

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Scaling MoE and MoR measurements for white spruce (*Picea glauca*) from mini-clear samples to full length lumber and relating the results to tree-level variables

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en gestion de la faune et de ses habitats

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© Li Li

Août 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Composition du jury :

Alain Caron, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Robert Schneider, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Alexis Achim, codirecteur de recherche, Université Laval

Alain Cloutier, examinateur externe, Université Laval

Dépôt final le 18 août 2014

AVANT-PROPOS

Cette étude a été réalisée sous la direction de Robert Schneider, cotitulaire de la Chaire de recherche sur la forêt habitée au Département de biologie, géographie et chimie de l'Université du Québec à Rimouski et sous la codirection d'Alexis Achim, professeur au Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval. Le présent travail s'intègre dans le cadre du réseau stratégique CRSNG sur l'aménagement forestier pour les produits à valeur ajoutée.

Le document a été rédigé dans le cadre d'une maîtrise menant au grade de maître ès sciences (M.Sc.). Il se compose de trois chapitres. Le premier chapitre propose une mise en contexte général et une revue de littérature. Le chapitre 2 vise à explorer l'effet du changement d'échelle sur les propriétés mécaniques. Ce chapitre a été écrit sous la forme d'un article en anglais qui sera soumis pour publication. Le dernier chapitre présente un retour sur les hypothèses ainsi que des recommandations.

J'aimerais d'abord remercier mon directeur. Il m'a permis de venir au Québec en m'offrant un projet en foresterie. Ensuite il a pu trouver un soutien financier. Enfin je suis reconnaissant du temps qu'il m'a accordé, de sa patience et pour les conseils qu'il m'a donnés pour la direction de mon projet et pour l'aide à la rédaction. Je voudrais aussi remercier mon codirecteur pour ses conseils concernant la méthodologie et la rédaction de l'article.

Le projet n'aurait pas pu voir le jour sans l'implication des équipes d'Alexis Achim (Paradis Normand), de John Caspersen (Adam Kuprevicius) et de Frank Berninger (Huges Power) dans la récolte des données sur le terrain et la prise de mesures en laboratoire. À mes collègues d'études (Sharad et Lu) qui m'ont beaucoup aidé pour que j'apprivoise les connaissances sur la forêt et en statistiques.

RÉSUMÉ

Les gestionnaires forestiers doivent prendre en considération plusieurs éléments tels que l'effet des traitements sylvicoles sur la qualité du bois pour établir leurs choix. Pour quantifier la qualité du bois d'œuvre, les propriétés mécaniques en flexion sont souvent employées. Ces mesures peuvent provenir de pièces de bois d'œuvre, ou sur des éprouvettes de petite taille sans défaut. Il est toutefois difficile de comparer les mesures des échantillons de tailles différentes, en partie car les essais en flexions emploient des méthodes différentes, et parce que le bois est un matériau hétérogène avec des défauts. Ce projet propose de comparer les modules d'élasticité (MoE) et de rupture (MoR) provenant de 279 pièces de bois d'œuvre (3,8 x 8,9 x 250 cm) et de 544 éprouvettes (1 x 1 x 15 cm). Les échantillons ont été prélevés sur 32 épinettes blanches (*Picea glauca*) ayant été récoltées dans une plantation à la forêt expérimentale de Petawawa, Ontario. Les propriétés mécaniques ont été mesurées par des essais en flexion statique à 3 points (éprouvettes) et 4 points (bois d'œuvre). Étant donné que les éprouvettes n'étaient pas associées au bois d'œuvre, une technique de rééchantillonnage a été développée afin de jumeler une éprouvette à une pièce de bois d'œuvre. Cette technique, appliquée 10 000 fois, a permis de bâtir une distribution de l'estimation des paramètres pour les variables à l'échelle de la cime, de l'arbre et du peuplement. Les résultats montrent que le MoE du bois d'œuvre était 29% plus grand que le MoE de l'éprouvette et inversement, que le MoR du bois d'œuvre était presque la moitié du MoR de l'éprouvette (53%). Les rapports du MoR et MoE sont proportionnels au diamètre à hauteur de poitrine et la longueur relative de la cime et inversement proportionnelle à la surface basale des 5 branches les plus grosses.

Mots clés: module d'élasticité, module de rupture, bois d'œuvre, éprouvette, technique de rééchantillonnage, épinette blanche (*Picea glauca*)

ABSTRACT

Stiffness and strength are generally obtained on either small clearwood or on full-length lumber for quantifying wood quality. Scaling the values between sample sizes is hard due to the differences in testing method, wood properties and defect occurrence. This study explored the relationship of stiffness (MoE) and strength (MoR) measures between two sample sizes as well as the effects of tree-level variables on the scaling process. Tree and branch data were collected from 32 white spruce (*Picea glauca*) trees from a spacing trial in eastern Canada established in 1936. Each selected tree was bucked into logs and bolts, which were then processed into 3.8x8.9x250 cm and 1x1x15cm pieces. The moduli were obtained from 4- and 3-point bending tests for lumber and mini-clear, respectively. The lumber to mini-clear relation was modeled with a resampling technique, with two pairing methods run 10 000 times each. The MoE and MoR ratios were then related to stand, tree and crown characteristics using a linear regression for each resampling run, and the distribution of the estimated parameters used for inference. Lumber MoE was 29% larger than mini-clear MoE, unlike the lumber MoR which was 53% of the mini-clear MoR. Furthermore, in both simulating scenarios, DBH and crown ratio were positively proportional to both scaling ratios; contrarily, basal area of 5 biggest branches was negatively proportional to scaling ratios. The variables explaining the MoE and MoR ratios in final models were similar between two scenarios.

Keywords: modulus of elasticity, modulus of rupture, lumber, mini-clear, resampling technique, white spruce (*Picea glauca*)

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	VII
RÉSUMÉ	IX
ABSTRACT	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES FIGURES	XVII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES EN FLEXION DU BOIS	3
1.2 MESURE DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES EN FLEXION	6
CHAPITRE 2 SCALING MOE AND MOR MEASUREMENTS FOR WHITE SPRUCE FROM MINI-CLEAR SAMPLES TO FULL-LENGTH LUMBER AND RELATING THE RESULTS TO TREE-LEVEL VARIABLES.....	9
ABSTRACT	9
2.1 INTRODUCTION	10
2.2 MATERIAL.....	11
2.3 METHOD	14
2.4 RESULTS	18
2.5 DISCUSSION	21
2.6 CONCLUSION.....	25
ACKNOWLEDGEMENTS	25
CHAPTIRE 3 CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS DE L'ÉTUDE	27
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31

LISTE DES TABLEAUX

Table 1. Mean characteristics of tree, crown and branch of each treatment level.....	12
Table 2. Mechanical properties and other wood properties of mini-clear and lumber	14

LISTE DES FIGURES

Figure 1. The stability of parameter β_{0E} (Eq. 11).....	18
Figure 2. Lumber MoE (a) and MoR (b) versus mini-clear MoE and MoR (bubble size is proportional to the variance of mini-clear moduli through the dataset)	19
Figure 3. Parameter estimate distributions of β_{1E} (dbh, a), β_{2E} (crown ratio, b), β_{3E} (basal area of 5 biggest branches, c), β_{4E} (log position, d) of the random and weighted pairing MoE ratio models with average parameter value and 95% confidence intervals shown (dotted lines)	20
Figure 4. Parameter estimate distributions of β_{1G} (dbh, a), β_{2G} (crown ratio, b), β_{3G} (basal area of 5 biggest branches, c), β_{4G} (branch density, d), β_{5G} (log position_middle, e), β_{6G} (log position_top, f) of the random and weighted pairing MoR ratio models with average parameter value and 95% confidence intervals shown (dotted lines)	22

INTRODUCTION

L'évaluation de la qualité du bois est importante pour prendre des décisions sylvicoles éclairées. Cependant, les critères pour l'évaluer dépendent des produits forestiers désirés (Zhang et al. 1997). Les propriétés mécaniques, mesurées par le module de l'élasticité (MoE) et le module de rupture (MoR), sont importantes pour déterminer la qualité du bois d'œuvre et, par conséquent, la valeur des pièces (Zhang et al. 1997). Les caractéristiques anisotropes et la variabilité des propriétés physiques et chimiques contribuent à la grande variabilité des propriétés mécaniques (Shmulsky and Jones 2011).

Généralement, l'évaluation de la ressource forestière en termes de qualité du bois d'œuvre est réalisée au moyen d'un échantillonnage destructif sur des pièces de bois (Lei et al. 2005, Beaulieu et al. 2006, Zhang et al. 2006, Liu et al. 2007b). Étant donné que ces pièces sont de grandes dimensions (généralement 3.8x8.9x250 cm ou 2"x4"x 8'), il est difficile de faire le lien entre les propriétés mécaniques et les propriétés du bois à une échelle microscopique, telles que la composition chimique des parois cellulaires, la structure anatomique du bois, etc. De plus, l'évaluation des propriétés mécaniques de petits arbres ne peut être effectuée avec des échantillons de bois de grande taille.

À une échelle plus fine, des éprouvettes de bois de petite taille (c.-à-d. 2 cm x 2 cm x 30 cm) peuvent être employés pour évaluer la variation des propriétés mécaniques le long d'un arbre (Auty and Achim 2008, Schneider et al. 2008a, Jiang et al. 2012, Kuprevicius et al. 2013). Avec ce type d'échantillon qui est exempt de défauts, il est possible de mieux corréliser les propriétés mécaniques aux caractéristiques physiques et anatomiques (Reiterer et al. 1999, McLean et al. 2010). Les éprouvettes permettent également d'évaluer les propriétés mécaniques dans les jeunes peuplements (Lindström et al. 2002).

