

# Avis technique

## SSRF-29

Direction de la recherche forestière

<b>Titre :</b>	<b>Évaluation des propriétés du bois d'épinette blanche à la suite de travaux d'éclaircie commerciale dans une plantation de 30 ans</b>
<b>Auteurs :</b>	Julie Barrette, ing.f., Ph. D., Lise Charette, stat. ASSQ, B. Sc., et Luca Serban, ing.f., Ph. D.
<b>Collaborateur :</b>	Thomas Dändliker, ing.f., M. Sc. et Charles Ward, ing.f., M. Sc.
<b>Date :</b>	Mai 2022

**De plus en plus, le bois récolté lors de l'éclaircie commerciale de plantations résineuses est utilisé par l'industrie de première transformation du bois. Au Québec, une grande proportion des plantations a été établie dans les années 1980, et plusieurs d'entre elles sont déjà rendues au stade de prématurité ou de maturité. Dans cette étude, nous comparons les propriétés mécaniques et physiques du bois d'épinette blanche provenant d'une plantation de 30 ans ayant subi un premier traitement d'éclaircie commerciale à celles d'arbres témoins, dans un dispositif établi par la Direction de la recherche forestière.**

### 1. Contexte

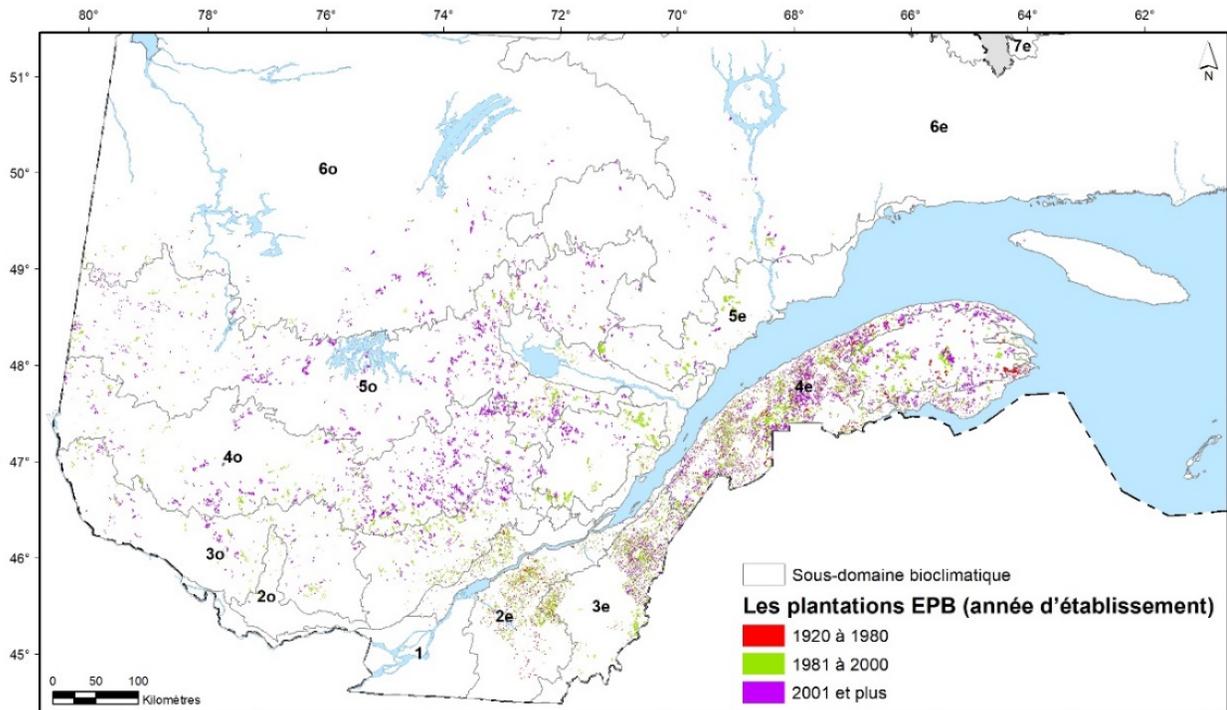
Avec la mise en œuvre de la nouvelle Stratégie nationale de production de bois élaborée par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP 2020) et le besoin grandissant de produire du bois plus rapidement, le bois d'éclaircie est de plus en plus convoité pour approvisionner l'industrie de première transformation du bois. En plantation, l'éclaircie commerciale (EC) fait généralement partie du scénario sylvicole recommandé (MRN 2013). Ce traitement permet à la fois de favoriser la croissance des tiges d'avenir et d'assurer certains revenus, grâce au bois récolté lors de l'opération.

Au Québec, plusieurs types d'EC peuvent être pratiqués, chacune avec différentes modalités. Chaque type offre des avantages différents et a des effets distincts sur les caractéristiques résiduelles d'une plantation (MRN 2013). À titre d'exemple, l'EC par le haut vise à récolter les tiges les plus grandes et de gros diamètres, ce qui augmente les chances d'obtenir des revenus à partir du bois coupé. L'éclaircie par le bas, quant à elle, vise à récolter les petites tiges, souvent opprimées, qui ont un potentiel de revenu plus faible. Finalement, l'éclaircie neutre vise à prélever des tiges de hauteurs et diamètres variables, avec un potentiel de revenu intermédiaire. Peu importe le choix du type d'éclaircie, celle-ci doit être pratiquée lorsque la plantation a atteint un stade où il y a un certain degré de compétition entre les tiges. Pour le déterminer, au Québec, on s'appuie généralement sur des données du suivi temporel de la surface terrière totale de la plantation.

D'après Prigent (2003), la surface terrière totale d'une plantation résineuse au moment de l'EC devrait se situer entre 25 et 35 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>. Le meilleur moment pour pratiquer l'EC dépendra toutefois de la productivité de la station, de la densité initiale de reboisement, du taux de survie et de l'espèce plantée (Prigent 1998). De manière générale, plus la densité de reboisement est élevée et plus l'espèce et la station sont productives, plus l'EC devra être réalisée hâtivement.

Les choix du moment de l'intervention et de l'intensité du traitement peuvent grandement influencer la qualité des tiges d'avenir. Une EC réalisée trop tôt ou avec un taux de prélèvement trop fort peut favoriser la formation de bois de plus faible densité (Auty *et al.* 2017, Jyske *et al.* 2010, Schneider *et al.* 2008), avec de plus gros nœuds (Moore *et al.* 2009, Wang *et al.* 2003), de moins bonnes propriétés mécaniques (Moore *et al.* 2009, Schneider *et al.* 2008, Wang et Ross 2008) et qui donnera des sciages de moindre qualité (Krajnc *et al.* 2019, Moore *et al.* 2009). Il est donc important d'attendre le moment optimal avant de réaliser un traitement d'EC dans une plantation.

À l'heure actuelle, nous ne disposons que de très peu d'informations au sujet des propriétés du bois des arbres ayant subi un traitement d'EC, ou même des arbres d'avenir qui formeront la plantation finale. Comme plusieurs plantations ont été installées au cours des années 1980, on peut s'attendre à ce que plusieurs d'entre elles soient déjà prêtes à subir un dernier traitement d'EC ou même une coupe finale dans les années à venir (figure 1).



**Figure 1.** Carte des plantations d'épinettes blanches (EPB) compilées dans la carte écoforestière de tous les programmes décennaux (source : Jean Noël, Direction de la recherche forestière, octobre 2020). La couleur des symboles représente l'année d'établissement.

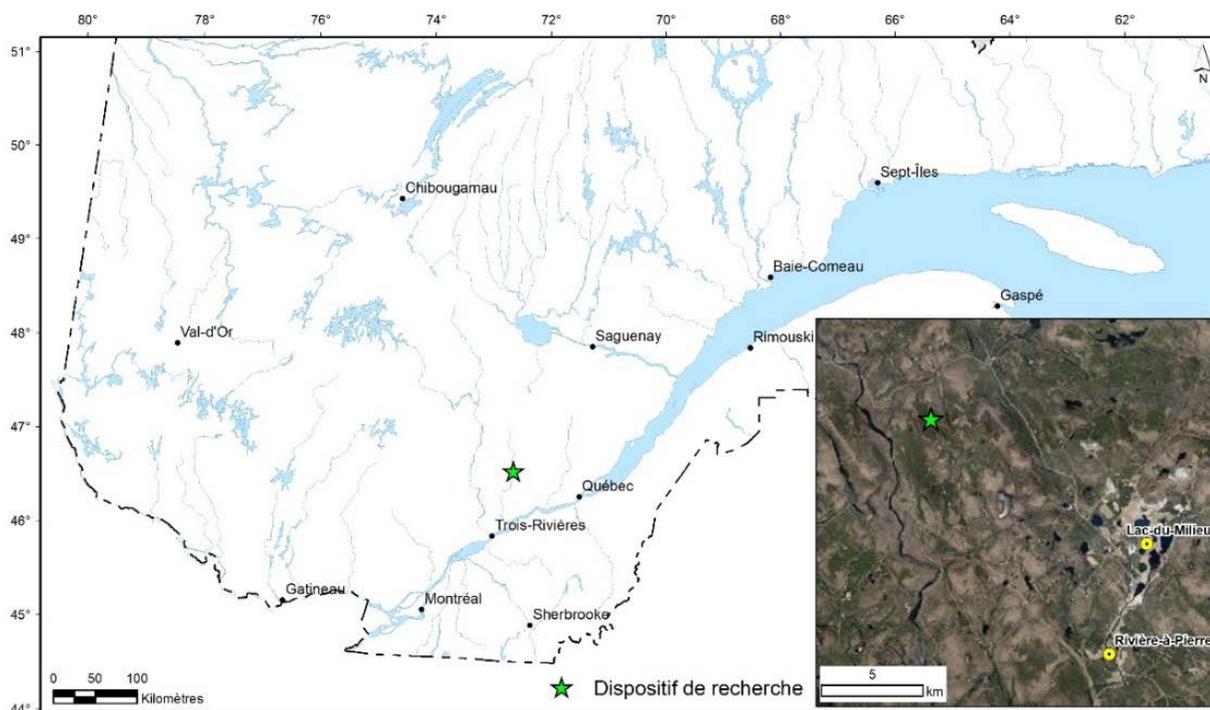
Cette étude visait donc à évaluer et à comparer les propriétés des bois d'épinettes blanches (*Picea glauca* (Moench) Voss) de plantations ayant subi une EC hâtive neutre de forte intensité (prélèvement de 33 % de la surface terrière) à celles d'arbres témoins provenant de plantations n'ayant subi aucun traitement d'EC. Le dispositif de recherche a été établi en 2008 par la Direction de la recherche forestière, dans Portneuf. Plus précisément, l'étude avait deux objectifs spécifiques : i) de vérifier si les propriétés du bois différaient à la suite du traitement d'EC, et ii) d'évaluer quelles étaient les variables les plus importantes pour expliquer la variation des propriétés du bois. Nous avons réalisé deux analyses statistiques distinctes pour répondre à chacun de ces objectifs : d'une part, une analyse de la covariance (Ancova) avec mesures répétées, et d'autre part, une modélisation linéaire mixte à mesures répétées. Cet avis technique présente les méthodes utilisées, les résultats obtenus et une discussion.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Description du site d'étude et du dispositif de recherche

