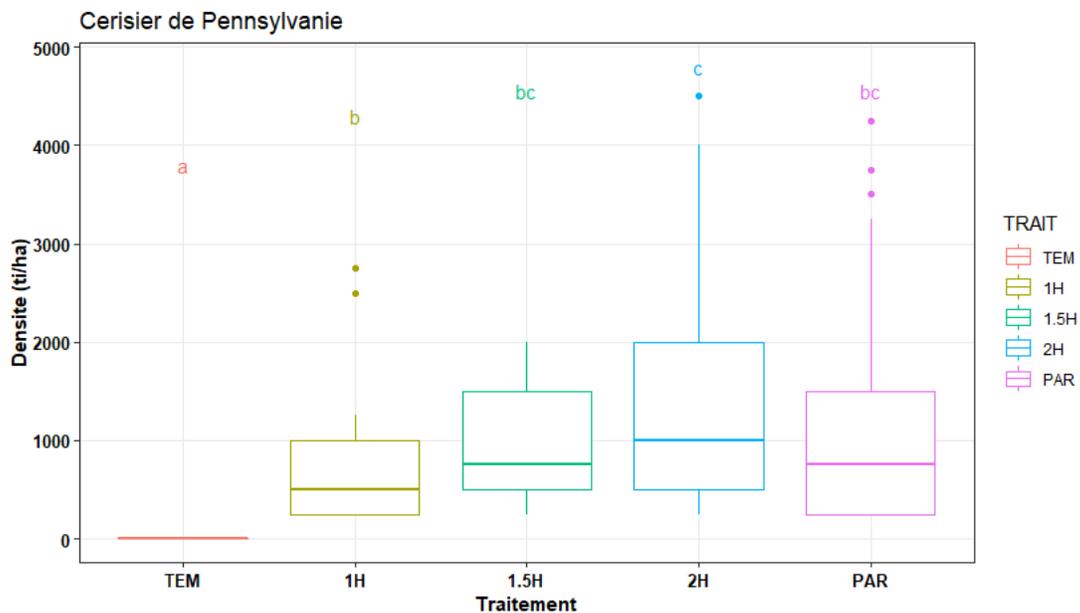
	BOJ	PRP	ERR	ERS	PEUP	BOP	SAB	ERP	ERE	Total
Densité (tige/ha)	1022 ±	920 ±	172 ±	16 ±	33 ±	75 ±	39 ±	48 ±	0 ± 0	2324 ±
	777	629	311	104	125	183	131	137		1143
Proportion (%)	43.4	40.44	7.50	0.28	1.95	2.63	1.41	2.39	0	100

Figure 2: A) Densité (ti/ha) selon le traitement (trouées 1H = 20 m de diamètre, trouées 1.5H = 30 m de diamètre, trouées 2H = 40 m de diamètre, PAR = parquet, TEM = témoin), des gaules d'érable à épis A) et des gaules de cerisier de Pennsylvanie dans les parcelles de dénombrement du dispositif SSAM I (n=80) 12 ans après la coupe. Pour chaque traitement, les différentes lettres indiquent une différence significative de densité selon le traitement.

A)



B)



2.1.2. Effet de la taille des ouvertures du couvert sur le DHP

Le DHP moyen des 350 gaules de bouleau jaune variait selon les traitements : témoin = 65 ± 27 mm, 1H = 74 ± 34 mm, 1.5H = 77 ± 33 mm, 2H = 86 ± 35 mm et parquet = 95 ± 33 mm. Seulement les traitements 2H et parquet avaient un DHP significativement plus grand que le témoin. De plus, les DHP étaient plus grands dans les parquets que dans les patrons avec trouées 1H et 1.5H, alors que les trouées 1H et 1.5H ne différaient pas du témoin (Figure 3A). Le DHP moyen tendait à augmenter avec la taille des ouvertures.

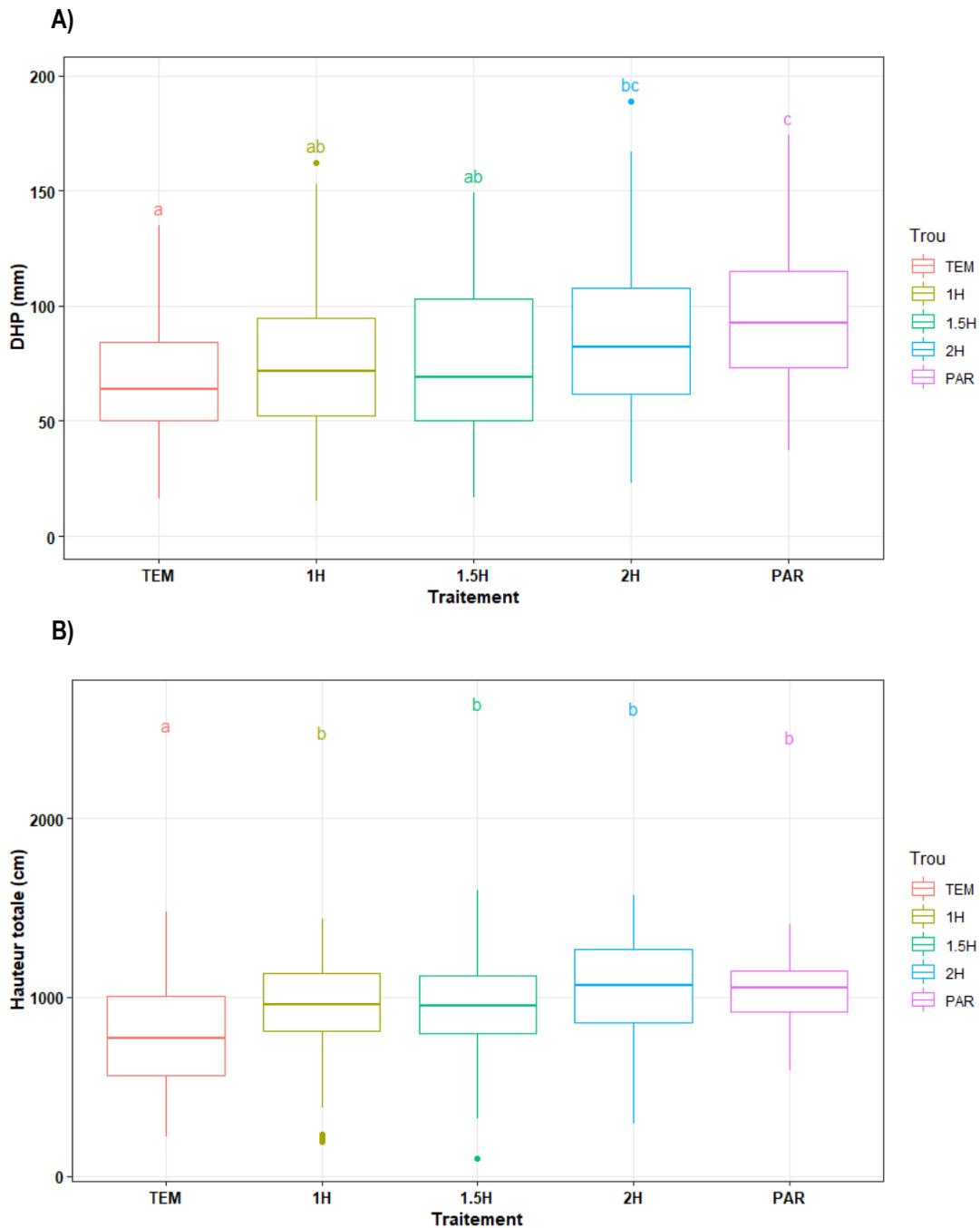
2.1.3. Effet de la taille des ouvertures du couvert sur la hauteur