Il n'existe malheureusement aucune étude comparative entre les propriétés mécaniques obtenues sur du bois d'œuvre et des éprouvettes. La comparaison de ces tailles d'échantillon n'est pas directe, étant donné que le bois d'œuvre a de nombreux défauts tels que les nœuds, et les éprouvettes ont moins de défauts et aucun nœud. De plus, les normes de mesurage des propriétés mécaniques diffèrent entre le bois d'œuvre et les éprouvettes (Madsen and Buchanan 1986, Madsen 1990, Brancheriau et al. 2002). Le MoE et MoR varient avec la densité du bois (Kretschmann 2010) et les propriétés des fibres (Lindström 1997). Ces facteurs sont fortement corrélés au stade de développement de l'arbre (Alcorn et al. 2008), à son taux de croissance (Houllier et al. 1995), et à la qualité de station (Beaulieu et al. 2006). Ces propriétés varient aussi à l'intérieur d'un arbre en direction radiale et longitudinale (Kretschmann 2010, Shmulsky and Jones 2011).

Il existe donc une grande variation des propriétés du bois au sein d'un morceau de bois, et la variabilité augmente avec la taille de l'échantillon. Ces variations expliquent donc en partie les différences en propriétés mécaniques observées entre des pièces de bois de taille différente (Madsen and Buchanan 1986, Madsen 1990, Pedersen et al. 2003). La présence de nœuds et de défauts naturels réduira le MoE et le MoR pour le bois d'œuvre comparativement aux éprouvettes (Zhou et Smith 1991, Moore et al. 2009a).

L'objectif de cette étude est d'explorer la relation entre les propriétés mécaniques du bois d'œuvre et celles des éprouvettes. Cette comparaison permettra alors de mieux évaluer l'effet des défauts sur les propriétés mécaniques, et de relier ces défauts aux caractéristiques des arbres comme la taille de la cime vivante, la quantité de branches, la taille de l'arbre et son environnement compétitif.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES EN FLEXION DU BOIS

Le bois est une matière anisotrope et hétérogène. Sa formation est influencée par le développement primaire et secondaire de l'arbre (Shmulsky and Jones 2011). Les propriétés mécaniques varient selon les orientations radiales, tangentielles et longitudinales (Kretschmann 2010). Les propriétés mécaniques en flexion statique sont généralement quantifiées par les modules d'élasticité (MoE) et de rupture (MoR) (Zhang et al. 1997). Le module d'élasticité correspond à la capacité de résister à une déformation plastique produite par une charge (Shmulsky and Jones 2011). Un bois est plus rigide lorsque le bois se déforme moins pour une même charge. Le module de rupture est une mesure de la capacité maximale de support d'une pièce (Shmulsky and Jones 2011). La valeur du bois d'œuvre est souvent relié à ces propriétés (Lei et al. 2005, Beaulieu et al. 2006, Liu et al. 2007b, Jiang et al. 2010, Vikram et al. 2011).

Il est généralement bien admis que la structure et les caractéristiques anatomiques de l'arbre ont des effets importants sur les propriétés mécaniques. Il se trouve que l'angle des microfibrilles (MFA) dans la paroi cellulaire secondaire (couche S2) des fibres et des trachéides est inversement proportionnel au MoE chez plusieurs espèces (Lichtenegger et al. 1999, Barnett and Bonham 2004, Lundgren 2004, Donaldson 2008, Lasserre et al. 2009, McLean et al. 2010, Watt et al. 2011). Le MFA entraîne un retrait longitudinal plus important, ce qui diminue la rigidité à la flexion de la pièce de bois. De nombreuses études ont confirmé la dépendance de MFA à l'âge cambial (Lichtenegger et al. 1999, Donaldson 2008, Lachenbruch et al. 2010, Watt et al. 2011). Le MFA plus élevé du bois juvénile offre une grande flexibilité aux gaules assurant une survie aux stress environnementaux. La

réduction du MFA au stade juvénile aurait un impact économique important par l'augmentation de la qualité des produits provenant du bois juvénile (Amarasekera and Denne 2002, Ivković et al. 2009).

La longueur des fibres, le diamètre et l'épaisseur des parois des trachéides ont des effets différents sur les propriétés mécaniques du bois. La longueur des fibres est un attribut important pour les produits structuraux, car la résistance au flambage des poutres est proportionnelle à la longueur des fibres (Stark and Rowlands 2003). On sait également que la longueur des fibres est corrélée négativement avec le MFA (Deresse et al. 2003, Shengzuo et al. 2004). La masse volumique, qui constitue la base du matériau, est déterminée en partie par le diamètre des trachéides et leur épaisseur. Il est aussi bien connu que les propriétés mécaniques du bois varient entre le bois initial et le bois final.

La densité du bois est un facteur important qui influence les propriétés en flexion (Downes et al. 2009). Les relations entre la masse volumique et les propriétés mécaniques varient beaucoup selon les espèces et le site (Lasserre et al. 2008, Lasserre et al. 2009). Généralement, les deux modules sont positivement corrélés à la densité du bois. Une densité du bois plus grande, induite par une proportion de bois final plus élevée, une plus faible largeur de cerne, des parois plus épaisses et un rapport de paroi/lumen plus élevé assurent une plus grande rigidité à l'arbre. Diverses études ont montré que la rigidité du bois pouvait être bien estimée à partir de sa densité (Auty and Achim 2008, Jiang et al 2010, Vikram et al. 2011, Jiang et al 2012). Par contre, des études ont également signalé que du bois plus dense pouvait avoir une plus grande concentration de résine et autres composés chimiques (Mäkinen et al. 2002), ce qui peut réduire les propriétés mécaniques. De plus, la relation entre l'augmentation de la densité du bois et l'augmentation de la résistance mécanique peut être disproportionnée (Larjavaara and Muller-Landau 2010).

Le bois juvénile est formé dans la cime vivante lorsque l'âge cambial est faible (Burdon et al. 2004). Les propriétés du bois juvénile diffèrent considérablement de celles du bois mature parmi lesquelles certains facteurs diminuent la résistance et la rigidité. Par exemple, le bois juvénile est caractérisé par un MFA plus grand, des trachéides plus courtes,

un diamètre du lumen plus grand, une épaisseur plus mince des parois cellulaires et/ou une concentration en extractibles plus élevée (Burdon et al. 2004). L'âge cambial auquel la transition entre le bois juvénile et le bois mature a lieu varie selon les espèces et les conditions de croissance (Sauter et al. 1999, Mutz et al. 2004, Clark et al. 2006).

Les propriétés mécaniques dans les sections ayant des nœuds sont plus faibles que dans les sections de bois sans nœud lorsque les autres facteurs sont bien contrôlés (Zhou and Smith 1991, Zhang et al. 2002). La présence de nœuds interrompt la continuité et l'uniformité des fibres de bois, ce qui a comme effet de perturber la distribution des stress de déformation dans la pièce de bois (Archer and Wilson 1973, Barrett et al. 1981) et d'augmenter la probabilité de bris. La grandeur, le type, la fréquence et l'emplacement des nœuds sont des facteurs qui influencent grandement les propriétés en flexion (Zhou and Smith 1991). La rigidité de flexion est généralement faible dans des pièces de bois dans lesquelles les nœuds sont plus grands et plus fréquents (Moore et al. 2009a). La résistance diminue proportionnellement à la taille des nœuds et à leur fréquence (Chui 1991). Les nœuds adhérents (issus de branches vivantes) ont moins d'effets sur les propriétés mécaniques que les nœuds non adhérents issus de branches mortes (Chui 1991, Lemieux et al 2001, Moberg 2001, Benjamin et al 2009). De plus, la localisation des nœuds influencera aussi les propriétés mécaniques en flexion, puisqu'un nœud au milieu de la pièce de bois réduira de façon plus importante les propriétés, comparativement à un nœud en bordure de la pièce (Chui 1991, Morel and Valentin 1996, Let et al 2005).

Les caractéristiques anatomiques qui influencent les propriétés mécaniques varient avec le statut de l'arbre. Par exemple, les arbres opprimés et intermédiaires ont une masse volumique plus élevée que les arbres codominants et dominants (Lasserre et al. 2009). Les variations avec le statut social de l'arbre de la masse volumique et des propriétés mécaniques peuvent être expliquées par la différence en DHP et en hauteur entre les arbres, et aussi par la densité du peuplement (Liu et al. 2007b). La surface d'aubier, la proportion de bois initial et le MFA sont aussi plus grands pour les arbres poussant plus rapidement (Beaulieu et al. 2006, Lessard et al. 2014).

La croissance, le statut et la compétition sont influencés par la forme et la taille de la cime, qui elles sont déterminées par l'emplacement et la taille des branches (Borders et al. 2004, Fahlvik et al. 2005). La longueur et le rayon de la cime sont de bons indicateurs de la vigueur d'un arbre, son taux de croissance, sa capacité photosynthétique et la compétition qu'il subit. La relation entre les attributs de la cime et les paramètres de la qualité est bien connue (Dunham and Cameron 2000). Par exemple, la masse volumique, le MoR et le MoE sont inversement liés à la longueur de la cime (Janse-Ten Klooster et al. 2007).

Les caractéristiques des nœuds sont directement liées à la fréquence, au type (vivant ou mort) et à la grosseur des branches, qui varient avec le niveau de compétition que l'arbre subit (Kellomäki et al. 1999, Kantola et al. 2008, Benjamin et al. 2009). Le taux de mortalité des branches détermine la longueur de la couronne, par conséquent le type de nœud (Mäkinen and Colin 1999).

De nombreuses études ont montré que la densité de peuplement influence la croissance de l'arbre (Woodruff et al. 2002, Zhang et al. 2002, Moore et al. 2009a). La croissance diamétrale, la longueur de la cime et la grosseur des branches sont inversement proportionnelles à la densité du peuplement. Toutefois, l'effet du vent et de la neige augmentent la mortalité des branches lorsque la compétition diminue avec la densité de peuplement (Hein et al. 2007).

1.2 MESURE DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES EN FLEXION

L'essai statique en flexion est une méthode précise et efficace pour mesurer les propriétés mécaniques d'une pièce de bois (Kretschmann 2010). Plusieurs normes existent pour évaluer le MoR et MoE, et ces normes emploient des essais en flexion à 3 ou 4 points. L'essai de flexion à 4 points est souvent employé pour des pièces qui peuvent comporter des défauts. Cet essai est caractérisé par 2 points d'appui et 2 points de charge. L'essai à 3 points, où la charge est appliquée en 1 seul point, est inapproprié pour les pièces avec des

nœuds, car leur effet sur le MoE et MoR est non linéaire. Le test à 4 points est donc généralement employé pour évaluer les propriétés mécaniques du bois d'œuvre.