Le dispositif de recherche est situé au Lac-à-Charles, dans la réserve faunique de Portneuf (coordonnées : latitude 47° 03' 16,4" N., longitude 72° 15' 45,0" O.; figure 2). La station (type écologique MJ12 : bétulaie jaune à sapins et érables à sucre) se trouve sur un dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique. En 1987, des plants d'épinette blanche ont été mis en terre sur une superficie de

13,11 ha, à une densité initiale d'environ 2 900 tiges·ha<sup>-1</sup>. En 2008, des traitements d'EC hâtive ont débuté dans certaines parcelles. La surface terrière totale (ST) moyenne des parcelles du dispositif avant la première EC était alors de 31,6 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> et la surface terrière résiduelle après l'EC hâtive de forte intensité (prélèvement de 33 % de la ST initiale) était de 21,1 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>.



**Figure 2.** Carte montrant l'emplacement du dispositif de recherche (source : Jean Noël, Direction de la recherche forestière, septembre 2021).

L'ensemble du dispositif comprend 65 grandes parcelles mesurant chacune 0,09 ha. Afin d'éviter les effets de bordure, les arbres des deux premières rangées de chaque côté n'ont toutefois pas été mesurés, même si les traitements y ont été appliqués. Ainsi, la superficie réelle des parcelles mesurées est de 0,04 ha. Au total, 60 parcelles du dispositif ont été divisées selon 3 facteurs (ou types de traitements). Le premier représente le moment d'intervention et comprend 2 niveaux : EC hâtive (première EC réalisée en 2008, ST initiale = 31,6 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>) ou tardive (première EC réalisée en 2013, ST initiale = 39,9 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>). Le deuxième facteur est le mode d'intervention, avec 3 niveaux : par le bas, par le haut ou neutre. Enfin, l'intensité de prélèvement comprend 2 niveaux : faible (prélèvement de 20 % de la ST initiale) ou forte (prélèvement de 33 % de la ST initiale). Chacune des 12 combinaisons de facteurs (2 moments × 3 modes d'intervention × 2 intensités de prélèvement) a été répétée 5 fois à l'intérieur du dispositif. À ces 60 parcelles s'ajoutent 5 parcelles témoins, n'ayant subi aucun traitement d'EC (annexe).

À l'été 2018, nous avons prélevé des arbres études dans certaines parcelles qui recevaient alors un deuxième traitement d'EC hâtive neutre de forte intensité, afin d'en tester les propriétés du bois. La ST

moyenne de ces parcelles était de  $36,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  avant les travaux de deuxième EC, et de  $23,9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  après ce traitement.

## 2.2. Prélèvement des arbres études, des disques de bois et production des sciages

Dans un premier temps, nous avons choisi de tester les propriétés du bois des arbres ayant subi un premier traitement d'EC hâtive neutre de 33 % d'intensité et de comparer les propriétés de ces arbres avec celles d'arbres témoins. À l'été 2018, nous avons récolté 18 arbres études provenant de 3 parcelles éclaircies et 18 autres provenant de 3 parcelles témoins, pour un total de 36 arbres (6 arbres études choisis aléatoirement dans chacune des parcelles). Afin de ne pas détruire la structure des parcelles témoins, les arbres études choisis pour ce traitement ont été récoltés sur une aire témoin à une distance d'au moins 20 m à l'extérieur des bordures de chaque parcelle éclaircie, ce regroupement « aire témoin–parcelle éclaircie » constituant une paire d'unités expérimentales (bloc). Les arbres études des parcelles éclaircies, quant à eux, ont pu être récoltés directement dans les parcelles lors des travaux d'EC (figure 3). Nous avons choisi les arbres études afin de couvrir une vaste gamme de diamètres, en nous appuyant sur la distribution diamétrale des tiges inventoriées dans chacune des parcelles.



**Figure 3.** Exemple d'un arbre étude d'épinette blanche abattu lors de la récolte des échantillons pour cette étude (photo : Julie Barrette).

Par la suite, nous avons réalisé un inventaire dendrométrique, en commençant par la mesure du diamètre à hauteur de poitrine (DHP, en mm, mesuré à 1,3 m du sol) de tous les arbres études avant qu'ils soient abattus à la scie mécanique. Une fois les arbres au sol, nous avons noté leur longueur totale (de la souche jusqu'au sommet, ce qui correspond à la hauteur totale de l'arbre, en cm) ainsi que la largeur et la longueur

de leur cime vivante (en cm). Par la suite, nous avons tronçonné les tiges en billots de 2,6 m, de la souche jusqu'au sommet de l'arbre. Seuls le premier et le troisième billot à partir de la base de chaque arbre étude ont été rapportés pour les analyses subséquentes.

En plus de ces billots, nous avons récolté des disques de bois de 5 cm d'épaisseur aux hauteurs de 2,74 m, de 5,33 m, de 7,92 m et de 10,51 m. Sur le terrain, ces disques ont été placés dans des sacs; par la suite, ils ont été conservés au congélateur jusqu'à la prise de mesures au laboratoire, notamment pour en déterminer la densité basale du bois.

Les billots ont été transportés à l'usine de Duchesnay pour en faire des sciages. Nous avons privilégié un schéma de débitage qui optimisait la production de planches de 2 pouces x 4 pouces x 8 pieds (5,08 cm x 10,16 cm x 2,4 m), puisqu'il importait de tester les propriétés mécaniques du bois. Avant le sciage, nous avons peint en rose le centre de chaque billot, représenté par les 15 premiers anneaux de croissance, de manière à distinguer le bois juvénile du bois adulte (figure 4a). Ainsi, pour chacun des sciages produits, il était possible de déterminer visuellement la proportion de bois juvénile présente (représentée par la proportion de rose; figure 4b). Les sciages ont été séchés, puis évalués par un inspecteur accrédité afin d'en faire un classement visuel (classes n° 1, n° 2, n° 3, économie et rejet) suivant les règles de la Commission nationale de classification des sciages (National Lumber Grades Authority, ou NLGA; NLGA 2017). En raison de certains problèmes de suivi de numéros de billes lors de l'opération de sciage à l'usine, le nombre d'arbres ayant pu servir aux analyses des propriétés mécaniques du bois s'est vu réduit à 33, au lieu de 36 comme prévu initialement.

a)



b)



**Figure 4.** a) Exemple des billots d'épinette blanche peints et b) transformés en sciages. La zone peinte en rose représente les 15 premiers anneaux de croissance des billots, soit le bois juvénile (photos : Julie Barrette).

### 2.3. Détermination de la densité basale du bois

Pour chacun des disques récoltés, nous avons déterminé la densité basale du bois en prélevant des échantillons en forme de « pointes de tarte » dans chacun des disques. La densité basale a ensuite été déterminée par immersion dans l'eau, conformément à la norme ASTM-D2395 (ASTM-D2395-02 2002).

#### 2.4. Détermination des propriétés mécaniques du bois

Pour chacun des sciages produits, nous avons déterminé les propriétés mécaniques du bois conformément à la norme ASTM-D198-15 (ASTM-D198-15 2015). Celles-ci ont été mesurées au banc d'essai en flexion statique, au laboratoire de charpente du pavillon Kruger de l'Université Laval. Deux propriétés ont été mesurées : le module d'élasticité (MOE), qui fournit une estimation de la rigidité des sciages, et le module de rupture (MOR), qui mesure la résistance à la rupture des sciages. Préalablement aux tests mécaniques, nous avons estimé la teneur en humidité de chacun des sciages à l'aide d'un hygromètre de même que les proportions de bois juvénile (rose) et de bois mature (couleur naturelle). Les mesures des modules d'élasticité et de rupture ont ensuite été ajustées en fonction des teneurs en humidité mesurées.

#### 2.5. Analyses de données

Les facteurs et les sources de variabilité à prendre en compte pour chacune des propriétés du bois mesurées sont présentés au tableau 1.

**Tableau 1.** Facteurs et sources de variabilité prises en compte pour chacune des propriétés du bois mesurées.

Facteurs ou sources de variabilité	Valeurs	MOE et MOR* (voir la section 2.5.1)	Densité basale (voir la section 2.5.2)
Bloc (3 paires)	B53, B61, B63	x	x
Traitement EC (2 niveaux)	EC (éclaircie), TE (témoin)	x	x
Parcelle (6, soit 2/bloc)	53, 61, 63, T53, T61, T63	x	x
Arbre/Parcelle (6/parcelle)	1, 2..., 6 (par parcelle)	x	x
Bille/Arbre (2/arbre)	1, 2	x	
Position de la bille sur l'arbre (2)	Bas (= Bille 1), Haut (= Bille 2), Position et Bille étant confondus pour un même arbre	x	
Nombre de sciages (pièces)/Bille (variable)	1, 2..., 6	x	
Hauteur des disques de bois sur l'arbre (cm)	274, 533, 792, 1 051		x

\* MOE = module d'élasticité; MOR = module de rupture.

##### 2.5.1. Analyses des propriétés mécaniques (MOE et MOR)

Nous avons eu recours à deux approches distinctes pour analyser les propriétés mécaniques du bois (MOE et MOR) des arbres étudiés, conformément aux objectifs de l'étude.