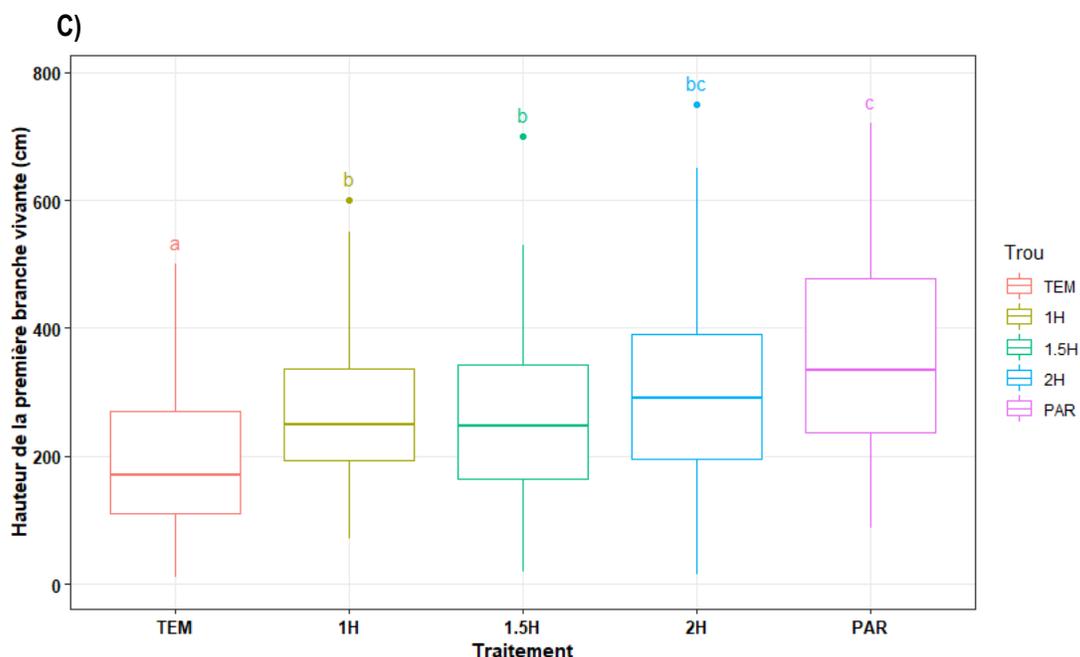
La hauteur totale moyenne des gaules à l'étude variait selon les traitements: témoin = 801 ± 301 cm, 1H = 936 ± 290 cm, 1.5H = 957 ± 290 cm, 2H = 1061 ± 249 mm et parquet = 1036 ± 192 cm. Les traitements étaient tous différents du témoin, alors qu'entre eux, aucune différence n'était observée (Figure 3B). En effet, les bouleaux jaunes à l'étude étaient plus hauts dans tous les traitements de coupe que dans le témoin.

2.1.4. Effet de la taille des ouvertures du couvert sur la première branche vivante

La hauteur de la première branche vivante des gaules avait une moyenne qui variait selon les traitements: témoin = 186 ± 105 cm, 1H = 269 ± 118 cm, 1.5H = 256 ± 129 cm, 2H = 313 ± 153 cm et parquets = 352 ± 149 cm. Les traitements étaient tous différents du témoin, alors qu'entre les autres traitements, des différences étaient observées seulement entre le parquet et les trouées 1H, et le parquet et les trouées 1.5H. En effet, la première branche vivante des bouleaux jaunes à l'étude a été plus haute dans tous les traitements de coupe que dans le témoin. De plus, on observe que la hauteur de la première branche vivante tend à augmenter avec la taille de la trouée (Figure 3C).

Figure 3 : A) DHP (mm), B) hauteur totale (cm) et C) hauteur de la première branche vivante (cm) pour les gaules de bouleau jaune (n=350) dans les 5 traitements de coupe du dispositif SSAM I (trouées 1H = 20 m de diamètre, trouées 1.5H = 30 m de diamètre, trouées 2H = 40 m de diamètre, PAR = parquet 100 m x 100 m, TEM = témoin). Pour chaque traitement, les différentes lettres indiquent une différence significative entre la taille des trouées.





2.1.5. Analyse de corrélation des variables de qualité substitut

Le test de corrélation de Pearson a démontré que la hauteur de la plus basse branche vivante était la variable la plus corrélée avec Σdc (0.87, p-value = 2.22e-13). La hauteur du fût avait également une forte corrélation (0.74, p-value = 3.261e-08). La hauteur totale était, elle aussi, corrélée à cette variable (0.58, p-value = 6.649e-05) alors que le DHP ne l'était pas (-0.08, p-value = 0.61). Le test de corrélation de Pearson confirmait ainsi la significativité des variables de qualité substitut qu'étaient la hauteur de la plus basse branche vivante, la hauteur du fût et la hauteur totale pour les 350 gaules à l'étude.

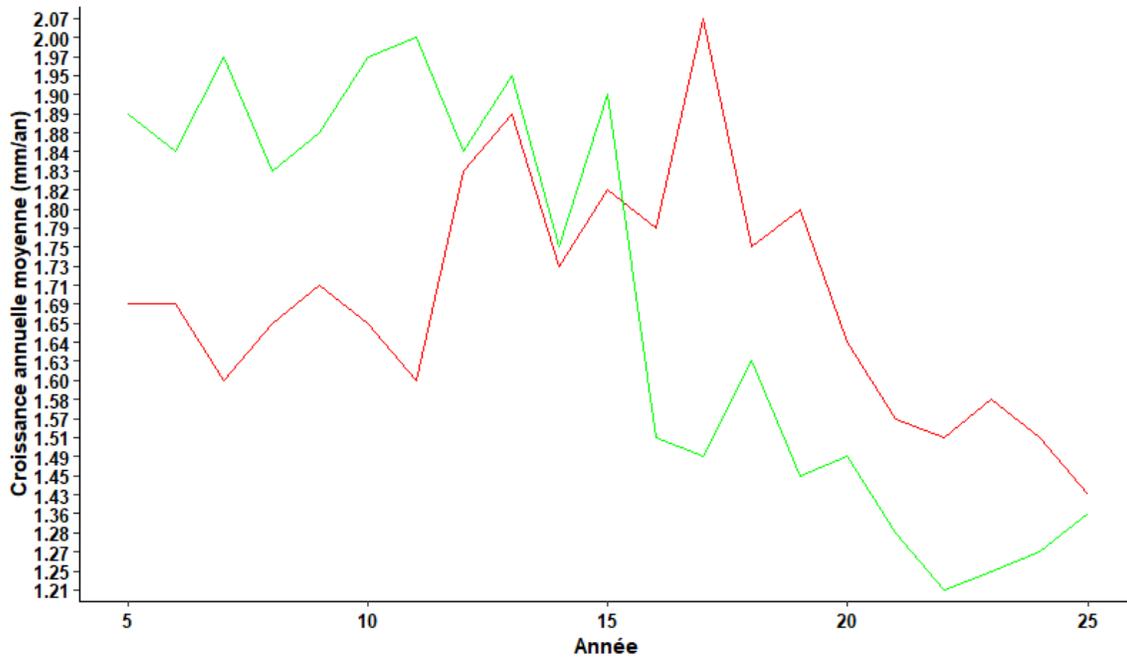
2.2. Arbres matures

2.2.1. Caractérisation de la croissance juvénile des bouleaux jaunes matures

L'analyse visuelle de la figure 4 montre que les tiges matures présentant une régression négative pendant l'intervalle 5-25 ans ont eu une croissance plus rapide lors de 10 premières années suivie d'une croissance ralentie, voire plus lente que la régression positive, par la compétition lors des 15 dernières années de l'intervalle 5-25 ans. Les tiges matures présentant une régression positive ont eu une croissance plus stable du début à la fin de l'intervalle 5-25 ans. On observe une perte de rapidité de la croissance autour de l'année 15 pour les tiges avec une régression négative de croissance, ce qui peut être expliqué par l'augmentation d'une compétition horizontale des arbres voisins dominants qui ont grandi dans la même perturbation. Ce stade de développement du peuplement se caractérise par une phase d'autoéclaircie, ce phénomène s'observe par

les différences de densité des tiges à l'année 11 (Figure 3) et l'année 20 (Figure 4) dans les parquets de SSAM I. Toutefois, ces données sont difficilement comparables, car elles n'ont pas été créées pour caractériser les mêmes variables.

Figure 4 : Croissance annuelle moyenne des bouleaux jaunes matures (n=42) groupés selon la valeur positive (rouge) ou négative (vert) de la régression de croissance individuelle au cours de l'intervalle 5-25 ans (mm/an).



2.2.2. Modélisation de Σ_{dc} pour les arbres matures

Des 42 arbres matures, 8 tiges présentaient une valeur de Σ_{dc} de 2000, c'est-à-dire aucun défaut sur les 5 premiers mètres de la tige. La moyenne de Σ_{dc} était de 1616 ± 356 cm et l'âge moyen était de 88 ± 34 ans.