L'essai de flexion à 3 points concentre le stress au centre des pièces. Il est également souvent utilisé pour de petits échantillons sans défauts, dans le but de mieux mettre en relation le MoE et MoR avec la croissance des arbres. La petite taille de l'échantillon permet de réduire la variabilité intrinsèque du bois et éviter les défauts tels que les nœuds.

Il existe toutefois des différences entre les mesures obtenues par les différents essais en flexion. Les propriétés mécaniques en flexion sont sensibles à la configuration de charge. Madsen (1990) a montré que les mesures de MoR obtenues par un essai en flexion à 3 points et un à 4 points ne concordent pas. De plus, il a noté des variations pour le même morceau de bois entre les mesures de MoE obtenues par deux types d'essais en flexion. Il a remarqué que l'effet d'indentation et l'effet de cisaillement (shear) amènent à une sous-estimation du MoE pour l'essai de flexion à 3 points (Brancheriau et al. 2002).

CHAPITRE 2 SCALING MOE AND MOR MEASUREMENTS FOR WHITE SPRUCE FROM MINI-CLEAR SAMPLES TO FULL-LENGTH LUMBER AND RELATING THE RESULTS TO TREE-LEVEL VARIABLES

ABSTRACT

Stiffness and strength are generally obtained on either small clearwood or on full-length lumber for quantifying wood quality. Scaling the values between sample sizes is hard due to the differences in testing method, wood properties and defect occurrence. This study explored the relationship of stiffness (MoE) and strength (MoR) measures between two sample sizes as well as the effects of tree-level variables on the scaling process. Tree and branch data were collected from 32 white spruce (*Picea glauca*) trees from a spacing trial in eastern Canada established in 1936. Each selected tree was bucked into logs and bolts, which were then processed into 3.8x8.9x250 cm and 1x1x15cm pieces. The moduli were obtained from 4- and 3-point bending tests for lumber and mini-clear, respectively. The lumber to mini-clear relation was modeled with a resampling technique, with two pairing methods run 10 000 times each. The MoE and MoR ratios were then related to stand, tree and crown characteristics using a linear regression for each resampling run, and the distribution of the estimated parameters used for inference. Lumber MoE was 29% larger than mini-clear MoE, unlike the lumber MoR which was 53% of the mini-clear MoR. Furthermore, in both simulating scenarios, DBH and crown ratio were positively proportional to both scaling ratios; contrarily, basal area of 5 biggest branches was negatively proportional to scaling ratios. The variables explaining the MoE and MoR ratios in final models were similar between two scenarios.

2.1 INTRODUCTION

The static bending (flexural) stiffness and strength, expressed through the modulus of elasticity (MoE) and the modulus of rupture (MoR), are among the most important product properties that determine the end uses and grade yield of lumber (Brüchert et al. 2000, Zhang et al. 2002). Static lumber bending tests provide the most direct estimation of these properties (Kretschmann 2010), and they have thus been used to investigate the impact of forest management and tree characteristics on lumber mechanical properties in many species (Lei et al. 2005, Beaulieu et al. 2006, Zhang et al. 2006, Liu et al. 2007b). However, the large dimensions of full-size lumber imply that such measurements are hardly applicable to small trees, which limits the capacity to monitor bending properties at an early stage. The scale of observation also limits the possibility to study the effects of growth rate (i.e. ring width). Moreover, the observed properties will be affected by the presence of natural defects such as knots. In addition, destructive tests on a large number of samples of full-size lumber entail high acquisition fees.

Clear wood samples describe the mechanical properties at a smaller scale with fewer defects and more homogenous wood (Auty and Achim 2008, Schneider et al. 2008b, Jiang et al. 2012, Kuprevicius et al. 2013). So-called ‘mini-clear’ samples have therefore often been used to relate growth characteristics and bending properties. Mini-clear samples can also be used to assess the effects of axial and radial location within the stem and cambial age on the wood mechanical properties (Auty and Achim 2008, Kuprevicius et al. 2013). The comparison between measurements taken on full size lumber and mini-clear samples could therefore be used to 1) to improve our understanding of the effects of growth on the properties of end-use products and 2) to help quantify the importance of internal defects on lumber mechanical properties.

MoE and MoR vary however with sample size. Differences result both from variations in physical properties, such as wood density and microfibril angle, which are

inherent to the structure of wood, and to the occurrence of defects in the material (Shmulsky and Jones 2011). The smaller sized mini-clear samples are mostly defect-free, leading to a higher interrelationship between mechanical properties and physical properties. In contrast, defects such as knots, both dead and sound, present on lumber pieces create zones of weakness that affect the overall mechanical performance (Zhou and Smith 1991, Lemieux et al. 2001, Benjamin et al. 2009, Kretschmann 2010). Contrarily to lumber (ASTM 2007), there are no standard procedures applicable to mechanical tests on mini-clear samples, leading to further difficulties in scaling from one measurement to another.

The overall objective of this study was thus to explore the relationship between mechanical properties measured on full size lumber and mini-clear samples. Specifically, two randomized processes (total random probability and weighted probability) were used to simulate lumber/mini-clear pairs obtained from the same trees. These pairs were then used to assess the links between mechanical properties relationships and the presence of defects, estimated through tree- and stand-level variables.

2.2 MATERIAL

The study was performed in a white spruce (*Picea glauca*) plantation located in the Petawawa Federal Research Forest in Eastern Canada (46° 00' N, 77° 25' W). A total of 32 trees were sampled from a white spruce spacing trial. The Lost Plantation was established by the Canadian Forest Service in 1936 with 1.8 m spacing between the seedlings. Thinning operations were carried out in 1962, 1972 and 1982 to maintain the plots at four levels of residual basal area: 18, 25, 32 and 42 m²ha⁻¹, with 2 replicates per basal area level, with 8 permanent sample plots in total.

In 2008, 32 trees, four trees per plot were destructively sampled. Prior to felling, diameter at breast height (DBH, at 1.3 m height from ground) was measured for all the live trees (Paradis 2011, Kuprevicius et al 2013, Power et al 2014). For each plot, the trees were

randomly selected from the DBH quartiles as to select trees within each social class: i.e. one dominant, two co-dominants and one intermediate.

Once felled, total tree height (TH) and height to crown base (HtCB) were measured, from which crown length (CL) and crown ratio (CR, crown length to total height ratio) were calculated. The location, orientation and diameter of each living branch was then measured and used to calculate branch density (BrD), diameter (BrDia) and basal area of five biggest branches (BrBA). Each stem was then bucked into 3 logs, with the base of each log being at three different heights, namely 1.3 m, 4.1 m and 6.9 m. A 40 cm bolt was taken between branch whorls close to the base of each log to reduce the chance of internal knots occurrence and was then cut into a 2.5cm-thick plank in the north-south direction.

Table 1. Mean characteristics of tree, crown and branch of each treatment level

	Average value for each spacing				Mean and SD
	42	32	25	18	
StBA (m ² ha ⁻¹)	42	32	25	18	
DBH* (cm)	27.73	26.54	26.44	33.98	28.67 (6.64)
TH (m)	23.03	21.35	20.22	23.43	22.01 (3.15)
HtCB (m)	15.65	13.21	11.05	12.15	13.01 (2.41)
CL (m)	7.39	8.14	9.17	11.29	9.00 (2.59)
CR*	0.31	0.37	0.45	0.48	0.406 (0.090)
BrD*(Number/m)	18.32	20.35	19.60	19.28	19.39 (2.87)
tBrBA (dm ²)	316.0	329.0	377.0	689.4	427.9(276.2)
BrBA*(dm ²)	47.8	41.8	46.2	69.9	51.4 (23.1)
BrIA	75.06	77.72	76.23	74.52	75.88 (6.07)

The measurements with asterisk (*) are significant (at least for one model) and included in final models

Mini-clear samples (1 x 1 x 15 cm) were cut from the northern facing radius of each plank. The mini-clear samples were sawn with careful attention to ensure a straight grain and avoid major defects such as knots, decay and reaction wood. However, pin knots were unavoidable in the samples close to the pith. The distance from the pith, mean cambial age and wood density at 12 % moisture content of each mini-clear sample were noted.

The logs were sawn manually using a portable sawmill (Wood-Mizer Products Inc., Indianapolis, IN). Lumber pieces were then dried to a target moisture content of 12% in a conventional kiln using a species-specific schedule. The schedule included a conditioning treatment to release internal stresses resulting from the drying operation. Finally, lumber pieces were planed to obtain the required dimensions of 2"x4"x8' (3.8 cm x 8.9 cm x 250 cm) lumber. Prior to processing, the juvenile core was painted (from the pith to ring 20) at both ends of each log, which allowed to estimate a proportion of juvenile wood for each lumber piece. The density at a nominal 12% moisture content of each piece was obtained by measuring both volume and mass.

The bending properties were obtained by destructive testing. Prior to testing, both the mini-clear samples and the lumber were stored in a conditioning chamber so that all samples tended towards the target moisture content of 12%. The lumber mechanical properties were obtained by using 4-point static bending test following the ASTM D-198 standard (ASTM 2007). The modulus of elasticity (MoE) and modulus of rupture (MoR) of the mini-clear samples were measured with a 3-point static bending test with the reference of the ASTM D-143-94 standard (ASTM 2007), regarding that this standard is close to currently mini-clear dimension,

Table 2. Mechanical properties and other wood properties of mini-clear and lumber

	Number	MoE (GPa)	MoR (MPa)	SG	JWP	Mean age
Mini-clear	544	8.56(1.60)	77.2(11.1)	0.367(0.043)		19.9(13.0)
Lumber	279	11.02(1.75)	41.2(12.4)	0.413(0.030)	0.60(0.29)	

2.3 METHOD

Method overview

The study focused on the individual lumber-to-mini-clear, or piece-to-piece mechanical relationship, instead of average lumber to average mini-clear on a tree or plot level because of the heterogeneity of wood. Such study design has the advantage of providing insight into defect effect on lumber mechanical performance by creating a control object. However, the main difficulty was that the lumber pieces were generally saw-milled without noting the radial location of each piece. It could only be indirectly assessed through the estimated proportion of juvenile wood of each piece. Furthermore, because mini-clear samples were collected in a continuous sequence from pith to bark, they could not be physically paired with a given piece of lumber. Thus the lumber pieces from a same log have a certain probability of being related to the mini-clear samples from the nearby bolt. To calculate all possible combinations and permutations of lumber (N=279) to mini-clear (N=544) pieces is computationally impossible due to the large amount of lumber and mini-clear samples.