En premier lieu, nous avons vérifié si les propriétés du bois différaient selon les facteurs traitement (EC ou TE) et position de la bille sur l'arbre (Bas ou Haut). Pour ce faire, nous avons tenu compte des conditions préexistantes avant le traitement d'EC en incluant, à titre de covariable, le DHP mesuré en 2008. Nous avons testé la nullité des pentes puis le parallélisme des niveaux des facteurs (hypothèses sous-jacentes à l'analyse de la covariance [Ancova]). Ces analyses ont été effectuées à l'aide d'un modèle mixte d'Ancova avec mesures répétées, dans lequel le traitement d'EC, la position de la bille sur l'arbre, de même que

l'interaction entre les deux ont été considérés comme des facteurs à effets fixes. Nous avons considéré la position de la bille sur l'arbre comme un facteur à mesures répétées, afin de tenir compte de la corrélation entre les mesures prises sur un même arbre. Les sources de variabilité Bloc, Parcelle (Pe), Arbre et Bille ont été considérées comme des facteurs à effets aléatoires.

Toutes les analyses de cette première partie ont été effectuées avec la procédure Mixed de SAS, version 9.4 (SAS Institute Inc. 2015). Nous avons retenu la structure de la matrice de variance-covariance associée aux mesures répétées comme celle permettant le meilleur ajustement tout en limitant le nombre de paramètres, sur la base du critère d'Akaike corrigé pour le nombre de paramètres (AICc) et du test du rapport de vraisemblance au seuil nominal  $\alpha = 0,30$ , lorsque deux structures d'intérêt étaient hiérarchiques. Lorsque c'était approprié, nous avons considéré les structures suivantes : composantes de la variance (VC), symétrie composée (CS), autorégressive d'ordre 1 avec variances homogènes (AR(1)) ou avec variances hétérogènes (ARH(1)), sans structure particulière (UN) et sans structure particulière avec covariances nulles (UN(1)). Dans le cas des variables MOE et MOR, nous avons effectué cette vérification non pas sur les plus petites unités échantillonnées (sciages), mais sur la moyenne des sciages par bille, étant donné que le facteur Position (confondu avec Bille) était répété sur l'arbre. La structure CS testée correspond à la structure VC avec variances homogènes pour le facteur Position, alors que l'autre structure possible, UN, correspond à la structure VC avec variances hétérogènes pour le facteur Position. Selon les résultats, nous avons utilisé l'une ou l'autre de ces possibilités de structures VC pour l'analyse finale, qui utilisait les sciages comme observations. Le seuil nominal de  $\alpha = 0,30$  a également été celui utilisé pour discuter de l'importance des facteurs à effets aléatoires, selon un test de Wald. En revanche, pour évaluer l'importance des facteurs à effets fixes, nous avons plutôt utilisé le seuil nominal de  $\alpha = 0,05$ . La méthode de Kenward-Roger a été utilisée pour estimer les degrés de liberté du dénominateur. L'homogénéité de la variance et la normalité ont été vérifiées sur les résidus en utilisant les méthodes graphiques usuelles, en plus du test de Shapiro-Wilk (normalité).

En second lieu, nous avons testé dans quelle mesure les propriétés du bois étaient reliées à des variables explicatives facilement disponibles. Pour ce faire, nous avons établi certaines relations visant à expliquer les propriétés du bois à partir de variables faciles à mesurer sur le terrain, mais aussi en laboratoire. Nous avons ainsi construit des modèles linéaires mixtes à mesures répétées par une approche par sélection ascendante (forward selection) en utilisant les critères d'information bayésien (BIC; Schwarz 1978) et d'Akaike (AIC) pour sélectionner les variables explicatives, par la méthode du maximum de vraisemblance de la procédure Mixed de SAS. Les pas de sélection correspondent à l'ajout d'une variable à la fois en choisissant celle associée à la plus grande réduction du BIC. Le dernier pas de sélection est déterminé lorsque l'ajout d'une variable ne faisait pas diminuer la valeur du BIC et de l'AIC d'au moins 2 unités (Burnham et Anderson 2002). Dans le cas de plusieurs possibilités d'intérêt suivant le premier pas de sélection, plusieurs modèles ont été construits.

Les variables explicatives testées pour cette analyse étaient les suivantes : DHP en 2018, hauteur totale de l'arbre, longueur de la cime vivante, largeur de la cime vivante, proportion de bois juvénile (Proportion

de rose), Traitement (éclaircie ou témoin), Position sur l'arbre (Bas ou Haut) ainsi que l'interaction entre certaines des variables, soit DHP en 2018, Proportion de bois juvénile (rose), Traitement et Position sur l'arbre. De plus, quelques variables ont été développées et ajoutées à notre sélection de modèles. Il s'agit de la surface terrière des arbres étudiés ( $ST_{arbre} = \pi \left( \frac{DHP(\text{en mm})}{2} \right)^2 / 10\,000$ , en  $\text{dm}^2/\text{arbre}$ ), l'accroissement en diamètre des 10 années suivant l'EC ( $\text{AccDiam10} = \text{Diam2018} - \text{Diam2008}$ , en mm) et un indice de gracilité (rapport H/D = Hauteur totale/DHP). Nous avons aussi transformé certaines de ces variables lorsque nous l'avons jugé nécessaire pour respecter les hypothèses sous-jacentes au modèle. De même, dans le cas d'une décomposition polynomiale, nous les avons centrées sur leur valeur moyenne afin de réduire les effets de multicollinéarité. Nous avons considéré uniquement les ensembles de variables explicatives qui ne sont pas étroitement corrélées pour minimiser les problèmes de colinéarité dans les modèles. Nous avons utilisé à la fois la valeur du facteur d'inflation de la variance de chacune des variables (valeur inférieure à 2,5) et les corrélations entre les différentes variables explicatives à partir d'une matrice de corrélations, en utilisant les procédures Reg et Corr de SAS, respectivement. Les critères de sélection retenus dans le choix des modèles finaux étaient l'AIC et le BIC (pour lesquels on recherche une petite valeur) ainsi que l'analyse graphique des résidus. Pour documenter le modèle, nous avons aussi calculé un pseudo-R<sup>2</sup> (mesure correspondant au carré de la corrélation entre les valeurs observées et celles prédites, et pour laquelle on recherche une grande valeur; Kvålseth 1985), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM, mesure correspondant à la racine carrée de la différence quadratique moyenne entre les valeurs observées et celles prédites, et pour laquelle on recherche une petite valeur) et l'erreur absolue moyenne (EAM, mesure correspondant à la moyenne de la valeur absolue des différences entre les valeurs observées et celles prédites, et pour laquelle on recherche une petite valeur).

Comme pour l'analyse réalisée pour le premier objectif, les facteurs à effets aléatoires pris en compte pour cette seconde analyse étaient le bloc, la parcelle, l'arbre dans la parcelle, la bille dans l'arbre et le sciage dans la bille, ce dernier étant l'unité sur laquelle les propriétés mécaniques du bois ont été mesurées. Les hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance ont aussi été vérifiées.

### 2.5.2. Analyses de la densité basale

Nous avons mené deux analyses distinctes sur la densité basale du bois en utilisant la même démarche statistique que pour les analyses du MOE et du MOR. Ainsi, nous avons d'abord testé l'effet des facteurs Traitement (éclaircie ou témoin), Hauteur des disques de bois (274 cm, 533 cm, 792 cm ou 1 051 cm) de même que leur interaction (facteurs à effets fixes) à l'aide d'un modèle mixte d'Ancova avec mesures répétées, dans lequel le DHP mesuré en 2008 a été ajouté à titre de covariable. Les facteurs à effets aléatoires comprenaient les blocs, les parcelles et les arbres. Nous avons comparé plusieurs structures de covariance afin de considérer la variance des mesures provenant des différentes hauteurs des disques de bois, de même que leurs covariances.

Un modèle linéaire mixte à mesures répétées a également été construit par une approche par sélection ascendante pour relier la densité basale des disques prélevés à différentes hauteurs aux variables explicatives mesurées à l'échelle de l'arbre.

### 2.5.3. Présentation des résultats du classement des sciages

Nous avons compilé et présenté les résultats du classement des sciages par traitement (éclaircie ou témoin). À l'aide d'un graphique de fréquences, nous présentons le nombre de sciages obtenu par grade (n° 1, n° 2, n° 3, économie et rejet) ainsi que les principales raisons du déclassement. Nous présentons également, pour chacun des grades, la moyenne et l'étendue des valeurs observées de MOE et de MOR. Un graphique de la relation linéaire entre les valeurs observées de MOE et de MOR est aussi présenté.

Tous les graphiques ainsi que la représentation de la matrice de corrélation entre les diverses variables de cette étude ont été produits dans l'environnement R, version 4.0.3 (R Core Team 2021).

## 3. Résultats

### 3.1. Analyses des propriétés mécaniques du bois (MOE et MOR)

Le tableau 2 présente les valeurs moyennes (avec écart-type) des propriétés dendrométriques et des propriétés du bois par parcelle et par traitement, alors que le tableau 3 présente des statistiques descriptives selon le traitement (éclaircie ou témoin) et la position de la bille sur l'arbre (bas ou haut).

D'après les résultats de l'Ancova avec mesures répétées, nous avons observé que le DHP mesuré en 2008 était relié de manière inversement proportionnelle aux valeurs moyennes de MOE et MOR ( $p = 0,006$  et  $p < 0,001$ ), et ce, avec une pente jugée équivalente pour tous les niveaux des facteurs à l'étude (traitement ou position de la bille sur l'arbre). Nous n'avons observé aucune différence significative entre les moyennes des traitements (éclaircie ou témoin) pour le MOE ( $p = 0,562$ ) ni pour le MOR ( $p = 0,133$ ) après que celles-ci aient été ajustées en fonction du DHP initial mesuré en 2008. De même, nous n'avons observé aucune différence significative entre les moyennes selon la position de la bille sur l'arbre pour le MOE ( $p = 0,620$ ). En revanche, on remarque un effet de la position de la bille sur le MOR ( $p < 0,001$ ). Aucun effet du traitement (éclaircie ou témoin) en interaction avec la position de la bille sur l'arbre n'a été décelé ( $p = 0,092$  pour le MOE et  $p = 0,710$  pour le MOR). À la lumière de ces résultats, nous concluons que seul l'effet de la position de la bille sur l'arbre avait un effet significatif sur le MOR. Ce résultat était prévisible, puisque la proportion de bois juvénile est toujours beaucoup plus grande dans le haut de l'arbre que dans le bas, ce qui cause une réduction des propriétés mécaniques du bois.

**Tableau 2.** Valeurs moyennes (et écarts-types entre parenthèses) des propriétés dendrométriques et des propriétés du bois des sciages d'épinette blanche et de la densité basale mesurée à une hauteur de 274 cm, par traitement (éclaircie ou témoin) et par parcelle.