Selon le critère de Akaike le meilleur modèle pour prédire la valeur de Σ_{dc} des tiges matures était le modèle 6 ($AICc = 607.35$, $w_i = 0.33$) qui inclut les catégories de variables à l'échelle de l'arbre et de croissance (hauteurR + beta + meanFIN). Les estimations des paramètres sont présentées dans le Tableau 5. Toutefois plusieurs autres modèles avaient des valeurs d' $AICc$ similaires (Tableau 3). Les modèles 4 ($AICc = 608.94$, $w_i = 0.15$), 5 ($AICc = 609.84$, $w_i = 0.09$), 18 ($AICc = 609.88$, $w_i = 0.09$), 11 (609.95 , $w_i = 0.09$) et 9 ($AICc = 610.01$, $w_i = 0.09$) avaient suffisamment de support empirique pour être sélectionnés comme meilleur modèle. En utilisant l'inférence des modèles, nous avons confirmé que les variables suivantes n'avaient pas suffisamment

d'importance statistique pour être retenues comme variables significatives: betaFIN (CI = -1.29 à 1.70), meanFIN (CI = -0.25 à 0.07), age (CI = -1.09 à 1.21), MeanV5Abs (CI = -2.63 à 3.01) et BAI20 (CI = -0.08 à 0.09). Les modèles concurrents avaient tous la même structure de base que le modèle 6, mais contenaient 1 ou 2 variables explicatives additionnelles différentes. La pondération du poids statistique des modèles a montré que l'ajout des variables betaFIN, meanFIN, age, MeanV5Abs et BAI20 n'amélioraient pas l'ajustement du modèle. L'inférence des modèles a pu nous confirmer que les variables hauteurR (CI = 669.69 – 3395.61) et beta (CI = -3.79 – -0.28) étaient les seules ayant un effet significatif sur Σ_{dc} (Figure 5). Donc, nous avons pu conclure que le meilleur modèle est le modèle 4 (hauteurR + beta). Le R^2 ajusté du modèle 4 était de 0.24. De plus, l'analyse de la figure 5 montre que la somme des débits clairs des bouleaux jaunes juvéniles a diminué avec une régression positive dans la période de croissance 5-25 ans (Figure 5A), mais qu'elle a augmenté avec la hauteur relative des arbres (Figure 5B).

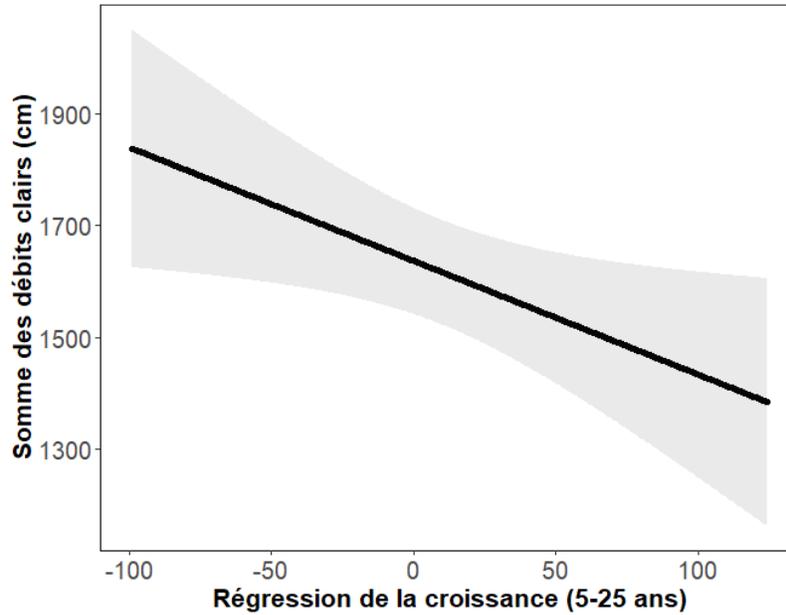
Tableau 5 : Comparaison des modèles de régressions linéaires multiples selon Σ_{dc} pour les tiges matures.

Regroupement	Variables explicatives	ID	Log-likelihood	K	AICc	Δi	w_i
Arbres matures	age	1	-305.4011	3	617.43	10.08	0.00
	age + DHP	2	-304.2997	4	617.68	10.33	0.00
	age + DHP + hauteur	3	-301.6497	5	614.97	7.61	0.01
Arbres matures + croissance	hauteurR + beta	4	-299.9305	4	608.94	1.59	0.15
	hauteurR + beta + betaFIN	5	-299.0874	5	609.84	2.49	0.09
	hauteurR + beta + meanFIN	6	-297.8435	5	607.35	0.00	0.33
	hauteurR + BAI20 + betaFIN	7	-301.1121	5	613.74	6.54	0.01
	hauteurR + BAI20 + beta + betaFIN	8	-298.8828	6	612.17	4.81	0.03
	hauteurR + BAI20 + beta + meanFIN	9	-297.8053	6	610.01	2.66	0.09
	hauteurR + age + BAI20 + meanFIN	10	-300.232	6	614.86	7.51	0.01
	hauteurR + age + beta + meanFIN	11	-297.7756	6	609.95	2.60	0.09
Arbres matures + croissance + variabilité	hauteurR + beta + Ndetente + SCSD	12	-299.6276	6	613.66	6.30	0.01
	hauteurR + beta + NdetenteFin + SCSD	13	-299.6702	6	613.74	6.39	0.01
	hauteurR + beta + NdetenteFin + MeanV5	14	-299.7684	6	613.94	6.58	0.01
	hauteurR + beta + NdetenteFin + MeanV5Abs	15	-299.5285	6	613.46	6.10	0.02
	hauteurR + beta + BAIFin + Ndetente + MeanV5	16	-298.1037	7	613.50	6.15	0.02
	hauteurR + BAI20 + BAIFin + Ndetente	17	-300.2929	6	614.99	7.63	0.01
	hauteurR + beta + meanFIN + MeanV5Abs	18	-297.7402	6	609.88	2.53	0.09
Intercept	hauteurR + beta + betaFin + MeanV5Abs	19	-299.0855	6	612.57	5.22	0.02
	Null	20	-305.9089	2	616.13	8.77	0.00

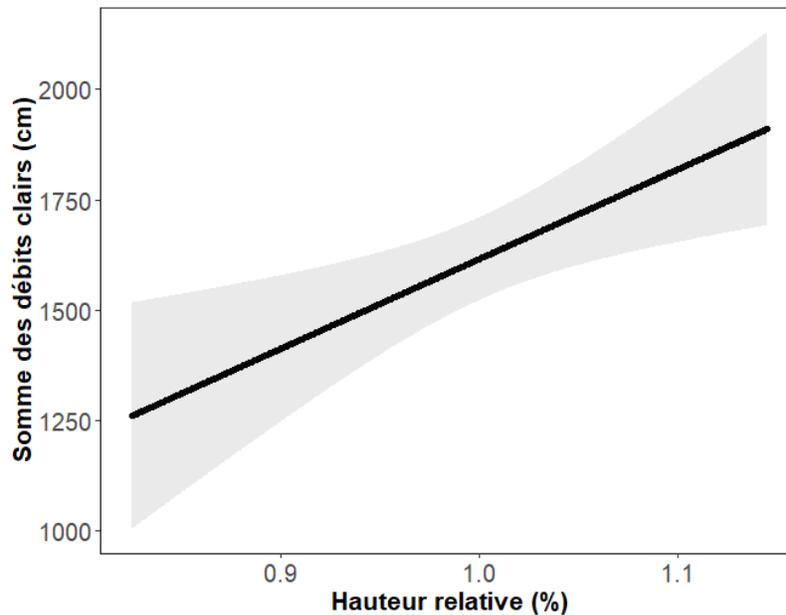
Note: ID est le numéro du modèle, K est le nombre total de paramètres incluant les intercepts et les variables aléatoires pour chaque modèle, Δi est la différence d'AICc avec le meilleur modèle et w_i est le ratio de Δi pour un modèle donné en le comparant à l'ensemble des modèles. Une description des variables utilisées est donnée au Tableau 2.

Figure 5 : Prédiction des moyennes de modèles des paramètres significatifs pour les bouleaux jaunes matures avec un intervalle de confiance de 95% pour la somme des débits clairs (Σdc) : A) régression de la croissance des années 5 à 25 (variable beta) et B) hauteur relative de l'arbre par rapport à la hauteur moyenne du couvert dominant (hauteurR), avec un intervalle de confiance de 95% pour la somme des débits clairs (Σdc) des bouleaux jaunes matures.

A)



B)



2.3. Arbres juvéniles

2.3.1. Modélisation de Σ_{dc} pour les arbres juvéniles

Des 40 arbres juvéniles, toutes les tiges présentaient au moins 1 défaut. La moyenne de Σ_{dc} était de 1371 ± 360 cm et l'âge moyen de 17 ± 1 an. L'indice Σ_{dc} était corrélé à la hauteur relative (hauteur R) et au rayon de houppier moyen (rhm) des tiges juvéniles (Figure 6).