A resampling technique was thus used to establish the lumber to mini-clear relationship. A given lumber piece was randomly paired with a mini-clear piece. The pairing probability was determined by 2 different methods: entirely random or weighted. A dataset consisted of all the lumber pieces paired to a mini-clear piece. This process was then carried out for 10 000 times to create 10 000 datasets.

For each dataset, the response or dependent variable was defined as the mechanical property ratio of lumber to mini-clear (i.e. lumber's MoE to mini-clear's MoE ratio and lumber's MoR to mini-clear's MoR ratio, hereafter be referred as moduli ratios or mechanical property ratios). The ratios were then regressed as a linear function of tree, crown and stand characteristics. A vector of parameter estimates was obtained for each

dataset. Thus for each parameter, a distribution was built with the estimates of each dataset. The confidence interval for the estimated parameter was then constructed using its distribution. All pairing methods and data analysis were carried out using the R statistical software (R Development Core Team, 2012).

Random pairing method

In the random pairing method, each lumber piece was randomly paired to a mini-clear from the nearest bolt in the same tree. The selection probability, or ‘weight’, of each mini-clear in the nearest bolt was thus held constant.

$$Prob_{ij} = \frac{1}{k_j}, i = 1 \dots k_j \quad (1)$$

where $Prob_{ij}$ is probability for i th mini-clear being paired to lumber piece j , k_j is the number of mini-clear samples from the nearest bolt of lumber piece j .

Weighted probability pairing method

In the second method, the probability of a mini-clear being paired to a given lumber piece was weighted according to measured characteristics on both the lumber and mini-clear samples. The wood density (WD) and juvenile wood proportion (JWP) of a piece of lumber were used to weight the pairing probability. The assumption was made that the pairing probability of two pieces with similar characteristics is greater, therefore the probability of pairing was inversely proportional to their differences in wood density and average age:

$$Prob_{ij} = Prob_{ij}^{AGE} * Prob_{ij}^{WD} \quad (2)$$

Where:

$$Prob_{ij}^{AGE} = \begin{cases} JWP_j, & \text{when } i\text{th miniclear is juvenile} \\ 1 - JWP_j, & \text{when } i\text{th miniclear is mature} \end{cases} \quad (3)$$

$$Prob_{i_1j(or\ i_2j)}^{WD} = \frac{1 - \left(\frac{\Delta WD_{i_1j(or\ i_2j)}}{\phi_{1j(or\ 2j)}} \right)}{\sum_{i_1=1}^{k_1j(or\ k_2j)} \left[1 - \left(\frac{\Delta WD_{i_1j(or\ i_2j)}}{\phi_{1j(or\ 2j)}} \right) \right]} \quad (4)$$

where $Prob_{ij}$ is probability for i th mini-clear being paired to lumber piece j , k_j is the number of mini-clear samples from the nearest bolt, $Prob^{AGE}_{ij}$ is the probability determined by average cambial age of the i th mini-clear sample as well as JWP_j , the juvenile wood percentage for lumber piece j , $Prob^{WD}_{ij}$ is the probability determined by the difference in wood density. Furthermore, the $Prob^{WD}_{ij}$ for juvenile mini-clear and mature mini-clear was calculated separately, to make sure that the pairing method was independent for both groups. Therefore, i_1 denotes the mini-clear for which $AGE \leq 20$, and i_2 denotes the mini-clear for which $AGE > 20$, k_{1j} is the number of mature mini-clear samples (denoted as i_1j) and k_{2j} is the number of juvenile mini-clear samples (denoted as i_2j), $\Delta WD_{i_1j(or\ i_2j)}$ is the absolute value of the difference in wood density between mini-clear i_{1or2} and lumber piece j , ϕ_j is a normalizer which is used to adjust the pairing probability so that $\phi_{1j(or\ 2j)}$ was defined as $\text{Maximum}\{\Delta WD_{i_1j(or\ i_2j)}\}$, where $i_1j(or\ i_2j) \in (1:k_{1j}(or\ k_{2j}))$. In other words, the normalizer is defined as the biggest difference in wood density within each sub-sample.

Sets of data

The MoE and MoR ratios for each lumber/mini-clear pair in each of the 10 000 datasets were then computed.

$$Ratio_{MoE_{jl}} = \frac{MoE_{LB\ jl}}{MoE_{MC\ il}} \quad (5)$$

$$Ratio_{MoR_{jl}} = \frac{MoR_{LB\ jl}}{MoR_{MC\ il}} \quad (6)$$

where $\text{MoE}_{\text{LB},jl}$ denotes the MoE of lumber piece j in the dataset l , l denotes the l th dataset or l th repeating run, $l \in (1:10\,000)$, and $\text{MoE}_{\text{MC},jl}$ denotes the MoE of the mini-clear sample which was paired with lumber piece j in the dataset l (same for MoR).

Model development

All available tree- and stand-level measurements (Table 1) were considered as covariates for the models. The collinearity was first checked among covariates and crown length (CL) was deleted in the analysis as it showed high collinearity based on the variance inflation factor (Zuur et al. 2009). A multiple linear regression model was built for each dataset (Eqs. 7 and 8).

$$\text{Ratio}_{\text{MoE},jl} = \beta_{lE}\mathbf{X} + \varepsilon_{jlE} \quad (7)$$

$$\text{Ratio}_{\text{MoR},jl} = \beta_{lG}\mathbf{X} + \varepsilon_{jlG} \quad (8)$$

or

$$Y_{jl} = \beta_l\mathbf{X} + \varepsilon_{jl} \quad (9)$$

Where Y_{jl} is either the predicted MoE or MoR ratio for dataset l , β_l a vector of estimated parameters from dataset l , and \mathbf{X} is the covariates matrix, jl denotes the order of lumber/mini-clear pairs in the dataset l . The parameter estimates from each dataset were then used to construct the parameter distributions. The 95% confidence intervals of each parameter distribution were used to infer if a parameter was significantly different from 0, with all covariates having estimates different than 0 being kept in the final models. Finally, a comparison between the two pairing methods was carried out to verify the sensitivity of the results to the pairing method.

2.4 RESULTS

The ratio and coefficient distributions stabilized after 2 500 pairing steps (Figure 3), and no further differences were obtained by creating more datasets, which confirmed that 10 000 repeating times was large enough to ensure representiveness. Illustrated in Figure 1 is the average value of β_{oE} of Eq.11, with similar results being observed for the other parameters (not illustrated). Various comparisons, including paired-t tests on the average lumber/mini-clear ratios at the pair level and tree level, were done and no significant difference of average ratios of mechanical properties can be confirmed with the respect to the pairing methods.

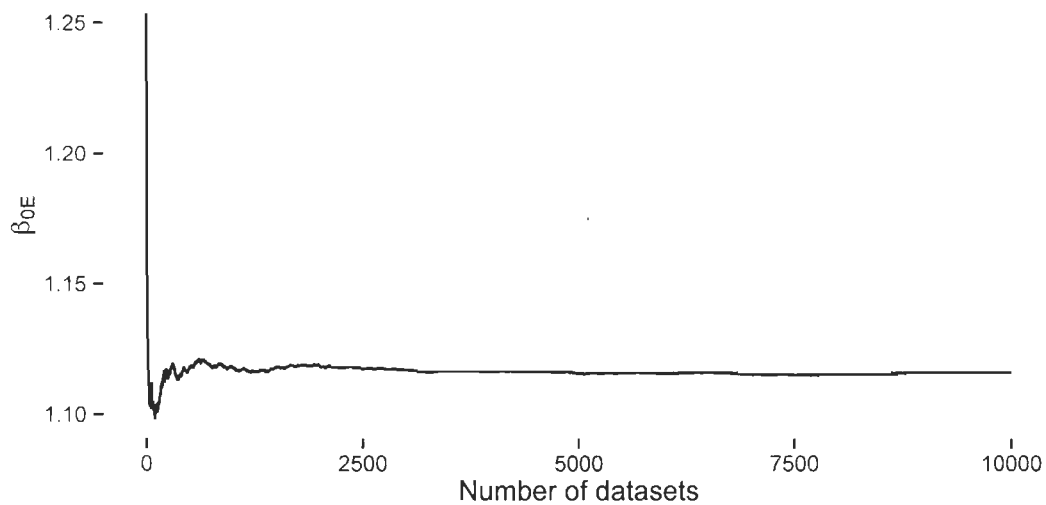


Figure 1. The stability of parameter β_{oE} (Eq. 11)

After eliminating the non-significant covariates, diameter at breast height (DBH) and total branch basal area (BrBA) remained in the MoE model with random pairing, while DBH, crown ratio (CR), BrBA and log position (LP_m , mid and top logs being in the same group) were significant covariates in the weighted pairing MoE model. Both MoR models (i.e. for random and weighted pairing methods) had DBH, CR, branch density (BrD), BrBA and log position (LP_m : mid log; LP_t : top log) as significant covariates. BrD ($p=0.180$ and

0.066) and LP ($p=0.160$) for both MoE models and CR ($p=0.098$) for the random pairing MoE model close the set level of significance ($\alpha=0.05$), while the other covariates were highly insignificant. Final models are as follows:

$$Ratio_{MoE_j} = \beta_{0_E} + \beta_{1_E} \cdot DBH + \beta_{3_E} \cdot BrBA + \varepsilon_{j_E} \quad (10)$$

$$Ratio_{MoE_j} = \beta_{0_E} + \beta_{1_E} \cdot DBH + \beta_{2_E} \cdot CR + \beta_{3_E} \cdot BrBA + \beta_{5_E} \cdot LP_{mt} + \varepsilon_{j_E} \quad (11)$$

$$Ratio_{MoR_j} = \beta_{0_G} + \beta_{1_G} \cdot DBH + \beta_{2_G} \cdot CR + \beta_{3_G} \cdot BrBA + \beta_{4_G} \cdot BrD + \beta_{5_G} \cdot LP_m + \beta_{6_G} \cdot LP_t + \varepsilon_{j_G} \quad (12\&13)$$