Traitement	N° de parcelle	Propriétés dendrométriques					Propriétés du bois		
		DHP (mm)	Hauteur totale (m)	Base de la cime vivante (m)	Longueur de la cime vivante (m)	Largeur de la cime vivante (m)	MOE* (MPa)	MOR* (MPa)	Densité basale (g·cm <sup>-3</sup> ) (H = 274 cm)
Éclaircie	53	211 (52)	14,28 (2,69)	6,63 (0,92)	7,65 (2,76)	4,15 (0,68)	5 523 (1 196)	25,91 (5,09)	0,33 (0,03)
	61	203 (38)	14,59 (2,75)	6,73 (0,61)	7,79 (2,44)	3,51 (0,51)	6 607 (902)	28,34 (5,53)	0,34 (0,02)
	63	197 (41)	14,60 (1,40)	7,39 (0,79)	7,21 (1,33)	3,03 (0,38)	6 307 (1926)	28,97 (9,31)	0,36 (0,04)
Témoin	T53	207 (50)	14,61 (1,83)	7,21 (0,80)	7,49 (1,41)	4,52 (1,01)	6 150 (1 472)	30,99 (7,17)	0,37 (0,04)
	T61	225 (56)	15,81 (1,90)	8,21 (1,43)	7,54 (1,55)	4,76 (1,27)	6 203 (1 069)	28,81 (6,61)	0,34 (0,02)
	T63	206 (41)	16,09 (1,17)	8,89 (1,14)	7,21 (1,09)	3,48 (0,77)	5 819 (1 265)	29,67 (6,46)	0,36 (0,04)

\* MOE = module d'élasticité; MOR = module de rupture; H = hauteur de mesure.

**Tableau 3.** Statistiques descriptives des propriétés du bois des sciages d'épinette blanche, par traitement (éclaircie ou témoin) et position de la bille sur l'arbre (bas ou haut). Les valeurs entre parenthèses correspondent aux écarts-types.\*

Traitement	Position de la bille	MOE* (MPa)			MOR* (MPa)		
		Moyenne (écart-type)	Minimum	Maximum	Moyenne (écart-type)	Minimum	Maximum
Éclaircie	Bas	6 469 (1 547)	3 690	9 786	30,3 (7,2)	17	48
	Haut	5 586 (1 257)	2 840	7 494	23,7 (4,7)	17	36
Témoin	Bas	5 984 (1 374)	3 528	9 108	31,3 (6,3)	18	44
	Haut	6 155 (945)	4 653	8 428	25,7 (6,0)	17	42

\* MOE = module d'élasticité; MOR = module de rupture.

La structure de la matrice de variance-covariance retenue pour tenir compte des mesures répétées des billes sur l'arbre est VC, tant pour le MOE que pour le MOR. La variance des effets aléatoires attribués aux blocs et aux parcelles est considérée comme nulle dans les deux cas, tandis que les variances associées aux arbres et à la position des billes sur l'arbre sont importantes dans le cas du MOE, mais pas dans celui du MOR. Ces différences suggèrent que la plus grande part de la variabilité des mesures est attribuée aux arbres et aux billes pour les valeurs de MOE (MOE :  $s_{Bloc}^2 = 0$ ;  $s_{Pe(Bloc)}^2 = 0$ ;  $s_{Arbre(Pe.Bloc)}^2 = 387\,933,8$ ;  $s_{Bille(Arbre.Pe.Bloc)}^2 = 413\,901,8$  et  $s_{Sciage(Bille.Arbre.Pe.Bloc)}^2 = 885\,018,2$ ; MOR :  $s_{Bloc}^2 = 0$ ;  $s_{Pe(Bloc)}^2 = 0$ ;  $s_{Arbre(Pe.Bloc)}^2 = 0,9$ ;  $s_{Bille(Arbre.Pe.Bloc)}^2 = 1,6$  et  $s_{Sciage(Bille.Arbre.Pe.Bloc)}^2 = 31,3$ . Dans les deux cas, la variance résiduelle est la dernière présentée).

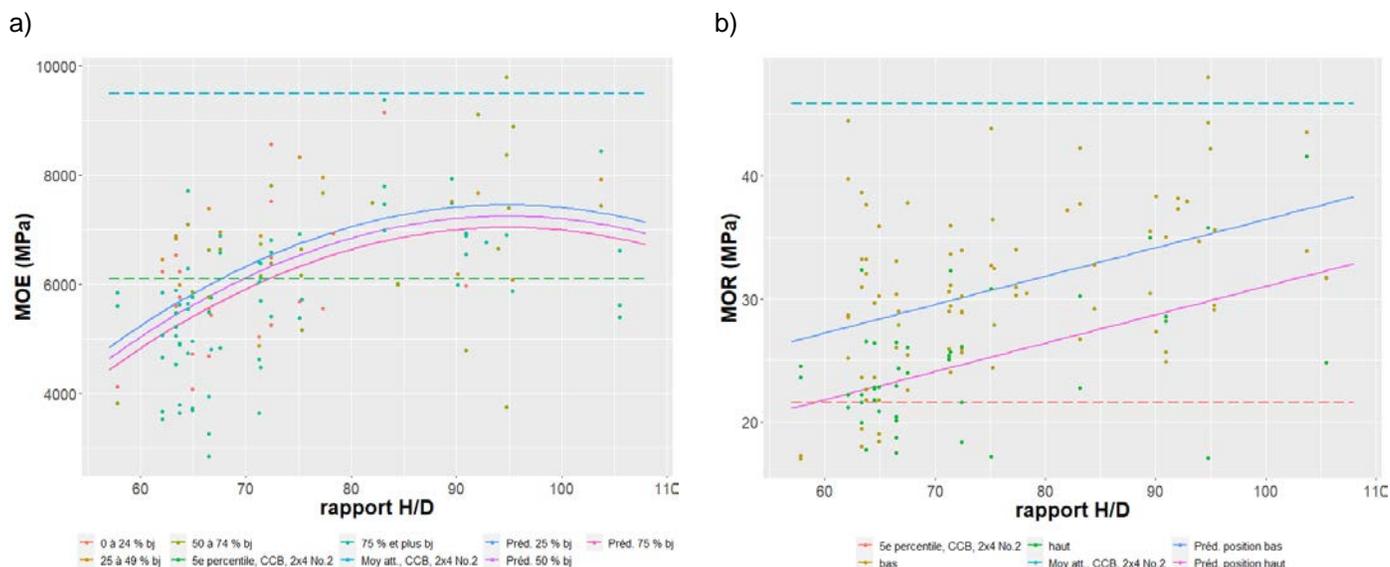
Les résultats de la deuxième analyse ont permis de sélectionner les intrants qui expliquent le mieux les deux variables associées aux propriétés du bois (tableau 4). Pour le MOE, la variance des effets aléatoires testés est considérée comme nulle pour les blocs et les parcelles, mais elle est non négligeable pour les arbres et la position des billes sur l'arbre (structure VC). Dans le cas du MOR, toutes les variances des effets aléatoires testés sont considérées comme nulles (MOE :  $s_{Bloc}^2 = 0$ ;  $s_{Pe(Bloc)}^2 = 0$ ;  $s_{Arbre(Pe.Bloc)}^2 = 255\,637,9$ ;  $s_{Bille(Arbre.Pe.Bloc)}^2 = 11\,335,1$  et  $s_{Sciage(Bille.Arbre.Pe.Bloc)}^2 = 1\,088\,445,9$ ; MOR :  $s_{Bloc}^2 = 0$ ;  $s_{Pe(Bloc)}^2 = 0$ ;  $s_{Arbre(Pe.Bloc)}^2 = 0$ ;  $s_{Bille(Arbre.Pe.Bloc)}^2 = 0$  et  $s_{Sciage(Bille.Arbre.Pe.Bloc)}^2 = 31,3$ . Dans les deux cas, la variance résiduelle est la dernière présentée).

**Tableau 4.** Caractéristiques des meilleurs modèles retenus pour prédire les propriétés du bois (module d'élasticité [MOE], et module de rupture [MOR]) des sciages d'épinette blanche.

Variable prédite	Modèle	Pseudo-R <sup>2</sup>	REQM*	EAM*	AIC*	BIC*	n
MOE	$H/D + \text{proportion de bois juvénile} + (H/D)^2$	0,31	1 142,3	923,3	2 190,3	2 176,3	129
MOR	$H/D + \text{position}$	0,36	5,53	4,33	815,4	807,4	129

\* REQM = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne; EAM = erreur absolue moyenne; AIC = critère d'Akaike; BIC = critère d'information bayésien.

Une représentation graphique de chacun de ces modèles est également donnée à la figure 5. La figure 5a montre qu'en général, le MOE des sciages augmente lorsque le rapport H/D augmente (terme linéaire,  $p < 0,001$ ). Cela indique que plus la tige est élancée, plus elle est rigide, mais seulement jusqu'à un certain point. Au-delà d'un certain seuil (vers un rapport H/D de 95), la tendance semble s'inverser (terme quadratique,  $p = 0,053$ ). Comme le nombre d'observations est plutôt faible passé ce seuil, nous demeurons prudents quant au comportement de cette relation. De plus, d'après la figure 5a, nous observons que plus la proportion de bois juvénile est importante (laquelle est représentée par la proportion de rose dans les sciages), plus les valeurs de MOE diminuent. Le MOR, quant à lui, est également relié de façon directement proportionnelle au rapport H/D ( $p < 0,001$ ) et varie en fonction de la position de la bille sur la tige ( $p < 0,001$ ; figure 5b). Ainsi, les valeurs de MOR sont plus élevées dans la bille de pied, ce qui était prévisible.



**Figure 5.** a) Relations entre le module d'élasticité (MOE, en MPa) et le rapport H/D des 129 sciages d'épinette blanche. Les courbes sont tracées pour différentes proportions de bois juvénile (bj), et les points sont les proportions observées selon 4 classes de proportions de bj. b) Relations entre le module de rupture (MOR, en MPa) et le rapport H/D de ces mêmes sciages. Les courbes sont tracées selon la position de la bille sur l'arbre (bas ou haut). Les points de couleurs différentes représentent les 2 positions. Les lignes pointillées représentent soit la valeur moyenne attendue du Conseil canadien du bois (CCB) pour produire des planches de 2 pouces x 4 pouces du grade n° 2 (moy att.), soit le 5<sup>e</sup> percentile de cette distribution.

