



Modélisation de la stabilité dimensionnelle et des propriétés mécaniques du bois d'épinette noire

Thèse

Luciane Paes Torquato

Doctorat en génie du bois et des matériaux biosourcés
Philosophiæ doctor (Ph. D.)

Québec, Canada

Modélisation de la stabilité dimensionnelle et des propriétés mécaniques du bois d'épinette noire

Thèse

Luciane Paes Torquato

Sous la direction de :

Alexis Achim, directeur de recherche
Roger E. Hernández, codirecteur de recherche
Isabelle Duchesne, codirectrice de recherche

Résumé

Les propriétés de flexion et la stabilité dimensionnelle sont des propriétés déterminantes pour le potentiel d'utilisation du bois dans les structures de bâtiments et les produits à valeur ajoutée. Une connaissance détaillée des patrons de variation des propriétés du bois à l'intérieur de l'arbre est essentielle pour optimiser l'usage de cette ressource renouvelable et développer des produits hautement performants. L'objectif général de cette recherche doctorale était de caractériser et modéliser les patrons de variation des propriétés de flexion et de la stabilité dimensionnelle du bois à l'intérieur de l'arbre en fonction de différents paramètres (l'âge cambial, hauteur dans la tige, largeur des cernes) et en tenant compte de l'historique des peuplements. Cet objectif fut poursuivi au moyen des objectifs spécifiques suivants: décrire le patron de variation des propriétés physico-mécaniques de la moelle vers l'écorce (c.-à-d. en fonction de l'âge cambial) et dans l'axe longitudinal de la tige ; modéliser l'effet du taux de croissance radiale sur les propriétés physico-mécaniques ; modéliser l'effet de la masse volumique basale du bois sur les propriétés physico-mécaniques et examiner les différences entre les deux types de structures de peuplements (régulier et irrégulier). L'étude a porté sur l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P), une espèce de grande importance commerciale au Canada. Soixante arbres ont été échantillonnés dans 12 peuplements localisés au nord et au sud de la Côte-Nord, 30 arbres dans 6 peuplements de la région de l'Abitibi-Témiscamingue et 42 arbres provenant de la région du Lac-Saint-Jean. Une approche de modélisation statistique a été utilisée pour rapporter les paramètres de résistance à la flexion, de rigidité et de stabilité dimensionnelle à des variables telles que l'âge cambial et le taux de croissance annuel. Les peuplements ont été échantillonnés avec un temps connu depuis le passage du dernier feu, car cela est connu pour influencer la structure du peuplement et la croissance des arbres. Les résultats ont confirmé que l'âge cambial est clairement la source la plus importante de la variation en direction radiale des propriétés du bois, lequel pourrait être utilisé comme variable prédictive. La largeur des cernes annuels a eu une influence additionnelle faible pour expliquer les variations des propriétés mécaniques et celles de stabilité dimensionnelle. Le bois des arbres à croissance plus rapide des peuplements réguliers avait des propriétés mécaniques supérieures, et était moins stable en termes de dimensions. Les arbres à croissance lente issus de peuplements irréguliers pourraient produire du bois final moins dense, ce qui tendrait à diminuer les propriétés

mécaniques et à augmenter la stabilité dimensionnelle du matériau. Ces propriétés seraient alors affectées par les patrons de variation intra-cernes de la masse volumique du bois. L'effet du type de peuplement sur les propriétés physico-mécaniques du bois peut également être attribuable à la présence de bois de compression modéré, qui peut être présent dans les arbres issus de marcottes ou dans des arbres soumis à des stimuli mécaniques plus importants et plus complexes. Les analyses indiquent également que les mesures de la masse volumique du bois et de l'âge cambial peuvent être utilisées pour estimer la stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques. De plus, les indices de prédition ont montré qu'il est préférable de prédire la stabilité dimensionnelle à partir des mesures de MOE et de l'âge cambial au lieu d'opter pour le cas inverse, soit estimer les propriétés mécaniques à partir de la stabilité dimensionnelle. Ces résultats pourraient avoir des implications pratiques pour la prise de décision en matière de gestion forestière et d'allocation du bois. La sélection de peuplements forestiers pour produire du bois d'épinette noire ayant une stabilité dimensionnelle élevée ou des propriétés mécaniques élevées peut être une option intéressante qui émerge de nos résultats. En général, les résultats de la modélisation ont permis de bien caractériser les différences entre les deux types de structures de peuplements. Cependant, des recherches fondamentales plus poussées sont nécessaires pour élucider les mécanismes de formation du bois qui sont responsables des différences de propriétés en relation avec l'environnement de croissance dans ces deux types de peuplement, notamment au niveau de la structure interne des cernes de croissance et de l'ultrastructure et de la composition chimique de la paroi cellulaire des trachéides du bois, afin d'obtenir un outil plus complet de simulation de la qualité du bois pour l'épinette noire.