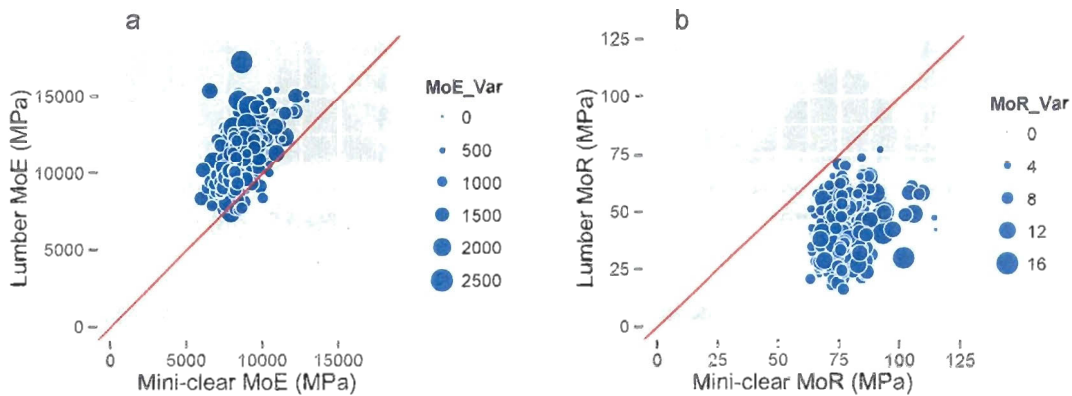


Figure 2. Lumber MoE (a) and MoR (b) versus mini-clear MoE and MoR (bubble size is proportional to the variance of mini-clear moduli through the dataset)

As illustrated in Figure 2a, lumber MoE is larger than mini-clear MoE in most cases, which was also confirmed by the average MoE ratio ($\widehat{MoE}_{lb} / \widehat{MoE}_{mc} = 1.29$). The coefficient estimates for DBH (both pairing methods) and CR (weighted pairing method) were positive. In contrast, the MoE ratio was negatively related to BrBA and log height (LP_{mt}).

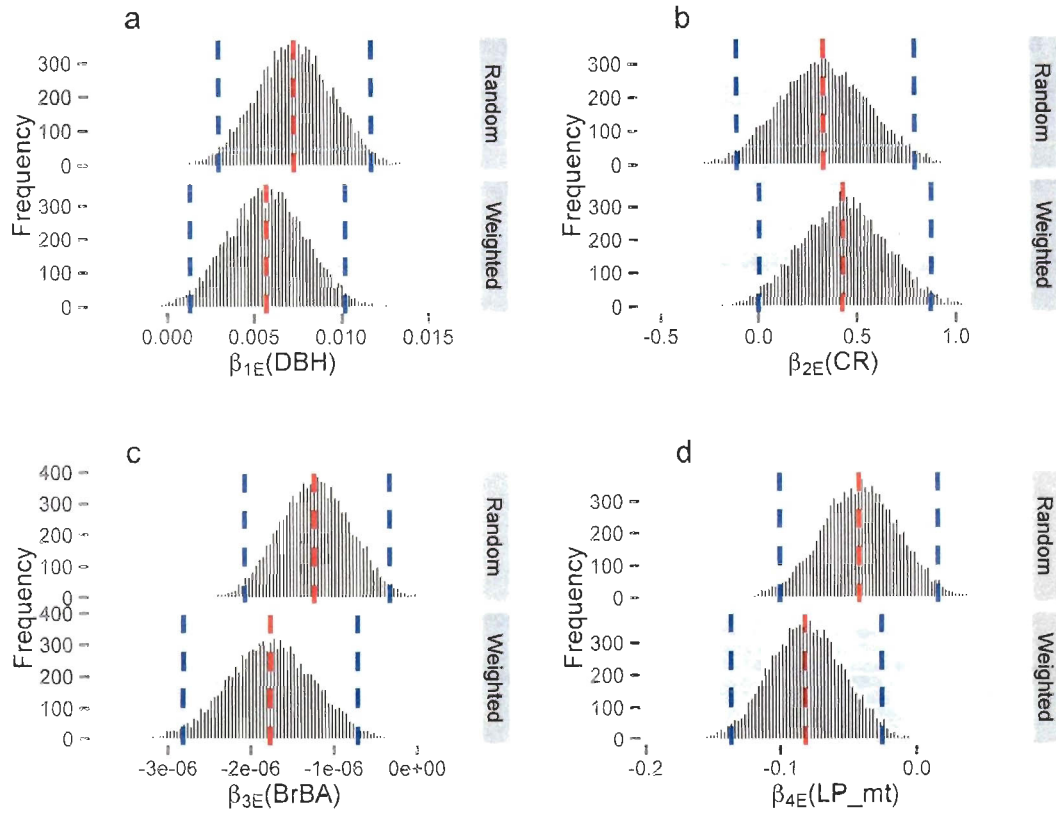


Figure 3. Parameter estimate distributions of β_{1E} (dbh, a), β_{2E} (crown ratio, b), β_{3E} (basal area of 5 biggest branches, c), β_{4E} (log position, d) of the random and weighted pairing MoE ratio models with average parameter value and 95% confidence intervals shown (dotted lines)

On the other hand, lumber MoR is inferior to that of mini-clear samples (Figure 2b) with the average MoR value ratio much lower than 1 ($\widehat{MoR}_{lb} / \widehat{MoR}_{mc} = 0.53$). The signs of the coefficient estimates are similar to the MoE models, with positive values for DBH, CR and BrD, and negative values only for BrBA and log height.

Differences were observed in covariate selection between pairing methods. LP and CR parameter estimates were non-significant for the random pairing MoE model ($p=0.098$ and 0.160 , respectively), while they were significant for the weighted pairing MoE model

($p=0.004$ and 0.032 , respectively). No differences in the covariate selection were observed for the MoR models. Furthermore, parameter estimates were not significantly different between the pairing methods.

2.5 DISCUSSION

The influence of crown metrics and stand density management has been studied on both lumber products (Zhang et al. 2002, Lei et al. 2005, Beaulieu et al. 2006, Liu et al. 2007a) and mini-clear samples (Auty and Achim 2008, Raymond et al. 2008, Schneider et al. 2008b, Kuprevicius et al. 2013, Torquato et al. 2013). The relationship between sample size, crown attributes and stand spacing has however received little attention. The proposed methods of pairing mini-clear samples to lumber pieces based on resampling techniques enabled us to better understand the intra- and inter-tree lumber/mini-clear variation in mechanical properties. With the resampling technique, parameter value distributions are built to carry out the inferences. All possible permutations were not assessed, as it would have been too computationally intensive. Nevertheless, parameter distributions were found to stabilize after 2 500 iterations. The random pairing method is considered as the reference distribution, since no assumptions were made on the pairing probability. On the other hand, the weighted probability pairing method was based on the hypothesis that pieces of similar densities and cambial age should have higher probabilities of being paired.

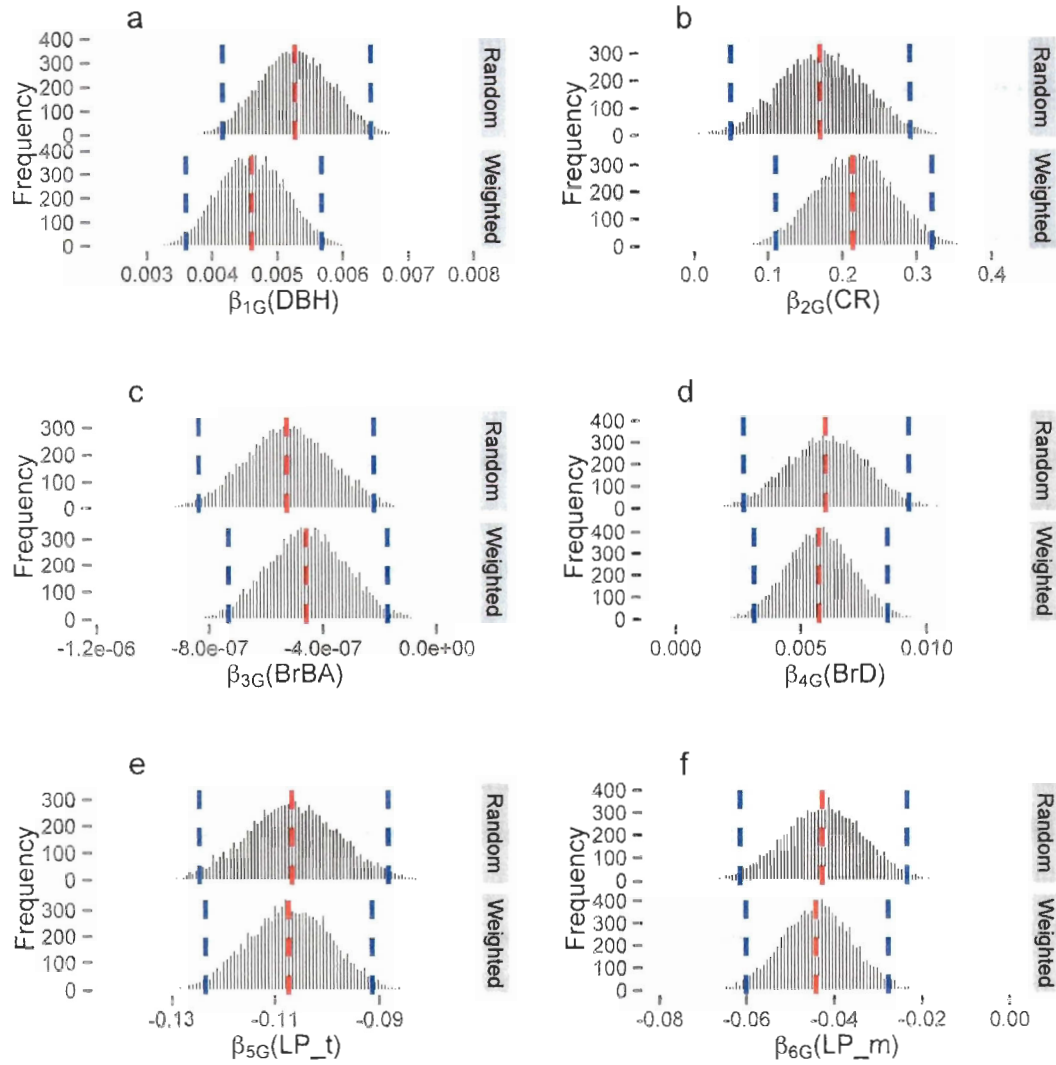


Figure 4. Parameter estimate distributions of β_{1G} (dbh, a), β_{2G} (crown ratio, b), β_{3G} (basal area of 5 biggest branches, c), β_{4G} (branch density, d), β_{5G} (log position_middle, e), β_{6G} (log position_top, f) of the random and weighted pairing MoR ratio models with average parameter value and 95% confidence intervals shown (dotted lines)