De plus, nous présentons à la figure 6 les relations et les coefficients de corrélation de Pearson entre diverses variables de cette étude. Le rapport H/D est la variable la mieux corrélée aux variables réponses ( $r = 0,48$  pour le MOE et  $r = 0,47$  pour le MOR), et ce, de manière directement proportionnelle (avec un signe positif). Vient ensuite le DHP mesuré en 2018 ( $r = -0,36$  pour le MOE et  $r = -0,42$  pour le MOR), qui est corrélé de manière inversement proportionnelle (avec un signe négatif).

**Figure 6.** En dessous de la diagonale : relations entre le DHP (mm), le rapport H/D, la proportion peinte en rose (ou bois juvénile, %), la largeur de cime (cm), la hauteur totale (cm), le module d'élasticité du bois (MOE, en MPa) et le module de rupture du bois (MOR, en MPa) pour les arbres étudiés d'épinette blanche. Pour le MOE, le MOR et la proportion peinte en rose, les points représentent les valeurs mesurées sur les sciages (n = 129) alors que pour les autres variables, les points représentent les valeurs mesurées sur les arbres étudiés (n = 33). Au-dessus de la diagonale : coefficients de corrélation de Pearson entre les diverses variables (n = 129 sciages). La grosseur de la police utilisée pour les coefficients de corrélation reflète l'importance de chaque corrélation.

### 3.2. Analyses de la densité basale du bois

Comme pour les analyses statistiques effectuées sur les propriétés mécaniques du bois, nous avons d'abord testé si la densité basale du bois différait selon les traitements (éclaircie ou témoin) et la hauteur des disques sur l'arbre, en considérant le DHP initial mesuré en 2008 avant le traitement d'EC. D'après les résultats obtenus, à la suite de l'Ancova avec mesures répétées, le DHP mesuré en 2008 serait linéairement et négativement relié aux valeurs moyennes de densité basale ( $p < 0,001$ ) et la pente serait la même, peu importe les facteurs (absence d'interaction entre le DHP 2008 et les facteurs à l'étude). Aucun effet significatif du traitement (éclaircie ou témoin :  $p = 0,490$ ) ou de la hauteur des disques sur l'arbre ( $p = 0,240$ ) n'a été observé après que les valeurs moyennes de densité basale aient été ajustées pour le DHP initial mesuré en 2008. Lorsque testés en interaction, les effets du traitement (éclaircie ou témoin) et de la hauteur des disques se sont avérés non significatifs ( $p = 0,209$ ). Dans l'ensemble, les variances des effets aléatoires testés sont jugées nulles (c'est-à-dire que  $s_{Bloc}^2 = 0$ ;  $s_{Pe(Bloc)}^2 = 0$ ;  $s_{Arbre(Pe.Bloc).Hauteur_{274}}^2 = 0,00058$ ;  $s_{Arbre(Pe.Bloc).Hauteur_{533}}^2 = 0,00084$ ;  $s_{Arbre(Pe.Bloc).Hauteur_{792}}^2 = 0,00155$  et  $s_{Arbre(Pe.Bloc).Hauteur_{1051}}^2 = 0,00040$ ). Les variances résiduelles sont celles associées aux arbres, et elles sont inégales selon les hauteurs sur l'arbre, avec des covariances considérées comme nulles entre les hauteurs, soit UN(1)).

Le tableau 5 présente les statistiques descriptives de la densité basale des disques de bois, selon la hauteur de ceux-ci sur l'arbre et le traitement (éclaircie ou témoin).

**Tableau 5.** Valeurs moyennes (écarts-types entre parenthèses), minimales et maximales de la densité basale des disques de bois d'épinette blanche selon leur hauteur sur l'arbre et le traitement (éclaircie ou témoin).

Traitement	Hauteur du disque sur l'arbre (cm)	n	Densité basale (g·cm <sup>-3</sup> )		
			Moyenne (écart-type)	Minimum	Maximum
Éclaircie	274	16	0,34 (0,03)	0,29	0,38
	533	16	0,33 (0,03)	0,29	0,40
	792	16	0,35 (0,04)	0,29	0,44
	1 051	11	0,34 (0,02)	0,31	0,36
Témoin	274	17	0,36 (0,04)	0,31	0,43
	533	17	0,35 (0,04)	0,29	0,44
	792	17	0,36 (0,04)	0,30	0,47
	1 051	10	0,33 (0,02)	0,30	0,37

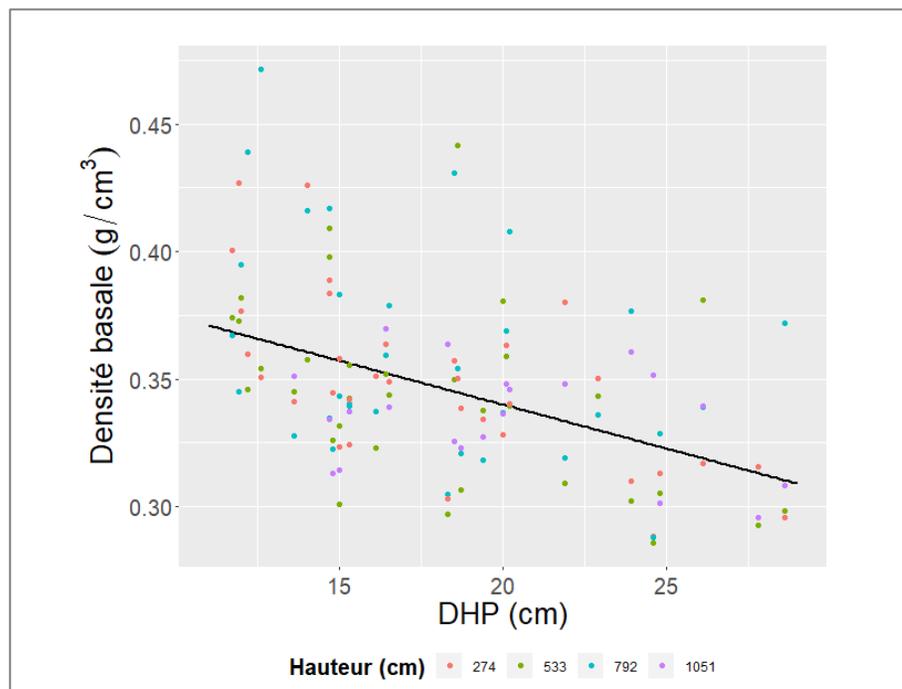
Le meilleur modèle pour décrire la variabilité de la densité basale du bois ne comprend que le DHP en 2018 comme variable explicative ( $p < 0,001$ ; tableau 6). Les autres variables, y compris la hauteur des disques (relation non colinéaire avec le DHP,  $r = 0,11$ ), n'ont pas permis d'améliorer le modèle. Comme le

montre la figure 7, la densité basale diminue de façon directement proportionnelle à l'augmentation du DHP.

**Tableau 6.** Caractéristiques du modèle retenu pour prédire la densité basale du bois d'épinette blanche.

Variable prédite	Modèle	Pseudo-R <sup>2</sup>	REQM*	EAM*	AIC*	BIC*	n
Densité basale	DHP	0,22	0,0316	0,0241	495,5	509,5	120

\* REQM = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne; EAM = erreur absolue moyenne; AIC = critère d'Akaike; BIC = critère d'information bayésien.



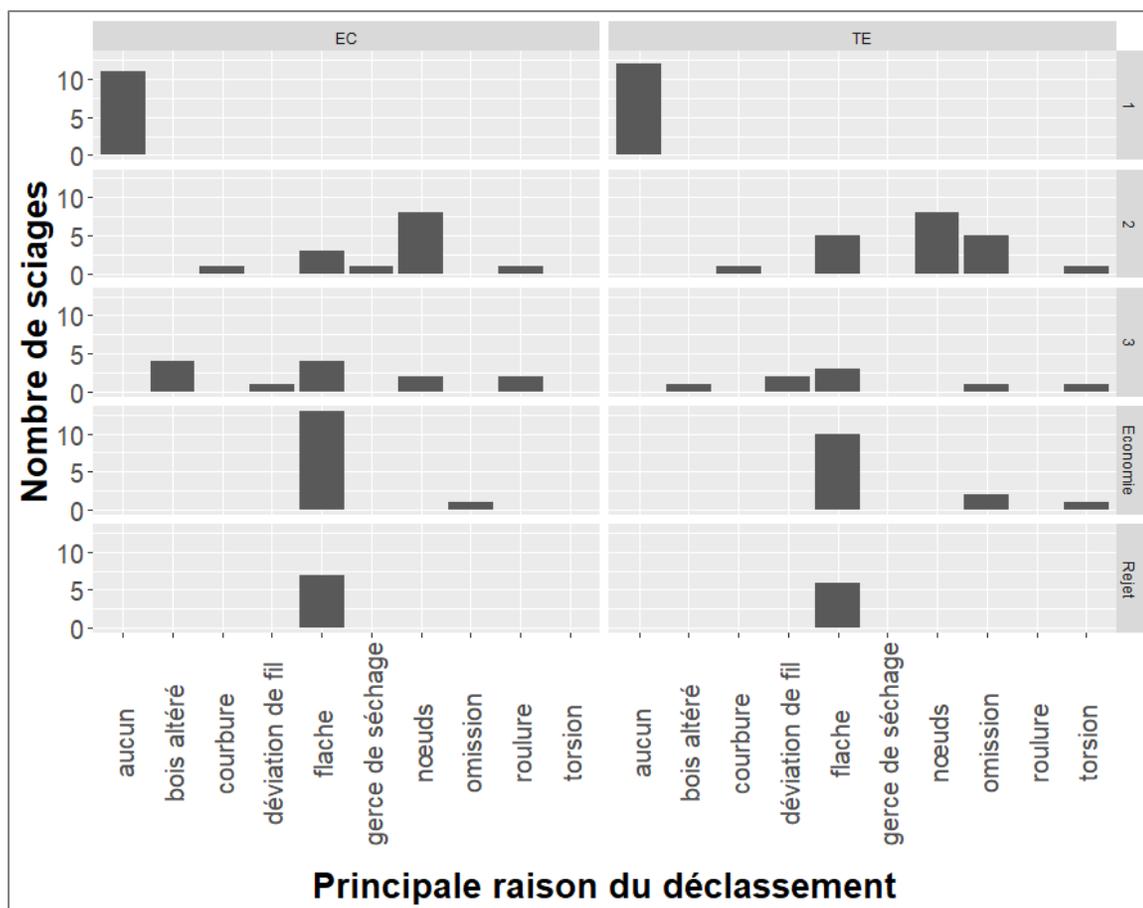
**Figure 7.** Relation entre la densité basale des disques de bois d'épinette blanche ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) et le DHP des arbres étudiés (cm). La couleur des points correspond à la hauteur de prélèvement des disques sur l'arbre, en centimètres.