Selon le critère d'Akaike, le meilleur modèle pour prédire la valeur de Σ_{dc} des tiges juvéniles était le modèle 18 (AICc = 536.17, $w_i = 0.48$) qui inclut les catégories de variables à l'échelle de l'arbre, de croissance et de la variabilité (hauteurR + betaJ + MV5 + ST_boj + rhm) (Tableau 6). Toutefois, plusieurs autres modèles avaient des valeurs d'AICc similaire. Les modèles 19 (AICc = 537.04, $w_i = 0.31$) et 17 (AICc = 538.72, $w_i = 0.13$) avaient suffisamment de support empirique pour être sélectionnés comme meilleur modèle. Les estimations des paramètres sont présentées dans le Tableau 6. En utilisant l'inférence des modèles, nous avons confirmé que les variables rhm (CI = -5.33 – - 0.87) et hauteurR (CI = 610.82 – 2325.10) avaient un effet significatif sur Σ_{dc} (Figure 6). Toutefois, les variables MV5 (CI = -4.27 – 1.00) et betaJ (CI = -0.96 – 2.14) et ST_boj (CI = -20.81 – 51.54) n'avaient pas suffisamment d'importance statistique pour être retenues. La pondération du poids statistique des modèles (model averaging) a montré que l'utilisation des 2 variables améliorait l'ajustement du modèle. Donc, nous avons pu conclure que le meilleur modèle est le modèle 11 (hauteurR + rhm). Le R^2 ajusté du modèle 11 était de 0,51. De plus, l'analyse de la figure 6 montre que la somme des débits clairs des bouleaux jaunes juvéniles a augmenté avec la hauteur relative des arbres (Figure 6A), mais celle-ci a diminué avec la taille du rayon de houppier moyen (Figure 6B).

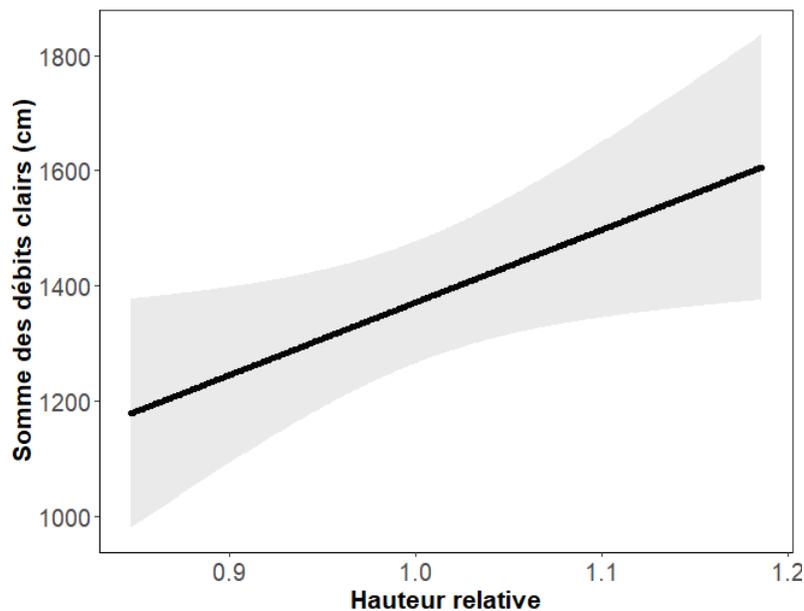
Tableau 6 : Comparaison des modèles de régression linéaire multiple selon la somme des débits clairs (Σdc) pour les tiges juvéniles de bouleau jaune.

Regroupement	Variables explicatives	ID	Log-likelihood	K	AICc	Δi	w_i
Compétition	Schütz	1	-276.0487	4	561.24	25.07	0.00
	ST_boj	2	-277.6468	4	564.44	28.26	0.00
	ST_prp	3	-279.4357	4	568.01	31.84	0.00
	hauteurR + ST_prp	4	-266.8735	5	545.51	9.34	0.00
	hauteurR + ST_boj	5	-267.7162	5	547.20	11.02	0.00
Croissance	MV5	6	-279.6911	4	568.52	32.35	0.00
	Rhm	7	-272.7903	5	557.35	21.17	0.00
	BetaJ	8	-282.1387	4	573.42	37.25	0.00
	BetaJ + MV5	9	-278.2250	5	568.21	32.04	0.00
	BetaJ + MV5 + ST_boj	10	-271.6149	6	557.35	21.60	0.00
	Rhm + hauteurR	11	-267.13	5	546.03	9.86	0.00
Compétition + croissance	hauteurR + MV5	12	-268.5559	5	548.88	12.70	0.00
	hauteurR + BetaJ	13	-271.1309	5	554.03	17.85	0.00
	hauteurR + BetaJ + MV5	14	-267.3758	6	549.30	13.12	0.00
	hauteurR + BetaJ + MV5 + ST_boj	15	-262.1160	7	541.73	5.56	0.03
	hauteurR + BetaJ + MV5 + ST_prp	16	-262.1307	7	554.76	5.59	0.03
	hauteurR + BetaJ + MV5 + Schutz	17	-260.6124	7	538.72	2.55	0.13
	hauteurR + BetaJ + MV5 + ST_boj + rhm	18	-257.7639	8	536.17	0.00	0.48
hauteurR + BetaJ + MV5 + ST_prp + rhm	19	-258.1949	8	537.04	0.86	0.31	
Intercept	Null	20	-283.7108	3	574.09	37.92	0.00

Note: ID est le numéro du modèle, K est le nombre total de paramètres incluant les intercepts et les variables aléatoires pour chaque modèle, Δi est la différence d'AICc avec le meilleur modèle et w_i est le ratio de Δi pour un modèle donné en le comparant à l'ensemble des modèles. Une description des variables utilisées est donnée au Tableau 2.

Figure 6 : Prédiction des moyennes de modèles des paramètres significatifs pour les bouleaux jaunes juvéniles, avec un intervalle de confiance de 95% pour la somme des débits clairs (Σdc) : A) hauteur relative par rapport à la hauteur moyenne du couvert dominant (hauteurR) et B) rayon du houppier moyen (rh_m).

A)



B)

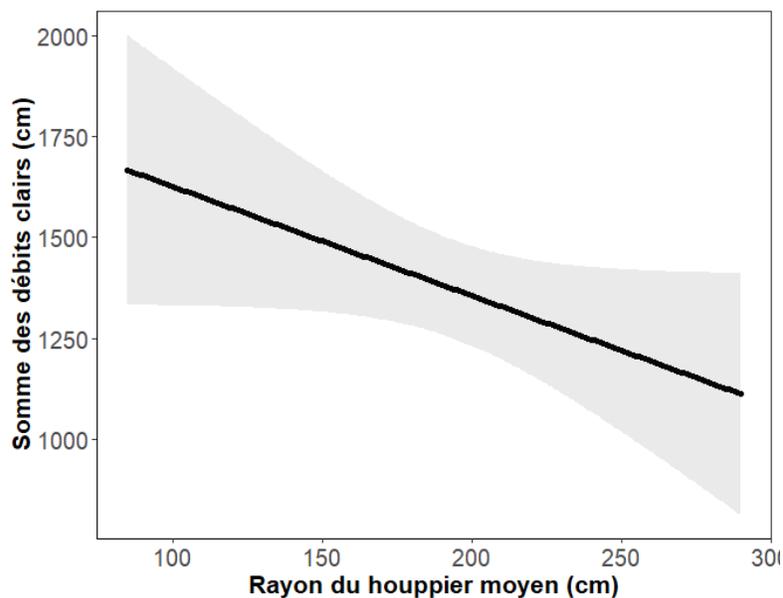


Tableau 7. Estimation des paramètres et de leur erreur standard (\pm SE) des variables significatives finales qui permettent d'estimer la valeur de Σdc .