The differences between the pairing methods were observed for the MoE models. CR and log position were found to be non-significant according to the random pairing method, and had p-values lower than 0.05 for the weighted pairing method. This is due to the fact that the MoE ratio shows larger variations with random pairing method than for the weighted pairing method. The differences could also be caused by less stable relationships between the MoE ratio and the covariates, when compared to the MoR which is more affected by the presence of internal defects such as knots and thus more related to crown and branch attributes (Lei et al. 2005, Zhang et al. 2006, Liu et al. 2007a, Lundström et al. 2007).

The measurement of mechanical properties of heterogeneous and anisotropic materials with internal defects, such as wood, is known to be piece size dependent (Madsen and Buchanan 1986, Fonselius 1997, Brancheriau et al. 2002). This is consistent with our results, with the lumber MoE being greater for lumber (model intercepts > 1). Furthermore, the testing methods to estimate the mechanical properties differ between the mini-clear (3-point) and lumber (4-point) samples. Indeed, the wood MoE measurement can be 40% higher in 4-point bending test than in 3-point test (Brancheriau et al. 2002). The shear strength is also positively correlated to the cross sectional area of piece (Brancheriau and Bailleres 2002, Kretschmann 2010), leading to higher MoE of lumber when compared to that of a mini-clear sample.

On the contrary, lumber MoR was found to be lower than the mini-clear MoR (model intercepts < 1). Since static MoR measurements are destructive, 3-point and 4-point MoR measurements on the same sample are not possible. Despite this, it is known that materials strength is related to the weakest point (Madsen and Buchanan 1986, Buchanan 1990). The size-effect has been widely found through various materials, both homogeneous (e.g. metal, glass) and heterogeneous (e.g. wood, concrete). As piece size increases, the probability of including weaker elements (e.g. weak wood fiber or defect) affecting strength increases.

Wood strength and stiffness have been linked with external tree attributes such as tree height, crown dimensions and DBH (Liu et al. 2007b, Lundström et al. 2008, Moore et al.

2009b, Kuprevicius et al. 2013). The use of the lumber to mini-clear mechanical property ratios yields more detailed information on the effect of such covariates on the wood properties, as variations in the intrinsic wood properties are accounted for through the mini-clear samples measurement, whereas lumber pieces are subject to the additional effect of the presence of knots and other defects. DBH (Eq. 10 to 13), CR (Eq. 11, 12 and 13) and branch density (Eq. 12 and 13) had positive parameter estimates.

At a given age, the effect of larger DBH and longer crowns is generally to decrease MoE and MoR values (Amarasekera and Denne 2002, Liu et al. 2007a, Kuprevicius et al. 2013). However, the positive parameter indicated that the ratios of mini-clear to lumber MoE and MoR increased with DBH, CR and branch density. This is likely attributable to the fact that in our dataset lumber pieces from larger trees typically contained a higher proportion of mature wood when compared to smaller sized trees.

Furthermore, trees with larger crowns will have more green/sound knots than trees with smaller crowns (Lemieux et al. 2001, Achim et al. 2006, Hein et al. 2007, Benjamin et al. 2009, Duchateau et al. 2013). Thus, the amount of dead/loose knots increases with smaller crowns, which can potentially affect the mechanical properties of a piece of lumber. The basal area of the five biggest branches (BrBA) is used a surrogate for knot-size, such that trees with larger branches will have larger knots (Lemieux et al. 2001, Hein et al. 2007, Benjamin et al. 2009), and thus lower lumber strength and stiffness when compared to mini-clear samples (i.e. negative BrBA parameter estimates).

Surprisingly, branch density (BrD) had a positive parameter estimate for both ratio models, indicating that an increase in overall branch number implies an increase in lumber/mini-clear MoR ratio. This may be explained by the fact that an increase in branch density, for a given number of branches would mean that mean branch size would be smaller, and thus the lumber pieces would have smaller knots, leading to higher MoR ratios. Finally, both MoE and MoR ratios were generally higher at stem base, probably because the mature wood volume is more important at this height, a fact that should be reflected in the mean proportion of mature wood in the tested lumber pieces.

2.6 Conclusion

This study is a first attempt at scaling the MoE and MoR measurement from mini-clear samples to lumber pieces. The methodology developed in this study could be useful to make projections of lumber yields and quality from the early stages of a forest plantation. The results obtained from wood quality studies using mini-clears could be scaled to lumber sized pieces with the scaling relationship. It is also possible to extract from the lumber measurements the intrinsic wood properties, thus enabling us to have a better grasp on how defects influence the bending mechanics. The results can be helpful for forest managers interested in limiting the effects of silvicultural treatments on lumber performance.

Further studies could attempt to extract mini-clear samples directly from the lumber pieces and compare the ratio results to those obtained in this study. This comparison would remove the need for statistical pairing and would therefore provide a more direct assessment of the relationship between lumber and mini-clear properties.

Acknowledgements

We would like to give our appreciations to previous project teams, Hugues Power, Adam Kuprevicius and Normand Paradis for sharing valuable datasets. The authors would also thank NSERC through ForValueNet Strategic Network for providing funding for this project.

CHAPITRE 3 CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS DE L'ÉTUDE

La quantification de la qualité du bois est une information importante à considérer lors de la prise de décisions en aménagement forestier. Deux caractéristiques employées pour évaluer la qualité du bois d'œuvre sont les propriétés de flexion statique, quantifiées par les modules d'élasticité et de rupture. Ces caractéristiques sont directement liées aux propriétés du produit fini (Kretschmann 2010). La méthodologie proposée dans cette étude permet d'avoir une meilleure idée de l'effet des défauts sur les propriétés mécaniques en éliminant du bois d'œuvre les propriétés intrinsèques du bois. Ceci est réalisé à l'aide du rapport du module du bois d'œuvre et du module de l'éprouvette.

Les principaux résultats de l'étude sont que le MoR et MoE changent avec la taille de l'échantillon, le rapport varie avec le diamètre à hauteur de poitrine, le pourcentage de cime, le diamètre des 5 branches les plus grosses et la surface basale des branches. L'effet de la dimension de la pièce a déjà été observé (Madsen 1990, Morel and Valentin 1996, Pedersen et al. 2003).

Toutefois, les essais en flexion sur le bois d'œuvre (ASTM D-198) et sur les éprouvettes (ASTM D-143) ont été réalisés selon 2 normes différentes. Brancheriau et al (2002) ont rapporté une sous-estimation de 40% du MoE lors des essais à 3 points (NF 1942) en comparaison aux essais à 4 points (NF 1987). Ces différences peuvent être expliquées par les changements de la force de cisaillement avec la taille de l'échantillon (Chui 1991), car la quantité de cellules et la surface de contact entre celles-ci augmentent avec la taille. Contrairement aux résultats obtenus précédemment, les différences de MoE entre le bois d'œuvre et les éprouvettes sont faibles ($\widehat{\beta}_{0_{IE}} = 1.18$ et 1.12, Figure 2). La présence de défauts dans le bois d'œuvre, et l'absence de défauts dans les éprouvettes, peuvent expliquer les résultats obtenus.

Contrairement au MoE, le MoR du bois d'œuvre est inférieur au MoR des éprouvettes. Bien que l'effet de la configuration de la charge de l'essai en flexion à 3 points aurait dû sous-estimer le MoR du bois d'œuvre (Madsen 1990), la grande différence entre le MoR du bois d'œuvre peut être attribuée à la présence de défauts dans le bois d'oeuvre.

La force en flexion du bois est composée des effets de compression et de tension (Madsen et Buchanan, 1985). Plusieurs études ont rapporté l'effet de la taille d'un échantillon sur le MoR sous différents types de charge (Madsen 1990, Morel and Valentin 1996, Pedersen et al. 2003). Selon la théorie du maillon le plus faible, le MoR d'un matériau homogène diminue avec une augmentation de la taille de la pièce pour deux raisons (Madsen and Buchanan 1986) : la probabilité d'avoir une faiblesse augmente avec la dimension, et le MoR est déterminé par le lien le plus faible. Cette théorie s'applique aussi au bois, qui est hétérogène et anisotrope. Dans le bois, le risque d'avoir des défauts augmente avec la taille de la pièce de bois. Ces différences ont d'ailleurs déjà été rapportées, où le MoR de bois sans nœud était inférieur au MoR de bois avec nœuds (Madsen, 1989).

Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que le MoR et MoE du bois d'œuvre augmentent en comparaison du MoR et MoE des éprouvettes avec le diamètre à hauteur de poitrine. Le MoR et MoE du bois d'œuvre est aussi plus élevé en comparaison du MoR et MoE des éprouvettes dans la bille du bas. Les arbres échantillonnés de cette étude provenaient d'une plantation, et la différence en âge était très faible. De plus, au contraire du cas des éprouvettes, le nombre de pièces de bois d'œuvre n'est pas proportionnel au diamètre à hauteur de poitrine. Par conséquent, les arbres avec un diamètre à hauteur de poitrine plus grands ont plus de bois mature, tout comme les billes à la base de l'arbre ont plus de bois mature que celles plus hautes.