Les effets aléatoires associés aux blocs et aux parcelles sont jugés nuls, alors que les variances résiduelles associées aux arbres sont inégales selon les hauteurs sur l'arbre, avec des covariances considérées comme nulles entre les hauteurs, soit  $\text{UN}(1)$  ( $s_{\text{Bloc}}^2 = 0$ ;  $s_{\text{Pe}(\text{Bloc})}^2 = 0$ ;  
 $s_{\text{Arbre}(\text{Pe.Bloc}).\text{Hauteur}_{274}}^2 = 0,00054$ ;  $s_{\text{Arbre}(\text{Pe.Bloc}).\text{Hauteur}_{533}}^2 = 0,00080$ ;  $s_{\text{Arbre}(\text{Pe.Bloc}).\text{Hauteur}_{792}}^2 = 0,00153$ ;  
 $s_{\text{Arbre}(\text{Pe.Bloc}).\text{Hauteur}_{1051}}^2 = 0,00049$ ).

### 3.3. Classement des sciages

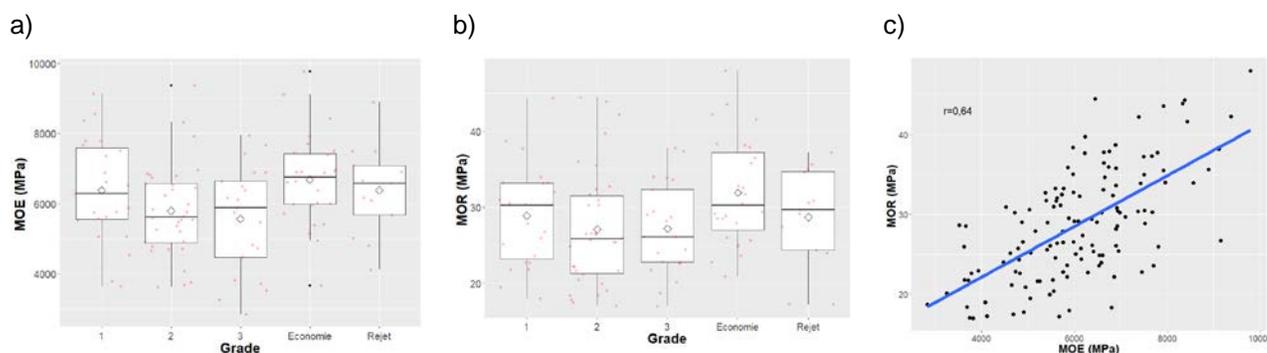
D'après la figure 8, le nombre de sciages présentant des défauts serait à peu près le même pour les arbres ayant subi un premier traitement d'EC que pour les arbres témoins. Ainsi, le bois d'épinette blanche n'aurait

pas tendance à être déclassé davantage après une première EC. Dans l'ensemble, les principales raisons du déclassement pour le grade n° 2 sont les nœuds, alors que pour le grade n° 3, il s'agirait plutôt de flache et de bois altéré. Dans le cas des grades économie et rejet, la flache est la principale cause de déclassement. Dans l'ensemble, environ la moitié des sciages sont classés selon les meilleurs grades (n° 1 ou n° 2).



**Figure 8.** Nombre de sciages d'épinette blanche et principale raison de leur déclassement, par grade (de haut en bas : n° 1, n° 2, n° 3, économie et rejet) et par traitement (EC = éclaircie, TE = témoin).

Lorsqu'on représente la variation des propriétés mécaniques du bois en fonction des grades de sciage (figure 9a et 9b), on observe que les valeurs de MOE et de MOR diminuent du grade n° 1 au grade n° 3. De plus, on remarque que les sciages du grade « économie » ont tout de même obtenu des valeurs élevées de MOE et MOR, malgré la présence accrue de défauts. La flache étant un défaut causé par la présence d'écorce sur le sciage, elle ne réduit pas nécessairement les propriétés mécaniques du bois comme peuvent le faire d'autres défauts comme les nœuds, les roulures, les courbures ou le bois altéré. Rappelons que cette étude ne visait pas à optimiser le rendement des sciages, mais plutôt à tester les propriétés mécaniques du bois d'épinette blanche provenant de plantations âgées de 30 ans.



**Figure 9.** Diagramme en boîte à moustaches (*box plot*) représentant la répartition : a) des valeurs de module d'élasticité (MOE), et b) de module de rupture (MOR) en fonction des grades de sciage (n° 1, n° 2, n° 3, économie et rejet). La ligne foncée à l'intérieur de la boîte représente la médiane, le losange correspond à la moyenne, et les limites inférieure et supérieure de la boîte représentent respectivement le 1<sup>er</sup> et le 3<sup>e</sup> quartile. Les extrémités des moustaches se situent à 1,5 fois l'écart interquartile (différence entre le 3<sup>e</sup> et le 1<sup>er</sup> quartile). Les points roses représentent les valeurs observées de l'ensemble des sciages testés, tandis que les points noirs représentent les valeurs jugées extrêmes sous l'hypothèse d'une distribution normale. c) Relation entre le MOE et le MOR des sciages testés en flexion statique.

Par ailleurs, nous avons pu déterminer que les valeurs de MOE étaient généralement bien corrélées aux valeurs de MOR (coefficient de corrélation de 0,64,  $p < 0,001$ ; figure 9c). Cela est important puisque le MOE est souvent utilisé pour prédire les valeurs de MOR.

#### 4. Discussion

Cette étude nous a permis d'obtenir des données sur les propriétés du bois d'épinette blanche à la suite de travaux d'EC dans une plantation de 30 ans au Québec. Nos résultats rejoignent ceux d'autres études sur les propriétés mécaniques du bois de l'épinette blanche âgée de plus de 30 ans, comme celles de Mottet *et al.* (2006) et de Duchesne et Tanguay (2011). Pour l'ensemble des planches de 2 pouces x 4 pouces que nous avons testées et qui provenaient des parcelles éclaircies et témoins, les valeurs de MOE étaient de  $6\,081 \pm 1\,381$  MPa (moyenne  $\pm$  un écart-type), et celles de MOR étaient de  $28,8 \pm 6,9$  MPa. À titre de comparaison, Mottet *et al.* (2006) avaient obtenu des moyennes de 6 872 MPa (MOE) et de 32,1 MPa (MOR) pour le bois d'épinettes blanches de 34 ans plantées à 3 086 tiges·ha<sup>-1</sup> dans le secteur de Valcartier (Québec), alors que Duchesne et Tanguay (2011) avaient obtenu des valeurs moyennes de 8 031 MPa (MOE) et de 30,1 MPa (MOR) pour le bois d'épinettes blanches de 60 ans plantées à 1 370 tiges·ha<sup>-1</sup> à Thunder Bay (Ontario). En revanche, Paradis (2011) avait obtenu des valeurs de MOE beaucoup plus élevées (7 000–17 000 MPa) pour des épinettes blanches de 60 ans récoltées à la forêt expérimentale de Petawawa (Ontario). Toutes ces études avaient utilisé une approche similaire afin de tester les propriétés mécaniques des sciages, soit un banc d'essai en flexion statique. D'après la publication de Jessome (2000), qui fournit des données sur les propriétés du bois de nombreuses essences résineuses et feuillues au Canada, les valeurs moyennes de rigidité (MOE) et de résistance mécanique (MOR) mesurées à un taux d'humidité de 12 % seraient respectivement de 9 930 MPa et de 62,7 MPa pour

du bois d'épinettes blanches croissant au Nouveau-Brunswick, au Québec, au Manitoba, en Saskatchewan et en Alberta. Ces valeurs s'apparenteraient à celles du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill), pour lequel on a observé des valeurs moyennes de 9650 MPa (MOE) et de 58,3 MPa (MOR) (mesurées à 12 % d'humidité) au Québec, au Manitoba et en Saskatchewan. En forêt naturelle, Giroud *et al.* (2017) rapportaient des valeurs de rigidité moyennes de 11 200 MPa pour des épinettes blanches dont l'âge moyen était de 74 ans. Notons toutefois que dans cette dernière étude, les méthodes d'évaluation différaient des autres, ce qui peut limiter l'interprétation de la comparaison. En effet, Giroud *et al.* (2017) ont estimé la rigidité du bois à partir des mesures réalisées au Silviscan et au densitomètre à rayons X.

Les valeurs que nous rapportons ici pour les propriétés mécaniques de l'épinette blanche sont légèrement inférieures à celles d'autres essences de reboisement comme le mélèze hybride (*Larix x marschlinii* Coaz.) et l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.). En effet, Levoy *et al.* (2021) rapportent des valeurs moyennes de 7 632 MPa (MOE) et de 36,3 MPa (MOR) pour des mélèzes hybrides âgés de 20 ans, tandis que Mottet *et al.* (2006) rapportaient des valeurs moyennes de 9 334 MPa (MOE) et de 41,4 MPa (MOR) pour des épinettes de Norvège âgées de 32 à 34 ans plantées avec une densité initiale variant de 1 736 à 3 086 tiges·ha<sup>-1</sup>.

Pour le moment, les valeurs de rigidité que nous avons obtenues sont plus petites que les moyennes généralement attendues par le Conseil canadien du bois (Barrett et Lau 1994) pour la production de planches de 2 pouces x 4 pouces (bois de structure des grades « structure choisie », n° 1, n° 2 et n° 3) selon les critères de la Commission nationale de classification des sciages (NLGA 2017). Toutefois, pour la majorité des sciages obtenus dans les parcelles éclaircies, le MOE devrait dépasser le seuil minimal de 6 090 MPa établi par le Conseil canadien du bois pour la production de planches de 2 pouces x 4 pouces du grade n° 2, ce qui correspond au 5e percentile de la distribution (figure 5). Comme la plantation de cette étude est encore jeune (30 ans), nous croyons que les propriétés mécaniques du bois continueront de s'améliorer jusqu'à la coupe finale. En effet, à ce stade-ci, les arbres sont formés d'une grande proportion de bois juvénile. Vers 50 ans, lorsque la plantation aura atteint l'âge de la récolte, la proportion de bois mature sera plus importante, ce qui permettra d'atteindre des valeurs plus élevées pour les propriétés mécaniques.