Abstract

Bending strength, stiffness, and dimensional stability of wood are determining properties for their potential use in building structure and added-value products. A detailed knowledge of the variation patterns of the properties inside a tree is essential to optimize the use of this renewable resource and to develop high-performance products. This PhD project's goal is to characterize and model the variation pattern for bending strength, stiffness, and dimensional stability within the tree as a function of different parameters (radial distance, the height of the stem, the ring width) and taking into account the history of the stands. This general objective was pursued by the means of the specific objectives to : 1) describe the variation pattern of the physico-mechanical properties from pith to the bark (i.e. as a function of cambial age) and in the longitudinal axis of the stem; 2) model the effect of the radial growth rate on the physico-mechanical properties; 3) model the effect of the basic specific density on the physico-mechanical properties and examine the differences between the two types of stand structures (regular and irregular). The study focused on black spruce (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), a species of high commercial importance in Canada. Sixty trees were sampled in twelve stands located north and south of the North Shore region, thirty trees in six stands in Abitibi-Témiscamingue and forty-two trees from Lac Saint-Jean. This study used a statistical modelling approach to relate flexural strength, stiffness and dimensional stability parameters to variables such as cambial age and annual growth rate. The stands were sampled with a known time since the last fire because this is known to influence stand structure and tree growth. The results confirmed that cambial age is clearly the most important source of radial direction variation in wood properties, which could be used as a predictive variable. The ring width had a small additional influence to explain the variations in mechanical and dimensional stability properties. The fast-growing wood in regular stands had superior mechanical properties and were less dimensionally stable. Slow-growing trees from uneven-aged, irregular stands may produce less dense latewood, which would tend to reduce mechanical properties and increase the dimensional stability of the material. Thus, these properties may be affected by the patterns of intra-ring variation in wood density. The effect of stand type on the wood physico-mechanical properties may also be due to the presence of mild compression wood, which can occur in trees of layer origin or in trees subjected to greater or more complex mechanical stimuli. Analyses also indicate that wood density and

cambial age measurements can be used to estimate dimensional stability and mechanical properties. In addition, prediction indices have shown that it is preferable to predict dimensional stability from MOE and cambial age measurements rather than opting for the opposite case, i.e., estimating mechanical properties from dimensional stability. These results could have practical implications for decision-making in forest management and wood allocation. The selection of forest stands to produce black spruce wood for either high dimensional stability or high mechanical properties may be an interesting option that emerges from our results. In general, the modelling results were able to clearly characterize the differences between the two types of stand structures. However, further fundamental research is needed to elucidate the mechanisms of wood formation that are responsible for differences in properties related to the growth environment in these two types of stand, including the internal structure of growth rings and the ultrastructure and chemical composition of the cell wall of wood tracheids, in order to obtain a more complete tool of simulation of wood quality for black spruce.

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Table des matières</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>ix</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>xvi</i>
<i>Avant-propos</i>	<i>xviii</i>
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre 1 Revue de littérature</i>	<i>3</i>
1.1 L'épinette noire (<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.)	<i>3</i>
1.2 Conditions de croissance et sources de variation des propriétés du bois	<i>5</i>
1.2.1 Les facteurs environnementaux et la génétique	<i>6</i>
1.2.1.1 Les effets des différences régionales et de la qualité de station.....	<i>8</i>
1.2.2 Dynamique forestière, l'influence du temps après feu et la structure de peuplement.....	<i>8</i>
1.3 Qualité du bois	<i>11</i>
1.3.1 Principales sources de variation des propriétés du bois à l'intérieur de l'arbre	<i>11</i>
1.3.2 Principales propriétés physiques et mécaniques de la qualité du bois	<i>15</i>
1.3.2.1 Effets de la masse volumique du bois sur les propriétés physico-mécaniques	<i>16</i>
1.3.2.2 Variations radiale et longitudinale des propriétés physico-mécaniques.....	<i>18</i>
1.3.2.3 Effet de la croissance radiale sur les propriétés physico-mécaniques.....	<i>19</i>
1.4 Des connaissances inexistantes ou mal intégrées.....	<i>21</i>
1.4.1 La modélisation, une proposition de solution	<i>22</i>
1.4.1.1 La modélisation pour le bois	<i>23</i>
1.4.2 Modèles linéaires et non linéaires mixtes comme approches statistiques.....	<i>25</i>
1.5 Objectifs de recherche	<i>26</i>
1.5.1 Objectif général.....	<i>26</i>
1.5.2 Objectifs spécifiques.....	<i>27</i>
<i>Chapitre 2 Matériel et méthodes</i>	<i>28</i>
2.1 Régions étudiées.....	<i>28</i>
2.2 Structure du plan d'expérience	<i>28</i>
2.2.1 Structure de l'échantillonnage sur terrain.....	<i>31</i>
2.2.2 Préparation des billes	<i>32</i>
2.2.3 Préparation des échantillons pour les essais de laboratoire.....	<i>33</i>
2.3 Procédures d'essais	<i>36</i>
2.3.1 Essais mécaniques	<i>36</i>
2.3.2 Essais des propriétés physiques.....	<i>37</i>
2.3.2.1 Teneur en humidité.....	<i>38</i>
2.3.2.2 Détermination de la masse volumique basale et de la masse volumique anhydre	<i>39</i>
2.3.2.3 Détermination du retrait du bois.....	<i>39</i>