Les résultats indiquent aussi que certaines métriques liées à la cime influencent le rapport des modules d'élasticité et de rupture. Par exemple, les rapports du MoR et du MoE sont inversement proportionnels à la surface basale des 5 plus grosses branches (BrBA). La présence de grosses branches réduit donc les propriétés en flexion, car ces branches

indiquent que les nœuds seront plus gros, et par conséquent la probabilité d'avoir un défaut important dans une pièce de bois d'œuvre augmente (Maguire et al. 1991, Moberg 2001).

Contrairement au BrBA, le MoR du bois d'œuvre augmente avec la densité des branches comparativement au MoR des éprouvettes. Ce résultat pourrait s'expliquer en partie par une baisse plus importante du MoR des éprouvettes comparativement au MoR du bois d'œuvre pour une même densité des branches. Il a été montré qu'une cime plus grosse a une plus grande production d'auxines, ce qui induit des changements anatomiques des cellules et donc influence les propriétés mécaniques du bois (Nelson and Hillis 1978, Wilson and Gartner 2002, Kuprevicius et al. 2013). Le MoR des éprouvettes étant plus sensibles aux propriétés intrinsèques du bois, la diminution du MoR des éprouvettes pourrait être plus élevée que la diminution du MoR du bois d'œuvre. De plus, la densité des branches influence la mortalité des branches et par conséquent la proportion de branches vivantes ce qui influence le type de nœud (Duchateau et al. 2013).

Cette étude a permis d'établir avec une plus grande précision l'effet des défauts, quantifiés par des variables à l'échelle de l'arbre, sur les propriétés mécaniques du bois. Certaines variables employées ne sont pas facilement accessibles par l'inventaire forestier actuel. Toutefois, avec le développement de nouvelles technologies dans le milieu forestier, tel que le LiDAR, il sera plus facile d'obtenir le diamètre des branches, ou leur densité (van Leeuwen et al. 2011). Les relations proposées deviendront alors pertinentes pour le gestionnaire forestier.

Les résultats dégagés peuvent toutefois être utiles dès à présent, car les liens entre les caractéristiques de la cime et le changement des propriétés mécaniques ont été approfondis. Il est alors possible d'inférer l'effet de traitements sylvicoles sur les propriétés mécaniques, en sachant les changements de la cime d'un arbre suite à une intervention. Par exemple, il est bien connu que le diamètre du tronc, la longueur de la cime et la grosseur des branches sont inversement proportionnelles à la densité du peuplement. Les changements sont aussi liés aux propriétés intrinsèques du bois ainsi qu'aux caractéristiques du défaut.

Pour avoir une meilleure précision de l'effet des défauts sur les propriétés mécaniques, il serait judicieux d'obtenir des éprouvettes directement du bois d'œuvre, afin de ne pas devoir employer des méthodes de rééchantillonnage. Les résultats de cette étude fournissent toutefois une première réponse à une question complexe. Des études similaires sur d'autres espèces, et une plus grande variabilité de sites, âge et d'environnement compétitif permettraient une plus grande généralisation des résultats.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achim, A., B. Gardiner, J. Leban, and R. Daquitaine. 2006. Predicting the branching properties of Sitka spruce grown in Great Britain. *New Zealand Journal of Forestry Science* **36**:246.
- Alcorn, P. J., J. Bauhus, R. G. B. Smith, D. Thomas, R. James, and A. Nicotra. 2008. Growth response following green crown pruning in plantation-grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana*. *Canadian Journal of Forest Research* **38**:770-781.
- Amarasekera, H. S. and M. P. Denne. 2002. Effects of crown size on wood characteristics of Corsican pine in relation to definitions of juvenile wood, crown formed wood and core wood. *Forestry* **75**:51-61.
- ASTM, 2007 Standard test methods for small clear specimens of timber. In *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, Baltimore
- Archer, R. R. and B. F. Wilson. 1973. Mechanics of the Compression Wood Response II. On the Location, Action, and Distribution of Compression Wood Formation. *Plant physiology* **51**:777-782.
- Auty, D. and A. Achim. 2008. The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry* **81**:475-487.
- Barnett, J. R. and V. A. Bonham. 2004. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* **79**:461-472.
- Barrett, J. D., I. P. Haigh, and J. M. Lovegrove. 1981. Fracture Mechanics and the Design of Wood Structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* **299**:217-226.
- Beaulieu, J., S. Y. Zhang, Q. Yu, and A. Raiville. 2006. Comparison between genetic and environmental influences on lumber bending properties in young white spruce. *Wood and Fiber Science* **38**:553-564.
- Benjamin, J. G., J. J. A. Kershaw, A. R. Weiskittel, Y. H. Chui, and S. Y. Zhang. 2009. External knot size and frequency in black spruce trees from an initial spacing trial in Thunder Bay, Ontario. *The Forestry Chronicle* **85**:618-624.
- Borders, B., R. Will, D. Markewitz, A. Clark, R. Hendrick, R. Teskey, and Y. Zhang. 2004. Effect of complete competition control and annual fertilization on stem growth and canopy relations for a chronosequence of loblolly pine plantations in the lower coastal plain of Georgia. *Forest Ecology and Management* **192**:21-37.

- Brancheriau, L. and H. Bailleres. 2002. Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. *Wood Science and Technology* **36**:347-365.
- Brancheriau, L., H. Bailleres, and D. Guitard. 2002. Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples. *Wood Science and Technology* **36**:367-383.
- Brüchert, F., G. Becker, and T. Speck. 2000. The mechanics of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst]: mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *Forest Ecology and Management* **135**:45-62.
- Buchanan, A. 1990. Bending Strength of Lumber. *Journal of Structural Engineering* **116**:1213-1229.
- Burdon, R. D., R. P. Kibblewhite, J. C. F. Walker, R. A. Megraw, R. Evans, and D. J. Cown. 2004. Juvenile versus mature wood: a new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. *Forest Science* **50**:399-415.
- Chui, Y. H. 1991. Simultaneous evaluation of bending and shear moduli of wood and the influence of knots on these parameters. *Wood Science and Technology* **25**:125-134.
- Clark, A., R. Daniels, and L. Jordan. 2006. Juvenile/Mature Wood Transition in Loblolly Pine as Defined by Annual Ring Specific Gravity, Proportion of Latewood, and Microfibril Angle. *Wood and Fiber Science* **38**:292-299.
- Deresse, T., R. K. Shepard, and S. M. Shaler. 2003. Microfibril angle variation in red pine (*Pines resinosa* Ait.) and its relation to the strength and stiffness of early juvenile wood. Forest Products Society, Madison, WI, ETATS-UNIS.
- Donaldson, L. 2008. Microfibril angle: Measurement, variation and relationships--A review. *IAWA journal* **29**:345.
- Downes, G. M., D. Drew, M. Battaglia, and D. Schulze. 2009. Measuring and modelling stem growth and wood formation: An overview. *Dendrochronologia* **27**:147-157.
- Duchateau, E., F. Longuetaud, F. Mothe, C. Ung, D. Auty, and A. Achim. 2013. Modelling knot morphology as a function of external tree and branch attributes. *Canadian Journal of Forest Research* **43**:266-277.
- Dunham, R. A. and A. D. Cameron. 2000. Crown, stem and wood properties of wind-damaged and undamaged Sitka spruce. *Forest Ecology and Management* **135**:73-81.
- Fahlvik, N., P.-M. Ekö, and N. Pettersson. 2005. Influence of precommercial thinning grade on branch diameter and crown ratio in *Pinus sylvestris* in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* **20**:243-251.
- Fonselius, M. 1997. Effect of size on the bending strength of laminated veneer lumber. *Wood Science and Technology* **31**:399-413.
- Hein, S., H. Mäkinen, C. Yue, and U. Kohnle. 2007. Modelling branch characteristics of Norway spruce from wide spacings in Germany. *Forest Ecology and Management* **242**:155-164.
- Houllier, F., J. M. Leban, and F. Colin. 1995. Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management* **74**:91-102.

- Ivković, M., W. J. Gapare, A. Abarquez, J. Ilic, M. B. Powell, and H. X. Wu. 2009. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. *Wood Science and Technology* **43**:237-257.
- Janse-Ten Klooster, S. H., E. J. P. Thomas, and F. J. Sterck. 2007. Explaining interspecific differences in sapling growth and shade tolerance in temperate forests. *Journal of Ecology* **95**:1250-1260.
- Jiang, J., J. Lu, H. Ren, and C. Long. 2010. Predicting the flexural properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation dimension lumber from growth ring width. *Journal of Wood Science* **56**:15-18.
- Jiang, J., J. Lu, H. Ren, and C. Long. 2012. Effect of growth ring width, pith and visual grade on bending properties of Chinese fir plantation dimension lumber. *European Journal of Wood and Wood Products* **70**:119-123.
- Kantola, A., S. Härkönen, H. Mäkinen, and A. Mäkelä. 2008. Predicting timber properties from tree measurements at felling: Evaluation of the RetroSTEM model and TreeViz software for Norway spruce. *Forest Ecology and Management* **255**:3524-3533.
- Kellomäki, S., V.-P. Ikonen, H. Peltola, and T. Kolström. 1999. Modelling the structural growth of Scots pine with implications for wood quality. *Ecological Modelling* **122**:117-134.
- Kretschmann, D. 2010. Mechanical properties of wood. *Wood handbook - Wood as an engineering material*. United States department of agriculture, Madison, U.S.
- Kuprevicius, A., D. Auty, A. Achim, and J. P. Caspersen. 2013. Quantifying the influence of live crown ratio on the mechanical properties of clear wood. *Forestry* **86**:361-369.
- Lachenbruch, B., G. R. Johnson, G. M. Downes, and R. Evans. 2010. Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* **40**:55-64.
- Larjavaara, M. and H. C. Muller-Landau. 2010. Rethinking the value of high wood density. *Functional Ecology* **24**:701-705.
- Lasserre, J. P., E. G. Mason, and M. S. Watt. 2008. Influence of the main and interactive effects of site, stand stocking and clone on *Pinus radiata* D. Don corewood modulus of elasticity. *Forest Ecology and Management* **255**:3455-3459.
- Lasserre, J. P., E. G. Mason, M. S. Watt, and J. R. Moore. 2009. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. *Forest Ecology and Management* **258**:1924-1931.
- Lei, Y. C., S. Y. Zhang, and Z. Jiang. 2005. Models for predicting lumber bending MOR and MOE based on tree and stand characteristics in black spruce. *Wood Science and Technology* **39**:37-47.
- Lemieux, H., M. Beaudoin, and S. Zhang. 2001. Characterization and Modeling of Knots in Black Spruce (*Picea Mariana*) Logs. *Wood and Fiber Science* **33**:465-475.
- Lessard, E., R. A. Fournier, J. E. Luther, M. J. Mazerolle, and O. R. van Lier. 2014. Modeling wood fiber attributes using forest inventory and environmental data for Newfoundland's boreal forest. *Forest Ecology and Management* **313**:307-318.