Rappelons cependant qu'un taux de croissance trop rapide des arbres pourrait nuire aux propriétés mécaniques du bois. Comme on a pu l'observer à partir des relations et des coefficients de corrélation présentés à la figure 6, les valeurs de DHP étaient négativement corrélées aux valeurs de MOE et de MOR. De plus, nous avons observé qu'une plus grande proportion de bois juvénile était associée à des propriétés mécaniques plus faibles. Les tiges les plus élancées (et donc, celles de plus petit diamètre; figure 5a et 5b) étaient aussi celles dont le bois présentait les meilleures propriétés mécaniques.

Nos modèles ne permettent d'expliquer qu'environ un tiers de la variabilité totale observée dans les données de MOE et de MOR (tableau 4). Ainsi, une part importante de la variabilité n'a pas pu être expliquée à partir des variables que nous avons testées, plusieurs étant mesurées à l'échelle de l'arbre.

Toutefois, les résultats associés aux effets aléatoires que nous avons testés montrent que la plus grande part de la variabilité existait entre les billes d'un arbre, de même qu'entre les arbres d'une même parcelle et d'un même bloc. Dans ces conditions, il est plus difficile de définir des modèles qui soient précis, à tout le moins avec un nombre restreint de parcelles. Cette difficulté était prévisible, puisqu'on sait que les propriétés du bois varient beaucoup à l'intérieur d'un même arbre, de même qu'entre les arbres (Jessome 2000).

Dans le cadre des modalités d'EC que nous avons testées, c.-à-d. l'EC hâtive neutre de forte intensité, nous n'avons pas observé de différence significative entre les propriétés mécaniques des sciages provenant des arbres croissant dans les parcelles ayant subi une première EC et ceux provenant des parcelles témoins. Ainsi, la pratique de l'EC suivant ces modalités n'entraînerait pas de diminution des propriétés mécaniques du bois. Plusieurs autres auteurs ont remarqué qu'une EC pratiquée au bon moment entraîne des répercussions minimales sur les propriétés mécaniques ou chimiques du bois (Cameron et Thomas 2008, Chiu *et al.* 2007, Guller 2007, Jaakkola *et al.* 2005, Martiarena *et al.* 2014, Mörling 2002, Vincent *et al.* 2011) ou faibles (Jyske *et al.* 2010, Mäkinen *et al.* 2015). Même la production de bois de compression (qui est généralement reconnue pour augmenter à la suite de travaux d'EC) pourrait s'en voir restreinte, ce qui laisse penser que les arbres poussant en milieu plus serré dévierait davantage de leur axe principal pour obtenir la lumière dont ils ont besoin (Cameron et Thomas 2008).

De plus, nous avons pu remarquer (figure 8) que les sciages produits à partir des arbres de parcelles éclaircies ne présentaient pas plus de défauts que ceux produits à partir des arbres de parcelles témoins. Cette observation est importante, puisqu'on associe souvent l'EC à la formation de plus grosses branches et donc, de plus gros nœuds. Cela n'a pas été le cas selon les modalités d'EC que nous avons testées.

Quant à la densité basale, nous avons observé que celle-ci diminuait avec une augmentation du DHP (figure 7). D'autres études avaient aussi observé cette même tendance chez l'épinette blanche de plantation (Barbour 1988, Corriveau *et al.* 1991, Zhang et Koubaa 2009). Toutefois, le fait que le pourcentage de la variabilité totale expliquée par la relation que nous avons développée était plutôt faible porte à croire que le DHP, à lui seul, ne peut expliquer qu'une faible part de la variabilité de la densité du bois (tableau 6). D'après les résultats de notre modélisation, une épinette blanche âgée de 30 ans et ayant un DHP de 10 cm présenterait une densité moyenne d'environ  $0,37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  comparativement à  $0,32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  pour une autre ayant un DHP de 25 cm (figure 7). Ces différences, quoique minimales, peuvent avoir une certaine importance dans l'estimation du carbone séquestré à l'échelle d'une plantation. En effet, la densité basale influence directement la quantité de biomasse, qui, à son tour, influence la quantité de carbone. Les arbres au bois de faible densité sont aussi réputés pour être plus fragiles et plus susceptibles de se casser lors de tempêtes ou de chutes de neige (Spatz et Bruechert 2000). Ceux-ci seraient aussi plus sensibles aux problèmes de cavitation (Sebastian-Azcona *et al.* 2018). Dans le futur, il faudrait bien considérer ces aspects, surtout dans un contexte de changements climatiques, dans lequel les perturbations naturelles et les risques de sécheresse continuent sans cesse de s'aggraver.

Nous n'avons pas observé d'effet marquant de la hauteur d'où provenaient les disques de bois sur les valeurs de densité basale. Seul le DHP avait un effet significatif sur cette variable. Cela est peut-être causé par le fait que nous n'avons pas récolté de disques de bois à la souche. Néanmoins, ces variations de densité du bois le long de la tige sont aussi connues pour varier selon les essences (Zobel et van Buijtenen 1989). Par exemple, la densité du bois de l'épinette noire (Alteyrac *et al.* 2005) augmenterait en se déplaçant vers le haut de la tige, tout comme celle du bois de l'épinette de Norvège (Billard *et al.* 2020; Longuetaud *et al.* 2017). Au contraire, la densité du bois de pin gris (Zhang *et al.* 2005) et du mélèze hybride (Levoy *et al.* 2021) diminuerait de la base de la tige vers le haut. Pour l'épinette blanche, les variations de la densité du bois suivraient des comportements différents selon leurs distributions géographiques. D'après quelques études rapportées dans Zhang et Koubaa (2009), certains auteurs constatent une augmentation constante de la densité du bois de la base vers le sommet de la tige, alors que d'autres rapportent une augmentation suivie d'une baisse. Dans l'ensemble, nous avons obtenu une valeur moyenne de densité basale de  $0,35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  à une hauteur de 2,74 m, pour les tiges provenant tant des parcelles éclaircies que témoins. Cette valeur est semblable à celle publiée dans le rapport de Duchesne et Tanguay (2011), qui rapportaient avoir mesuré une densité basale moyenne de  $0,36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  à hauteur de poitrine pour des épinettes blanches dans une plantation de 60 ans en Ontario. Mottet *et al.* (2006), quant à eux, ont mesuré une densité basale moyenne de  $0,31 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  pour des épinettes blanches de 34 ans. Nos valeurs de densité basale du bois sont légèrement inférieures à celles mesurées sur des épinettes blanches issues de forêts naturelles au Québec (moyenne pour des tiges d'épinette blanche d'âge moyen de 74 ans dans l'étude de Giroud *et al.* 2017 :  $0,39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ); toutefois, elles sont équivalentes à celle de  $0,354 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  publiée pour l'épinette blanche dans le rapport de Jessome (2000), légèrement supérieures à celle ( $0,335 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) pour le sapin baumier, et inférieure à celle de  $0,44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  pour le mélèze hybride planté au Québec (Levoy *et al.* 2021).

## 5. Conclusion et limites de l'étude

Ce projet a permis de documenter les propriétés mécaniques et physiques du bois d'épinettes blanches dans une plantation âgée de 30 ans. Jusqu'à présent, peu d'études avaient permis de caractériser ces propriétés du bois au Québec. Outre l'étude menée par Mottet *et al.* (2006) et certaines recherches menées dans le secteur de Rimouski dans lesquelles les propriétés du bois avaient été évaluées de manière non destructive, nous croyons que la présente étude est la deuxième à présenter des données sur les propriétés mécaniques des sciages produits. Ces résultats proviennent d'un seul dispositif établi dans la région de Portneuf et d'un nombre restreint d'observations (36 arbres études répartis dans 6 parcelles). Par conséquent, il serait important, dans le futur, de comparer ces résultats avec ceux d'autres dispositifs d'épinette blanche dans des plantations établies ailleurs dans la province. L'acquisition de nouvelles données est essentielle pour mieux comprendre le potentiel de transformation des produits du bois de demain. Ces informations pourront orienter les stratégies d'aménagement et aideront à optimiser la chaîne de valeur des produits du bois. Dans l'avenir, les plants qui seront mis en terre auront un bagage génétique

différent de ceux plantés il y a 30 ans. L'acquisition continue de connaissances sur les propriétés de ces bois permettra de mieux orienter la prise de décisions.

## 6. Remerciements

Ce projet a reçu un soutien financier du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (Canada) par l'entremise du projet de recherche n° 142332027 de la Direction de la recherche forestière, dirigé actuellement par Luca Serban. Nos remerciements s'adressent à Guy Prigent et au personnel de l'unité de gestion de Portneuf, pour la mise en place le dispositif de recherche au Lac-à-Charles, il y a déjà plusieurs années. Nous remercions également les personnes qui ont réalisé le suivi et mis en place les diverses modalités de traitements sylvicoles du dispositif au fil des années. Pour la réalisation de cet avis technique, nous aimerions principalement remercier Jean Noël pour l'aide apportée lors de la préparation des cartes présentées aux figures 1 et 2. Également, nous tenons à exprimer notre gratitude envers Guy Chantal, Alexandre Dumas et Réjean Poliquin qui ont réalisé les travaux de terrain et de laboratoire. De plus, nous aimerions remercier Josianne DeBlois ainsi qu'Alexis Achim qui ont permis d'améliorer la version préliminaire de cet avis technique grâce à leurs commentaires. Finalement, nous tenons à souligner le travail d'édition accompli par Denise Tousignant et celui de mise en page réalisé par Alexandre Dallaire-Théroux.