Paramètres	Description variable	Arbres matures	Arbres juvéniles
hauteurR	Hauteur relative de l'arbre par rapport à la hauteur moyenne du couvert dominant (sans unité)	2032.65 \pm 695.40	1467.96 \pm 437.32
beta	Régression de la croissance radiale des années 5 à 25 (sans unité)	-2.03 \pm 0.90	-
rhm	Rayon de houppier moyen (cm)	-	310.00 \pm 114.00

3. Discussion

3.1. Qualité des tiges de bouleau jaune

Les résultats de l'étude supportent l'hypothèse que le patron de croissance juvénile optimal est observé lorsque le bouleau jaune subit suffisamment de compétition latérale pour favoriser à la fois une croissance verticale et un élagage naturel de ses branches basses. L'hypothèse de départ est supportée pour les tiges matures et juvéniles. De plus, l'analyse des variables de qualité substitut permet d'évaluer que la qualité des tiges de bouleau jaune semble plus élevée dans les trouées de grande taille (2H et parquet).

La hauteur relative des tiges matures et juvéniles explique en partie la variation de qualité des tiges (Σdc) (Figures 5 et 6). En effet, plusieurs études (Baral et al., 2016; Canham, 1985, 1990; Castle et al., 2018; Giroud et al., 2008) démontrent que la qualité des tiges est dépendante de la position hiérarchique de l'arbre dans la canopée, soit la hauteur relative. Comme le proposent Baral et al. (2016), l'effet négatif de la hauteur relative des arbres sur la qualité des billes peut être expliqué par une durée d'oppression plus longue associée à un déclin de vigueur, une augmentation des risques de blessures à la tige et une croissance apicale non linéaire. En effet, Baral et al. (2016) ont démontré qu'à la suite d'une longue période d'oppression les érables à sucre et les bouleaux jaunes dominés ont un potentiel de détente de croissance moins important. Cette tendance est expliquée par différents facteurs, notamment l'âge des arbres puisque les arbres opprimés sont généralement plus vieux pour un même diamètre (Baral et al., 2016; Ryan et al., 1997).

La vigueur des arbres est aussi un facteur significatif puisque les arbres moins vigoureux sont souvent associés à des blessures ou à des défauts causés par une croissance apicale non linéaire (Duchesne et al., 2002). De plus, Baral et al. (2016) démontrent que l'érable à sucre, une espèce tolérante à l'ombre, présente un potentiel de détente de croissance supérieure au bouleau jaune, une espèce à tolérance intermédiaire à l'ombre, après une période d'oppression de 50 ans. Duchesne et Prévost (2013) suggèrent eux aussi que la tolérance intermédiaire à l'ombre du bouleau jaune est un facteur limitant son potentiel de détente de croissance en forêt inéquienne vu la faible intensité des perturbations qui y sont associées.

Ces affirmations et nos résultats suggèrent que le bouleau jaune doit subir le moins possible de longue période d'oppression afin d'optimiser la production de tiges de qualité. En d'autres mots, on doit favoriser sa présence dans le couvert dominant pour optimiser le potentiel de qualité des tiges (Baral et al., 2016; Duchesne & Prévost, 2013). Les résultats des variables de qualité substituts de la présente étude appuient ces propos en affichant une qualité de tige supérieure dans les ouvertures de grandes tailles (2H et parquet). Nos résultats suggèrent que les trouées de plus petites tailles présentent des conditions moins idéales pour le développement de tiges de qualité chez le bouleau jaune, car leur croissance et leur accès au couvert dominant sont limités par l'accès

à la lumière et la nature de la compétition. Des résultats similaires ont aussi été observés par Shields (2007) et Prévost et Charrette (2015). Prévost et Raymond (2012) ont d'ailleurs mesuré la variation d'intensité lumineuse reçue dans les différentes grosseurs de trouées, pour en conclure que les patrons de coupe 1H et 1.5H créent un environnement lumineux plus avantageux pour les espèces tolérantes à l'ombre, alors que l'inverse est observé dans le parquet où une plus grande quantité d'espèces intolérantes à l'ombre sont présentes.

Nos observations concordent en partie avec ces affirmations. En effet, la densité de cerisier de Pennsylvanie, une espèce intolérante à l'ombre, a été plus importante dans les parquets, alors qu'aucune différence significative n'a été mesurée pour les espèces tolérantes à l'ombre. Toutefois, en 2020, nous avons observé que dans les parquets en 2020 plus de 80% des tiges étaient composées de bouleau jaune et de cerisier de Pennsylvanie avec une densité totale de 2324 ± 1143 ti/ha. De plus, le cerisier de Pennsylvanie ne semble pas avoir d'effet négatif sur la qualité puisque la moyenne de Σdc est de 1371 ± 360 cm, ce qui représente une bonne qualité de tige (Gagné et al., 2013). De 2011 à 2020, nous avons aussi observé que la densité moyenne des tiges dans les parquets est passée de 10 401 à 2324 ti/ha. Il faut savoir que la densité des tiges dans les cellules de compétition peut comporter un biais étant donné la sélection systématique d'une tige de bouleau jaune comme point central de cellule de compétition dans le but de caractériser l'environnement immédiat de celle-ci. Par ailleurs, sachant que le cerisier de Pennsylvanie a une espérance de vie d'environ 30 ans (Jobidon, 1995) et qu'il peut contribuer à l'éducation du bouleau jaune (Ristau & Horsley, 1999, 2006), on peut se demander si sa présence est synonyme de facilitation plutôt que de compétition dans un contexte de production de bouleaux jaunes de qualité. De plus, selon nos observations, la productivité ligneuse des bouleaux jaunes est supérieure dans les grandes trouées puisque les DHP sont plus gros, ce qui peut mener à une commercialisation plus rapide de la ressource.

La régression de la croissance juvénile pendant la période 5 à 25 ans (β) explique en partie la variation de la qualité des tiges (Σdc , Figure 5). Le fait que la qualité des tiges matures soit dépendante de la croissance juvénile (Figure 6) concorde avec plusieurs études (Larson, 1969; Puhlick et al., 2019; Ristau & Horsley, 1999; Wood & von Althen, 1996). Comme l'ont démontré Ristau et Horsley (1999), la compétition interspécifique augmente rapidement à la suite d'une perturbation majeure lors de la phase d'établissement de la régénération. Cette augmentation de la compétition peut se traduire par une régression linéaire négative lors de la croissance juvénile. En effet, les tiges matures présentant une pente négative ont eu une croissance rapide lors des 10 premières années de l'intervalle 5-25 ans suivie d'une croissance toujours rapide, mais ralentie par la compétition lors des 15 dernières années de l'intervalle 5-25 ans. Les tiges matures présentant une courbe de croissance positive ont eu une croissance moins rapide et plus stable du début à la fin de l'intervalle 5-25 ans. Ces observations témoignent d'un degré de compétition plus important dans l'environnement immédiat de ces tiges. D'ailleurs, on observe plus fréquemment ce patron de croissance dans les grandes ouvertures.

Nous pouvons suggérer comme Larson (1969) et Ristau et Horsley (1999), que la compétition interspécifique favorise l'élagage naturel et la rectitude du fût du bouleau jaune. Les résultats des variables de qualité substitut témoignent de ceci en affichant une qualité de tige supérieure dans les grandes trouées (2H et parquet) (Tableau 3, Tableau 4, Figure 2). Il est possible que les trouées de plus petites tailles ne présentent pas les caractéristiques nécessaires au développement de tiges de qualité de bouleau jaune en limitant la disponibilité de la lumière (Prévost et Raymond, 2012) et en favorisant une compétition composée d'une plus grande proportion d'espèces tolérante à l'ombre (Shields et al., 2007). Toutefois, le mécanisme flou derrière l'élagage naturel versus la lumière, le type de compétiteur et la croissance en hauteur mériterait d'être davantage approfondi, par exemple les notions d'architecture des arbres, d'état physiologique ou autre.

Du point de vue sylvicole, on peut supposer qu'il serait avantageux de faire des coupes de moyenne à forte intensité afin de reproduire ces conditions favorables pour le bouleau jaune. D'ailleurs, ces observations concordent avec plusieurs études qui témoignent de la nécessité de créer une perturbation suffisante pour établir une régénération de bouleaux jaunes de qualité (Prévost et al., 2010; Raymond et al., 2018; Shabaga et al., 2019). En revanche, ces grandes ouvertures comportent des désavantages, c'est pourquoi il est important de trouver le bon compromis, en fonction des objectifs de production. En effet, les travaux de Prévost et al. (2010), Raymond et Bédard (2017) et Raymond et al. (2018) montrent que les coupes de forte intensité causent un envahissement par la végétation concurrente que le bouleau jaune peut tolérer, alors que les conifères des bétulaies jaunes résineuses comme le sapin, l'épinette rouge et le thuya occidental ne tolèrent pas bien. Donc, si la régénération en conifères n'est pas établie au moment de réaliser ces coupes, elle ne s'établira pas avant très longtemps, d'autant plus si des coupes de fortes intensités sont réalisées. En conséquence, on risque de perdre à long terme, la composition mixte des bétulaies jaunes résineuses.