- Lichtenegger, H., A. Reiterer, S. E. Stanzl-Tschegg, and P. Fratzl. 1999. Variation of Cellulose Microfibril Angles in Softwoods and Hardwoods—A Possible Strategy of Mechanical Optimization. *Journal of Structural Biology* **128**:257-269.
- Lindström, H. 1997. Fiber Length, Tracheid Diameter, and Latewood Percentage in Norway Spruce: Development from Pith Outward. *Wood and Fiber Science* **29**:21-34.
- Lindström, H., P. Harris, and R. Nakada. 2002. Methods for measuring stiffness of young trees. *European Journal of Wood and Wood Products* **60**:165-174.
- Liu, C., S. Zhang, A. Cloutier, and T. Rycabel. 2007a. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *Forest Ecology and Management* **242**:648-655.
- Liu, C., S. Y. Zhang, A. Cloutier, and T. Rycabel. 2007b. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *Forest Ecology and Management* **242**:648-655.
- Lundgren, C. 2004. Microfibril angle and density patterns of fertilized and irrigated Norway spruce. *Silva Fennica* **38**:107-117.
- Lundström, T., U. Heiz, M. Stoffel, and V. Stöckli. 2007. Fresh-wood bending: linking the mechanical and growth properties of a Norway spruce stem. *Tree Physiol* **27**:1229-1241.
- Lundström, T., T. Jonas, and A. Volkwein. 2008. Analysing the mechanical performance and growth adaptation of Norway spruce using a non-linear finite-element model and experimental data. *Journal of Experimental Botany* **59**:2513-2528.
- Madsen, B. 1990. Size effects in defect-free Douglas fir. *Canadian Journal of Civil Engineering* **17**:238-242.
- Madsen, B. and A. H. Buchanan. 1986. Size effects in timber explained by a modified weakest link theory. *Canadian Journal of Civil Engineering* **13**:218-232.
- Maguire, D. A., J. A. Kershaw, and D. W. Hann. 1991. Predicting the Effects of Silvicultural Regime on Branch Size and Crown Wood Core in Douglas-Fir. *Forest Science* **37**:1409-1428.
- Mäkinen, H. and F. Colin. 1999. Predicting the number, death, and self-pruning of branches in Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research* **29**:1225-1236.
- Mäkinen, H., P. Saranpää, and S. Linder. 2002. Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. *Canadian Journal of Forest Research* **32**:185-194.
- McLean, J. P., R. Evans, and J. R. Moore. 2010. Predicting the longitudinal modulus of elasticity of Sitka spruce from cellulose orientation and abundance. *Holzforschung* **64**:495-500.
- Moberg, L. 2001. Models of internal knot properties for *Picea abies*. *Forest Ecology and Management* **147**:123-138.
- Moore, J., A. Achim, A. Lyon, S. Mochan, and B. A. Gardiner. 2009a. Effects of early re-spacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber. *Forest Ecology and Management* **258**:1174-1180.

- Moore, J. R., S. J. Mochan, F. Brüchert, A. I. Hapca, D. J. Ridley-Ellis, B. A. Gardiner, and S. J. Lee. 2009b. Effects of genetics on the wood properties of Sitka spruce growing in the UK: bending strength and stiffness of structural timber. *Forestry* **82**:491-501.
- Morel, S. and G. Valentin. 1996. Size Effect in Crack Shear Strength of Wood. *J. Phys. IV France* **06**:C6-385-C386-394.
- Mutz, R., E. Guilley, U. H. Sauter, and G. Nepveu. 2004. Modelling juvenile-mature wood transition in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects models. *Ann. For. Sci.* **61**:831-841.
- Nelson, N. D. and W. E. Hillis. 1978. Ethylene and tension wood formation in *Eucalyptus gomphocephala*. *Wood Science and Technology* **12**:309-315.
- Paradis, N. 2011. Relations entre les propriétés mécaniques du bois et les vitesses acoustiques mesurées à trois étapes du processus de transformation du bois (Doctoral dissertation, Université Laval).
- Pedersen, M. U., C. O. Clorius, L. Damkilde, and P. Hoffmeyer. 2003. A simple size effect model for tension perpendicular to the grain. *Wood Science and Technology* **37**:125-140.
- Power, H., Schneider, R., and Berninger, F. 2014. Understanding changes in black (*Picea mariana*) and white spruce (*Picea glauca*) foliage biomass and leaf area characteristics. *Trees*, **28**(2), 345-357.
- R Development Core Team. 2012. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raymond, C. A., B. Joe, D. W. Anderson, and D. J. Watt. 2008. Effect of thinning on relationships between three measures of wood stiffness in *Pinus radiata*: standing trees vs. logs vs. short clear specimens. *Canadian Journal of Forest Research* **38**:2870-2879.
- Reiterer, A., H. Lichtenegger, S. Tschegg, and P. Fratzl. 1999. Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls. *Philosophical Magazine A* **79**:2173-2184.
- Sauter, U., R. Mutz, and B. Munro. 1999. Determining Juvenile-Mature Wood Transition in Scots Pine Using Latewood Density. *Wood and Fiber Science* **31**:416-425.
- Schneider, R., F. Berninger, C.-H. Ung, P. Y. Bernier, D. E. Swift, and S. Zhang. 2008a. Calibrating jack pine allometric relationships with simultaneous regressions. *Canadian Journal of Forest Research* **38**:2566-2578.
- Schneider, R., S. Y. Zhang, D. E. Swift, J. Bégin, and J.-M. Lussier. 2008b. Predicting selected wood properties of jack pine following commercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research* **38**:2030-2043.
- Sheng-zuo, F., Y. Wen-zhong, and F. Xiang-xiang. 2004. Variation of microfibril angle and its correlation to wood properties in poplars. *Journal of Forestry Research* **15**:261-267.
- Shmulsky, R. and D. Jones. 2011. *Forest products and wood science : an introduction*. 6th edition. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, U.K. ; Ames, Iowa.

- Stark, N. and R. Rowlands. 2003. Effects of Wood Fiber Characteristics on Mechanical Properties of Wood/Polypropylene Composites. *Wood and Fiber Science* **35**:167-174.
- Torquato, L. P., D. Auty, R. E. Hernández, I. Duchesne, D. Pothier, and A. Achim. 2013. Black spruce trees from fire-origin stands have higher wood mechanical properties than those from older, irregular stands. *Canadian Journal of Forest Research* **44**:118-127.
- van Leeuwen, M., T. Hilker, N. C. Coops, G. Frazer, M. A. Wulder, G. J. Newnham, and D. S. Culvenor. 2011. Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: A review. *Forest Ecology and Management* **261**:1467-1478.
- Vikram, V., M. L. Cherry, D. Briggs, D. W. Cress, R. Evans, and G. T. Howe. 2011. Stiffness of Douglas-fir lumber: effects of wood properties and genetics. *Canadian Journal of Forest Research* **41**:1160-1173.
- Watt, M. S., B. Zoric, M. O. Kimberley, and J. Harrington. 2011. Influence of stocking on radial and longitudinal variation in modulus of elasticity, microfibril angle, and density in a 24-year-old *Pinus radiata* thinning trial. *Canadian Journal of Forest Research* **41**:1422-1431.
- Wilson, B. F. and B. L. Gartner. 2002. Effects of phloem girdling in conifers on apical control of branches, growth allocation and air in wood. *Tree Physiol* **22**:347-353.
- Woodruff, D. R., B. J. Bond, G. A. Ritchie, and W. Scott. 2002. Effects of stand density on the growth of young Douglas-fir trees. *Canadian Journal of Forest Research* **32**:420-427.
- Zhang, S., R. Gosselin, and G. Chauret. 1997. Wood quality: its definition, impact, and implications for value-added timber management and end uses. Pages 17-39 in *Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value*. CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop. Quebec, Canada.
- Zhang, S. Y., G. Chauret, D. E. Swift, and I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **36**:945-952.
- Zhang, S. Y., C. Gilles, H. Q. Ren, and D. Richard. 2002. Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and MSR yield. *Wood and Fiber Science* **34**:460-475.
- Zhou, H. and I. Smith. 1991. Factors Influencing Bending Properties of White Spruce Lumber. *Wood and Fiber Science* **23**:483-500.
- Zuur, A., E. N. Ieno, N. Walker, A. A. Saveliev, and G. M. Smith. 2009. *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer.

Appendix Index of Abbreviations

Abbreviations	Definition and meaning
MoE	Modulus of Elasticity
MoR	Modulus of Rupture
DBH	Diameter at breast height
TH	Total tree height
HtCB	Height to crown base
CL	Crown length
CR	Crown ratio
BrD	Branch density, number/m
BrDia	Five biggest branch diameters
BrBA	Basal area of five biggest branches
tBD	Diameter of total branches
tBrBA	Basal area of total branches
Prob ^{AGE or WD}	Partial probability defined by cambial age or wood density
k_j	Number of miniclears to be paired to lumber j
l	Repeating times or dataset number
$i1$ or $i2$	Subnotation of miniclear, juvenile miniclear or mature miniclear
JWP _j	Juvenile wood percentage of lumber j
ΔWD_{i1j} (or $i2j$)	Wood density difference between Miniclear i and Lumber j
ϕ_{1j} and ϕ_{2j}	Normalizer tuning partial prob defined by wood density, for juvenile group and mature group
Ratio_MoE _j (or Ratio_MoR _j)	Lumber/miniclear MoE (or MoR) of pair j, pair's order is same as lumber's order