## 7. Références

- Alteyrac, J., S. Zhang, A. Cloutier et J.-C. Ruel, 2005. *Influence of stand density on ring width and wood density at different sampling heights in black spruce (Picea mariana (Mill.) B.S.P)*. Wood Fiber Sci. 37(1): 83-94. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/220/220>
- ASTM-D198-15, 2015. *Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes*. ASTM Int. West Conshohocken, PA (États-Unis). 28 p.
- ASTM-D2395-02, 2002. *Standard test methods for specific gravity of wood and wood based materials*. ASTM Int. West Conshohocken, PA (États-Unis). 8 p.
- Auty, D., J. Moore, A. Achim, A. Lyon, S. Mochan et B. Gardiner, 2017. *Effects of early respacing on the density and microfibril angle of Sitka spruce wood*. Forestry 91(3): 307-319. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx004>
- Barbour, J., 1988. *A review of the literature on the wood quality of white spruce (Picea glauca (Moench) Voss)*. Forintek Canada Corp. Ottawa, ON. 74 p.
- Barrett, J.D. et W. Lau, 1994. *Canadian lumber properties*. Canadian Wood council. Ottawa, ON. 345 p.
- Billard, A., R. Bauer, F. Mothe, M. Jonard, F. Colin et F. Longuetaud, 2020. *Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components*. Ann. For. Sci. 77(4): 103. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00999-1>

- Burnham, K.P. et D.R. Anderson, 2002. *Model selection and multimodel inference: A practical-theoretic approach*. 2<sup>e</sup> Éd. Springer-Verlag, New York, NY (États-Unis). 488 p.  
<https://doi.org/10.1007/b97636>
- Cameron, A. et K. Thomas, 2008. *Effect of thinning on the development of compression wood in stems of Corsican pine*. Eur. J. For. Res. 127(3): 247-251. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0200-8>
- Chiu, C.-M., C.-J. Lin et S.-Y. Wang, 2007. *Tracheid length and microfibril angle of young Taiwanian grown under different thinning and pruning treatments*. Wood Fiber Sci. 37(3): 437-444.
- Corriveau, A., J. Beaulieu et G. Daoust, 1991. *Heritability and genetic correlations of wood characters of upper Ottawa valley white spruce populations grown in Quebec*. For. Chron. 67(6): 698-705.  
<https://doi.org/10.5558/tfc67698-6>
- Duchesne, I. et F. Tanguay, 2011. *Effects of initial spacing on tree and wood attributes, lumber quality and value in white spruce—the stanley spacing trial case study*. FPInnovations Report. 34 p.  
<https://library.fpinnovations.ca/media/WP/E4731.pdf>
- Giroud, G., J. Bégin, M. Defo et C.-H. Ung, 2017. *Regional variation in wood density and modulus of elasticity of Quebec's main boreal tree species*. For. Ecol. Manage. 400: 289-299.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.019>
- Guller, B., 2007. *The effects of thinning treatments on density, MOE, MOR and maximum crushing strength of Pinus brutia Ten. wood*. Ann. For. Sci. 64(4): 467-475. <https://doi.org/10.1051/forest:2007024>
- Jaakkola, T., H. Mäkinen et P. Saranpää, 2005. *Wood density in Norway spruce: Changes with thinning intensity and tree age*. Can. J. For. Res. 35(7): 1767-1778. <https://doi.org/10.1139/x05-118>
- Jessome, A.P., 2000. *Strength and related properties of woods grown in Canada*. Forintek Canada, Sainte-Foy, QC. Publication n° SP 514-E. 37 p.  
<https://library.fpinnovations.ca/fr/permalink/fpipub42062>
- Jyske, T., S. Kaakinen, U. Nilsson, P. Saranpää et E. Vapaavuori, 2010. *Effects of timing and intensity of thinning on wood structure and chemistry in Norway spruce*. Holzforschung 64(1): 81-91.  
<https://doi.org/10.1515/hf.2010.013>
- Krajnc, L., N. Farrelly et A.M. Harte, 2019. *The effect of thinning on mechanical properties of Douglas fir, Norway spruce, and Sitka spruce*. Ann. For. Sci. 76(3): 25-37. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0787-6>
- Kvålseth, T. O., 1985. *Cautionary note about R<sup>2</sup>*. Am. Stat. 39(4): 279-285. <https://doi.org/10.2307/2683704>
- Levoy, L., J. Barrette, J. Ricard, M. Perron, G. Giroud et C. Ward, 2021. *Qualité du bois du mélèze hybride non élagué dans la région de Lanaudière*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs; Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-23. 21 p.  
[https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT\\_SSRF-23.pdf](https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SSRF-23.pdf)

- Longuetaud, F., F. Mothe, P. Santenoise, N. Diop, J. Dlouha, M. Fournier et C. Deleuze, 2017. *Patterns of within-stem variations in wood specific gravity and water content for five temperate tree species*. Ann. For. Sci. 74(3): 64. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0657-7>
- Mäkinen, H., J. Hynynen et T. Penttilä, 2015. *Effect of thinning on wood density and tracheid properties of Scots pine on drained peatland stands*. Forestry 88(3): 359-367. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv006>
- Martiarena, R., E. Crechi, M. Pinazo, M.P.A. Von Wallis, J. Marquina et S. Monteoliva, 2014. *Effect of thinning treatment on growth and wood density of Pinus taeda planted in Misiones, Argentina*. Ciênc. Florest. 24(3): 655-663.
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2020. Engagée dans la création de richesse : Stratégie nationale de production de bois. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. 50 p. [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/forets-faune-parcs/publications-adm/strategies/STR\\_production\\_bois\\_MFFP.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/forets-faune-parcs/publications-adm/strategies/STR_production_bois_MFFP.pdf)
- Moore, J., A. Achim, A. Lyon, S. Mochan et B. Gardiner, 2009. *Effects of early re-spacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber*. For. Ecol. Manage. 258(7): 1174-1180. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.009>
- Mörling, T., 2002. *Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine*. Ann. For. Sci. 59(1): 29-40. <https://doi.org/10.1051/forest:2001003>
- Mottet, M.-J., G. Daoust et S.Y. Zhang, 2006. *Impact of the white pine weevil (Pissodes strobi [Peck]) on Norway spruce (Picea abies [L.] Karst.) plantations. Part 2: Lumber properties*. For. Chron. 82(6): 834-843. <https://doi.org/10.5558/tfc82834-6>
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2. Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les publications du Québec, Québec, QC. 744 p.
- [NLGA] National Lumber Grades Authority/Commission nationale de classification des sciages, 2017. « Règles de classification nationale ». Dans : *Règles de classification pour le bois d'œuvre canadien*. En vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2017. p. 73-89. <http://nlga.org/wp-content/uploads/2017/12/NLGA-GR-FR-Sect-4-R%C3%88GLES-DE-CLASSIFICATION-NATIONALE-pgs73-89.pdf>
- Paradis, N., 2011. *Relations entre les propriétés mécaniques du bois et les vitesses acoustiques mesurées à trois étapes du processus de transformation du bois*. Université Laval, Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt. Mémoire de maîtrise. 73 p. <https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/22092/1/27950.pdf>

- Prégent, G., 1998. *L'éclaircie des plantations*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 133. 39 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire133.pdf>
- Prégent, G., 2003. *Caractéristiques des arbres coupés et du peuplement résiduel à la première éclaircie commerciale de plantations résineuses*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 143. 54 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire143.pdf>
- R Core Team, 2021. *R: A language and environment for statistical computing*. Foundation for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienne (Autriche). <https://www.R-project.org>
- SAS Institute Inc., 2015. *SAS/STAT® 14.1 User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis).
- Schneider, R., S. Zhang, D.E. Swift, J. Begin et J.-M. Lussier, 2008. *Predicting selected wood properties of jack pine following commercial thinning*. Can. J. For. Res. 38(7): 2030-2043. <https://doi.org/10.1139/X08-038>
- Schwarz, G., 1978. *Estimating the dimension of a model*. Ann. Stat. 6(2): 461-464. <http://doi.org/10.1214/aos/1176344136>
- Sebastian-Azcona, J., U.G. Hacke et A. Hamann, 2018. *Adaptations of white spruce to climate: Strong intraspecific differences in cold hardiness linked to survival*. Ecol. Evol. 8(3): 1758-1768. <https://doi.org/10.1002/ece3.3796>
- Spatz, H.-C. et F. Bruechert, 2000. *Basic biomechanics of self-supporting plants: Wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree*. For. Ecol. Manage. 135(1-3): 33-44. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00296-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00296-6)
- Vincent, M., C. Krause et A. Koubaa, 2011. *Variation in black spruce (Picea mariana (Mill.) BSP) wood quality after thinning*. Ann. For. Sci. 68(6): 1115-1125. <http://doi.org/10.1007/s13595-011-0127-6>
- Wang, S.-Y., C.-J. Lin et C.-M. Chiu, 2003. *Effects of thinning and pruning on knots and lumber recovery of Taiwania (Taiwania cryptomerioides) planted in the Lu-Kuei area*. J. Wood Sci. 49(5): 444-449. <http://doi.org/10.1007/s10086-002-0495-5>
- Wang, X. et R.J. Ross, 2008. « Acoustic evaluation of Alaskan young-growth wood ». Dans : *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. 10 au 12 septembre 2007. Madison, WI (États-Unis). For. Prod. Soc. p. 97-105.
- Zhang, S.Y. et A. Koubaa, 2009. *Les résineux de l'Est du Canada : écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages*. FPInnovations. Publication spéciale SP-526F, Québec, QC, 370 p. <https://library.fpinnovations.ca/fr/permalink/fpipub39152>

Zhang, S.Y., G. Chauret, I. Duchesne et R. Schneider, 2005. *Maximizing the value of jack pine resource*. Forintek Canada Corp. Sainte-Foy (Québec). 161 p. General Revenue Project n° 2403, E-3970. <https://library.fpinnovations.ca/fr/permalink/fpjpeg5985>

Zobel, B.J. et J.P. van Buijtenen, 1989. « Chapitre 1 - Wood variation and wood properties ». Dans : *Wood variation*. Springer Series in Wood Science. Springer, Berlin, Heidelberg (Allemagne). p. 1-32. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-74069-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-74069-5_1)

Julie Barrette, ing.f., Ph. D.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Lise Charette, stat. ASSQ, B. Sc.

Service du soutien scientifique

**Correspondance :**

Julie Barrette  
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs  
Direction de la recherche forestière  
2700, rue Einstein, bureau B.1.145  
Québec (Québec) G1P 3W8  
Tél : 418 643-7994 poste 706578  
Courriel : [julie.barrette@mffp.gouv.qc.ca](mailto:julie.barrette@mffp.gouv.qc.ca)

---

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Barrette, J. et L. Charette, 2022. *Évaluation des propriétés du bois d'épinette blanche à la suite de travaux d'éclaircie commerciale dans une plantation de 30 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-29. 27 p.

**Annexe.** Carte du dispositif de recherche du Lac-à-Charles, dans Portneuf, montrant la répartition des parcelles selon la période d'intervention (période), le type d'éclaircie commerciale (type) et l'intensité du prélèvement (intensité, en % de la surface terrière initiale) (source : Guy Chantal, Direction de la recherche forestière).