Le rayon de houppier moyen explique en partie la variation de la qualité des tiges (Σ_{dc} , Figure 6). En effet, plusieurs études, (Cameron et al., 1995; Mäkinen et al., 2003; Pretzsch, 2014) démontrent que la qualité des tiges juvéniles est inversement dépendante à la taille du rayon de houppier moyen. En effet, l'élagage et l'élongation des tiges sont des phénomènes naturels qui augmentent avec le degré de compétition inter et intraspécifique (Bayer et al., 2013; Cameron et al., 1995; Pretzsch, 2014). Dans ce sens, plus la compétition est élevée, plus les houppiers seront petits, alors que les branches inférieures auront tendance à s'élaguer et les tiges auront un plus petit DHP par rapport à la hauteur. De plus, dans un micropeuplement équienné avec une densité élevée, comme on retrouve dans les grandes ouvertures (ex : trouées 2H, parquets) (Figure 3), le fût des arbres a tendance à moins former de fourches, pour ainsi former un houppier moins large et plus dense (Bayer et al., 2013; Pretzsch, 2014). Par ces observations, on suggère d'intégrer aux coupes partielles des grandes ouvertures ($\geq 2H$) permettant de produire des micros-peuplements équiennes de bouleau jaune

favorisant la croissance de tiges de qualité. On peut penser par exemple aux coupes de jardinage par trouées, comme dans le cas présent (Raymond et al., 2009).

3.2. Recommandations sylvicoles

D'un point de vue sylvicole, l'objectif de la coupe de jardinage par trouées était de satisfaire les besoins des essences moins tolérantes à l'ombre dans les peuplements tempérés en s'inspirant de la dynamique naturelle, tout en permettant la régénération des essences résineuses. Prévost et al. (2010) ont démontré que cet objectif est à moitié respecté puisque la régénération de résineux est souvent peu présente. Toutefois, le bouleau jaune était présent, donc nous en avons profité pour déterminer quelle taille de trouées optimise la production de tiges de qualité pour cette essence. Nos résultats suggèrent que 20 ans après la récolte, les ouvertures de plus grande taille (2H et parquet) ont produit des billes de plus grande qualité. Prévost et Raymond (2012) ont mesuré, en 2003, une moyenne de radiation solaire de 2.8 MJ/m² (Témoin), de 7.3 MJ/m² (1H et 1.5H) et de 15.1 MJ/m² (Parquet). Cette accessibilité accrue à la lumière qu'amènent les grandes trouées semble permettre une croissance plus rapide et rectiligne en plus de favoriser l'élagage naturel des arbres grâce à l'installation rapide du cerisier de Pennsylvanie qui permet d'atteindre un degré de compétition élevé sans nuire à la régénération et à la qualité des tiges de bouleau jaune. Selon la densité des tiges observée en 2020, on peut suggérer que 20 ans après traitement, la densité totale en micropeuplement équienne en bétulaie jaune résineuse devrait être d'environ 2300 ti/ha (Figure 3) afin de favoriser la production de tige de qualité. De plus, la forte présence de cerisier de Pennsylvanie (920 ± 629 ti/ha, proportion = 40,44%) ne devrait pas être perçue négativement lorsque le bouleau jaune est présent en quantité suffisante (1022 ± 777 ti/ha, proportion = 43,40%). L'hypothèse que la qualité du bouleau jaune est favorisée par une compétition latérale importante semble évidente en analysant nos résultats. Effectivement, les modèles ont démontré des relations significatives entre Σdc et le rayon de cime moyen ainsi que la hauteur relative. Ces variables sont directement liées au degré de compétition auquel sont soumises les tiges de bouleau jaune (Mäkinen et al., 2003; Pretzsch, 2014).

Une approche de récolte avec des patrons de grandes trouées ($\geq 2H$) formant des micropeuplements équiennes semble toutefois moins bien adaptée à la complexité des peuplements mixtes (Raymond et al., 2016). Par contre, dans un contexte d'amélioration de la qualité des peuplements appauvris ou dégradés, il serait envisageable d'augmenter la proportion d'interventions sylvicoles d'intensité modérée à élevée (ou avec ouverture $\geq 2H$) afin de favoriser une production de bouleau jaune de qualité et une plus grande valeur des peuplements (Hasegawa et al., 2015).

Par ailleurs, la pression de broutement s'étant accentuée au cours des dernières décennies, il est possible qu'une régénération dense de bouleau jaune soit plus difficile à obtenir actuellement qu'au début des années

2000, comme ce fut le cas pour SSAM I et SSAM II. Il est connu qu'une trop grande pression de broutement peut nuire à la régénération du bouleau jaune, mais il reste à déterminer si celle-ci peut nuire au développement d'une compétition latérale qui favorise la production de tiges de qualité.

Enfin, pour maximiser les chances d'avoir une régénération de bouleau jaune de qualité, il est important de synchroniser les interventions avec les bonnes années semencières et de perturber le sol (Prévost et al., 2010). De plus, il serait intéressant de connaître l'effet d'une éclaircie précommerciale (EPC) sur la qualité des tiges, puisque ce type d'intervention est coûteux et peut-être inefficace ou inutile selon la nature de la compétition. Les tiges de plus grande qualité sont les tiges dominantes soumises à une compétition latérale. Il faut donc se demander ce qu'il arrivera si la compétition latérale diminue. Peut-être que dans un contexte de création de valeur, il serait plus pertinent de miser sur des tailles de formation et l'élagage que sur l'EPC. Finalement, un point important qu'il ne faut pas négliger, comme le mentionne Prévost et al. (2010), est celui de l'effet de la grandeur des trouées sur les arbres résiduels en bordure des trouées (branches adventives). Ce point nous permettra d'avoir une vue plus générale des effets qu'a la coupe de jardinage par trouées sur la qualité des tiges de bouleau jaune du peuplement résiduel.

Conclusion

Les résultats de cette étude démontrent l'importance d'une croissance juvénile rapide et d'une compétition strictement latérale pour la production de tige de bouleau jaune de qualité. En effet, les tiges ayant une croissance juvénile rapide sont en mesure de bien se positionner dans la canopée et de profiter des meilleures conditions de croissance, ce qui favorise la rectitude du fût, l'élagage naturel des branches et l'élongation de la tige. La taille des trouées est également importante pour la production de tige de qualité puisqu'elle influence grandement les conditions microclimatiques et la composition végétale, lesquels jouent à leur tour un rôle majeur dans la croissance et la qualité du bouleau jaune. Le cerisier de Pennsylvanie semble être un élément important dans le développement de peuplements de qualité et la densité de celui-ci est étroitement liée à la taille des ouvertures. En somme, nos résultats vont tous dans le même sens, c'est-à-dire que l'établissement de micros-peuplements équiennes favorise la qualité des tiges de bouleaux jaunes.

Nos résultats contribueront à améliorer les connaissances sylvicoles des aménagistes pour produire du bouleau jaune de qualité, notamment en contexte de peuplements dégradés par les coupes passées. Cette recherche démontre que les trouées de grande taille permettent d'améliorer la qualité du bouleau jaune dans les bétulaies jaunes résineuses de la région de Portneuf. Le fait d'avoir un seul site d'étude est en lui-même une lacune du projet. Il serait important d'élargir l'étude à l'échelle des bétulaies jaunes résineuses du Québec, voir même à l'échelle de l'aire de répartition du bouleau jaune. De plus, un échantillonnage plus important à l'échelle de SSAM I et SSAM II aurait pu permettre sans doute aux modèles de prédiction de la qualité d'être plus précis. Comme suite au projet, il serait pertinent de mesurer l'effet qu'ont les espèces compétitrices, qui s'installent rapidement à la suite d'une perturbation, comme l'érable à épis et l'érable rouge, sur la qualité du bouleau jaune. De plus, il faudrait évaluer la densité des tiges dans les différentes ouvertures selon des méthodes comportant moins de biais que celle des cellules de compétition.

Dans le contexte actuel, les futures études doivent viser à comprendre de quelle façon la qualité commerciale et la régénération du bouleau jaune dans les grandes trouées sont affectées par les facteurs biotiques et abiotiques, tels que l'augmentation des populations de cervidés, les ravageurs et les changements climatiques. En d'autres mots, il est à se demander si les procédés de régénération utilisant des trouées et des parquets favorisent la résilience et la résistance de nos forêts tout en permettant la production de tiges de grande valeur. À la lumière de nos observations, ces procédés semblent être en mesure de régénérer des peuplements en micropeuplement équienne ayant une bonne vigueur et une bonne qualité commerciale.

Bibliographie

- Anderson, D.R. 2008. Model based inference in the life sciences: a primer on evidence. Springer, New York.
- Archambault, L., Morissette, J., and Bernier-Cardou, M. 1998. Forest succession over a 20-year period following clearcutting in balsam fir-yellow birch ecosystems of eastern Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management* 102(1): 61–74. doi:10.1016/S0378-1127(97)00109-6.
- Baral, S.K., Danyagri, G., Girouard, M., Hébert, F., and Pelletier, G. 2016. Effects of suppression history on growth response and stem quality of extant northern hardwoods following partial harvests. *Forest Ecology and Management* 372: 236–246. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.foreco.2016.04.023.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. and Walker, S. 2015. “Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4.” *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. doi: 10.18637/jss.v067.i01.
- Berthiaume, B., and Kneeshaw, D. 2009. Influence of Gap Size and Position within Gaps on Light Levels. *International Journal of Forestry Research* 2009: 1–8. doi:10.1155/2009/581412.
- Black, B.A., and Abrams, M.D. 2004. Development and application of boundary-line release criteria. *Dendrochronologia* 22(1): 31–42. doi:10.1016/j.dendro.2004.09.004.
- Black, B.A., Abrams, M.D., Rentch, J.S., and Gould, P.J. 2009. Properties of boundary-line release criteria in North American tree species. *Annals of Forest Science* 66(2): 205–205. doi:10.1051/forest/2008087.
- Burnham, K.P., and Anderson, D.R. 2002. Model selection and multi-model inference: a practical information-theoretic approach. 2nd ed. Springer, New York.
- Cameron, A.D., Dunham, R.A., and Petty, J.A. 1995. The effects of heavy thinning on stem quality and timber properties of silver birch (*Betula pendula* Roth). 68(3).
- Canham, C.D. 1985. Suppression and Release during Canopy Recruitment in *Acer*, *Bulletin of the Torrey Botanical Club* , Vol . 112 , No . 2 (Apr . - Jun . , 1985) , pp . 134. 112(2): 134–145.
- Canham, C.D. 1990. Suppression and Release during Canopy Recruitment in *Fagus grandifolia* in *saccharum*. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, Vol. 117, No. 1 (Jan. - Mar., 1990), pp. 1-7 (7 pages)
- Castle, M., Weiskittel, A., Wagner, R., Ducey, M., Frank, J., and Pelletier, G. 2018. Evaluating the influence of stem form and damage on individual-tree diameter increment and survival in the Acadian Region: Implications for predicting future value of northern commercial hardwood stands. *Canadian Journal of Forest Research* 48(9): 1007–1019. doi:10.1139/cjfr-2018-0081.
- Coates, K.D., and Burton, P.J. 1997. A gap-based approach for development of silvicultural systems to address ecosystem management objectives. *Forest Ecology and Management* 99(3): 337–354. doi:10.1016/S0378-1127(97)00113-8.
- Danneyrolles, V. 2017. Reconstitution des forêts préindustrielles du Témiscamingue (Québec) à partir des archives de l'arpentage primitif. (February). doi:10.13140/RG.2.2.24618.00960.

- Duchesne, L., Ouimet, R., Houle, D., 2002. Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health, and soil nutrients. *J. Environ. Qual.* 31, 1676–1683.
- Duchesne, L., and Prévost, M. 2013. Canopy disturbance and intertree competition: Implications for tree growth and recruitment in two yellow birch-conifer stands in Quebec, Canada. *Journal of Forest Research* 18(2): 168–178. doi:10.1007/s10310-012-0338-1.
- Dumais, D., and Prévost, M. 2016. Germination et établissement de semis naturels d'épinette rouge (*Picea rubens*) dans des trouées sylvicoles de différentes tailles. *Forestry Chronicle* 91(5): 573–583. doi:10.5558/tfc2015-096.
- Fortin, M.; Guillemette, F.; Bédard, S. Predicting volumes by log grades in standing sugar maple and yellow birch trees in southern Quebec, Canada. *Can. J. For. Res.* 2009, 39, 1928–1938.
- Gagné, L.V., Genet, A., Weiskittel, A., and Achim, A. 2013. Assessing the potential stem growth and quality of yellow birch prior to restoration: A case study in eastern Canada. *Forests* 4(4): 766–785. doi:10.3390/f4040766.
- Gauthier, M.M., Lambert, M.C., and Bédard, S. 2016. Effects of harvest gap size, soil scarification, and vegetation control on regeneration dynamics in sugar maple-yellow birch stands. *Forest Science* 62(2): 237–246. doi:10.5849/forsci.15-058.
- Gasser, D., Messier, C., Beaudet, M., and Lechowicz, M.J. 2010. Sugar maple and yellow birch regeneration in response to canopy opening, liming and vegetation control in a temperate deciduous forest of Quebec. *Forest Ecology and Management* 259(10): 2006–2014. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.foreco.2010.02.011.
- Gendreau-Berthiaume, B., and Kneeshaw, D. 2009. Influence of Gap Size and Position within Gaps on Light Levels. *International Journal of Forestry Research* 2009: 1–8. doi:10.1155/2009/581412.
- Giroud, G., Cloutier, A., and Alteyrac, J. 2008. Occurrence, proportion, and vertical distribution of red heartwood in paper birch. *Canadian Journal of Forest Research* 38(7): 1996–2002. doi:10.1139/X08-043.
- Grondin, P., and Cimon, A. 2003, ing. f., M.Sc. Direction de la recherche forestière et Agathe C. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parc. Available from <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-activites-diversite.jsp>.
- Hanks, L.-F. Interim Hardwood Tree Grades for Factory Lumber; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station: Upper Darby, PA, USA, 1971; p. 29.
- Hassegawa, M., Havreljuk, F., Ouimet, R., Auty, D., Pothier, D., and Achim, A. 2015. Large-scale variations in lumber value recovery of yellow birch and sugar maple in Quebec, Canada. *PLoS ONE* 10(8). doi:10.1371/journal.pone.0136674.
- Heitzman, E. and Nyland, R. 1994. Influences of pin cherry (*Prunus pensylvanica* L.f.) on growth and development of young even-aged northern hardwoods. *Forest Ecology and Management* 67: (1994) 39-48. Elsevier B.V.

- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree- ring dating and measuring. ? *Tree-Ring Bull.* 43: 69-78.
- Jobidon, R. 1995. Autécologie de quelques espèces de compétition d'importance pour la régénération forestière au Québec, *Revue de littérature. Mémoire de recherche forestière n° 117.* 196 p. Available from <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire117.pdf>
- Kern, C. C., D'Amato, A.W., and Strong, T.F. 2013. Diversifying the composition and structure of managed, late-successional forests with harvest gaps: What is the optimal gap size? *Forest Ecology and Management* 304:110–120. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.foreco.2013.04.029.
- Kneeshaw, D.D. et M. Prévost, 2007. Natural canopy gap disturbances and their role in maintaining mixed species forests of central Québec. *Can. J. For. Res.* 37 :1534–1544.
- Lambert, J. 2013. La régénération du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) dans les forêts feuillues aménagées de l'est de l'Amérique du Nord : importance du bois mort. Available from <https://archipel.uqam.ca/5461/1/M12769.pdf>
- Larson, P. 1969. Wood formation and the concept of wood quality, By Principal Plant Physiologist , North Central Forest Experiment Station . (74).
- Lussier, J.-M., Gagné, R. and Bélanger G. 2000. Analyse dendro-écologique des bétulaies jaunes à sapin de la région de Portneuf : Résultats préliminaires [Dendrochronological analysis of balsam fir-yellowbirch stands in the Portneuf region: Preliminary results]. P. 24–30
- Lieffers, V.J., Messier, C., Stadt, K.J., Gendron, F., and Comeau, P.G. 1999. Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research* 29(6): 796–811. doi:10.1139/x98-165.
- Mäkinen, H., Ojansuu, R., and Niemistö, P. 2003. Characteristics of Planted Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) on the Basis of Routine Stand and Tree Measurements. 49(2): 301–317.
- Marquis, D.A. 1965. Controlling Light in Small Clearcuttings. U.S. Forest Service Research Paper NE-39
- Mazerolle, M.J. 2006. Improving data analysis in herpetology: Using Akaike's information criterion (AIC) to assess the strength of biological hypotheses. *Amphibia Reptilia* 27(2): 169–180. doi:10.1163/156853806777239922.
- Mazerolle, M.J. 2020. AICcmodavg: Model selection and multimodel inference based on (Q)AIC(c). R package. Version 2.31. Available from <http://cran.r-project.org/package=AICcmodavg>.
- Moreau, E., Bédard, S., Moreau, G., and Pothier, D. 2018. Relationships between tree vigor indices and a tree classification system based upon apparent stem defects in northern hardwood stands. *Forests* 9(10): 1–13. doi:10.3390/f9100588.
- Moreau, G., Achim, A., and Pothier, D. 2019. A dendrochronological reconstruction of sugar maple growth and mortality dynamics in partially cut northern hardwood forests. *Forest Ecology and Management* 437(November 2018): 17–26. doi:10.1016/j.foreco.2019.01.031.

- Nowacki, G.J., and Abrams, M.D. 1997. Radial-Growth Averaging Criteria for Reconstruction Disturbance Histories from Presettlement-Origin Oaks Author (s): Gregory J . Nowacki and Marc D . Abrams
Published by : Wiley Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/2963514> JSTOR is a not-for-profit.
Ecological Monographs 67(2): 225–249.
- Nyland, R.D., Bashant, A.L., Heitzman, E.F., and Verostek, J.M. 2007. Interference to hardwood regeneration in northeastern north America: Pin cherry and its effects. *Northern Journal of Applied Forestry* 24(1): 52–60. doi:10.1093/njaf/24.1.52.
- Petro, F.-J.; Calvert, W.W. La classification des billes de bois franc destinées au sciage (in French); Ministère des Pêches et de l'Environnement du Canada, Service canadien des forêts: Ottawa, Canada, 1976.
- Pothier, D., Fortin, M., Auty, D., Delisle-Boulianne, S., Gagné, L.V., and Achim, A. 2013. Improving tree selection for partial cutting through joint probability modelling of tree vigor and quality. *Canadian Journal of Forest Research* 43(3): 288–298. doi:10.1139/cjfr-2012-0402.
- Prestemon, J.P., and Service, F. 1998. Estimating Tree Grades for Southern Appalachian Natural Forest Stands. 44(1): 73–86.
- Pretzsch, H. 2014. Forest Ecology and Management Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management* 327: 251–264. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.foreco.2014.04.027.
- Prévost, M., Raymond, P. and Oy, V.R. 2003. Note de recherche forestière n° 125 Sylviculture et régénération des forêts mixtes du Québec (Canada) : une approche qui respecte la dynamique naturelle des peuplements. 231 (714) : 1–8. Available from <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/alias/cfm2003.html>.
- Prévost, M. 2008. Effect of cutting intensity on microenvironmental conditions and regeneration dynamics in yellow birch - Conifer stands. *Canadian Journal of Forest Research* 38(2): 317–330. doi:10.1139/X07-168.
- Prévost, M., and Charette, L. 2015. Forest Ecology and Management Selection cutting in a yellow birch – conifer stand , in Quebec , Canada : Comparing the single-tree and two hybrid methods using different sizes of canopy opening. 357: 195–205. doi:10.1016/j.foreco.2015.08.003.
- Prévost, M., and Charette, L. 2019. Coupe progressive dans un peuplement mixte boréal: Effets après 5 ans de la coupe finale sur le développement des drageons de tremble et des conifères dégagés. *Forestry Chronicle* 95(2): 124–134. doi:10.5558/tfc2019-019.
- Prévost, M., Raymond, P., and Lussier, J.M. 2010. Regeneration dynamics after patch cutting and scarification in yellow birch - Conifer stands. *Canadian Journal of Forest Research* 40(2): 357–369. doi:10.1139/X09-192.
- Puhlick, J.J., Kuehne, C., and Kenefic, L.S. 2019. Crop tree growth response and quality after silvicultural rehabilitation of cutover stands. *Canadian Journal of Forest Research* 49(6): 670–679. doi:10.1139/cjfr-2018-0248.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>

- Raymond, P., Bédard, S., Roy, V., Larouche, C., and Tremblay, S. 2009. The irregular shelterwood system: Review, classification, and potential application to forests affected by partial disturbances. *Journal of Forestry* 107(8): 405–413.
- Raymond, P., Dumais, D., et Prévost M. 2012. *Écologie et sylviculture de la forêt mixte : Qu'avons-nous appris au cours de la dernière décennie ? Colloque de transfert de connaissances. Carrefour Forêt Innovations, 6 octobre 2011, Centre des congrès, Québec, QC, Canada, 66 p.*
- Raymond, P., F. Guillemette et C. Larouche. 2013. Chapitre 6 - Les grands types de couvert et les groupements d'essences principales. Pages 95-119 dans F. G. Ministère des Ressources naturelles. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, P. Raymond et J.-P. Saucier (éditeurs). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 - Les concepts et l'application de la sylviculture. Les Publications du Québec, Québec, Canada.*
- Raymond, P., Prévost, M., and Power, H. 2016. Patch cutting in temperate mixedwood stands: What happens in the between-patch matrix? *Forest Science* 62(2): 227–236. doi:10.5849/forsci.15-023.
- Raymond, P., and 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. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.foreco.2017.04.042.
- Raymond, P., Royo, A.A., Prévost, M., and Dumais, D. 2018. Assessing the single-tree and small group selection cutting system as intermediate disturbance to promote regeneration and diversity in temperate mixedwood stands. *Forest Ecology and Management* 430(June): 21–32. Elsevier. doi:10.1016/j.foreco.2018.07.054.
- Raymond, P., Prévost, M., and Roy, V. 2020. Silvicultural options for rehabilitating high-graded mixedwood stands in northeastern North America. *Forest Ecology and Management* 466(February): 118137. Elsevier. doi:10.1016/j.foreco.2020.118137.
- Ristau, T.E., and Horsley, S.B. 1999. Pin cherry effects on Allegheny hardwood stand development. *Canadian Journal of Forest Research* 29(1): 73–84. doi:10.1139/x98-181.
- Ristau, T.E., and Horsley, S.B. 2006. When is pin cherry (*Prunus pensylvanica* L.) a problem in allegheny hardwoods? *Northern Journal of Applied Forestry* 23(3): 204–210. doi:10.1093/njaf/23.3.204.
- Robitaille, A., and Saucier, J.-P. 1998. *Paysages régionaux du Québec méridional*. Publications du Québec, Sainte-Foy, Que.
- Ryan, M.G., Binkley, D., Fownes, J.H., 1997. Age-related decline in forest productivity: pattern and process. *Adv. Ecol. Res.* 27, 214–262.
- Saucier, J.-P., Grondin, P., Robitaille, A., Gosselin, J., Morneau, C., Richard, P.-J.-H., Brisson, J., Sirois, L., Leduc, A., Morin, H., Thiffault, E., Gauthier, S., Lavoie, C. et Payette, S. (2009). *Écologie forestière. Manuel de foresterie, 2e édition. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Éditions Multimondes, Québec, pp.165-316.*
- Shabaga, J.A., Jones, T.A., and Elliott, K.A. 2019. Group-selection silviculture conditionally enhances recruitment of yellow birch in a shade-tolerant hardwood forest. *Forest Ecology and Management* 444(April): 244–255. Elsevier. doi:10.1016/j.foreco.2019.04.029.

- Shields, J.M., Webster, C.R., and Nagel, L.M. 2007. Factors influencing tree species diversity and *Betula alleghaniensis* establishment in silvicultural openings. *Forestry* 80(3): 293–307. doi:10.1093/forestry/cpm013.
- Steele, P.H. 1984. Factors Determining Lumber Recovery in Sawmilling. USDA Forest Service General Technical Report FPL (Forest Products Laboratory).
- Ung, C.-H., F. Raulier, D. Ouellet et J.-F. Dhôte. 1997. L'indice de compétition interindividuelle de Schütz. *Can. J. For. Res.* 27: 521-526.
- Webster, C.R., and Lorimer, C.G. 2005. Minimum opening sizes for canopy recruitment of midtolerant tree species: A retrospective approach. *Ecological Applications* 15(4): 1245–1262. doi:10.1890/04-0763.
- Wood, J.E., Von Althen, F.W. and Mitchell, E.G. 1996. Crown release improves growth of 20-year-old *Betula alleghaniensis* in tolerant northern hardwood stands. *New Forests* 12(2): 87–99. doi:10.1007/BF00036622.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., and Elphick, C.S. 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution* 1(1): 3–14. doi:10.1111/j.2041-