2.3.2.4 Détermination des paramètres de stabilité hygroscopique et dimensionnelle.....	41
2.4 Procédures d'analyses statistiques.....	43
2.4.1 Approche statistique	44
2.4.2 Application du modèle linéaire (lm) et du modèle linéaire mixte (lme).....	45
2.4.3 Application du modèle non-linéaire mixte (nlme).....	46
<i>Chapitre 3 Black spruce trees from fire-origin stands have higher wood mechanical properties than those from older, irregular stands.....</i>	49
3.1 Résumé.....	49
3.2 Abstract.....	49
3.3 Introduction	50
3.4 Materials and methods	53
3.4.1 Sampling locations	53
3.4.2 Preparation of small defect-free samples	55
3.4.3 Determination of mechanical properties	55
3.4.4 Statistical analysis	56
3.4.5 Model development.....	57
3.4.6 Simulations incorporating annual ring width	59
3.5 Results.....	60
3.6 Discussion.....	63
3.7 Conclusion	68
<i>Chapitre 4 Black spruce trees from uneven-aged, old-growth stands produce more dimensionally stable wood than trees from fire-origin, even-aged stands.....</i>	69
4.1 Résumé.....	69
4.2 Abstract.....	69
4.3 Introduction	70
4.4 Materials and methods	73
4.4.1 Sampling locations and tree selection.....	73
4.4.2 Preparation of small defect-free samples	75
4.4.3 Measurement of physical properties	76
4.4.4 Hygroscopic and dimensional stability parameters.....	77
4.4.5 Statistical analyses	78
4.4.6 Model development.....	79
4.4.7 Simulations incorporating annual ring width	81
4.5 Results and Discussion	82
4.5.1 Equilibrium moisture content and hygroscopic stability.....	83
4.5.2 Wood shrinkage and parameters of dimensional stability	83
4.5.3 Modelling the radial variation of the differential shrinkage ratio (G_V) and R-ratio.....	89
4.6 Conclusions.....	97
<i>Chapitre 5 Black spruce trees from regular and irregular stands: relationships between cambial age, mechanical properties, and dimensional stability.....</i>	98
5.1 Résumé.....	98

5.2 Abstract.....	98
5.3 Introduction	99
5.4 Materials and methods	102
5.4.1 Sampling locations and tree selection.....	102
5.4.2 Measurement of mechanical properties	104
5.4.3 Determination of mechanical properties	104
5.4.4 Measurement of physical properties	104
5.4.5 Dimensional stability parameters	106
5.4.6 Statistical analysis	107
5.5 Results and Discussion.....	108
5.5.1 Exploratory analysis	112
5.5.2 Multiple regression equations for differential shrinkage ratios (G_U).....	113
5.5.3 Multiple regression equations for MOE and MOR.....	120
5.6 Conclusion	124
<i>Conclusion générale.....</i>	125
<i>Recommandations</i>	130
<i>Bibliographie.....</i>	132

Liste des figures

Figure 1.1 Principales zones de végétation au Québec (adapté de MFFP 2017).	4
Figure 1.2 Représentation schématique de l'approche de modélisation.	27
Figure 2.1 Région d'échantillonnage dans la forêt boréale sur la côte nord de Québec, indiquant le temps écoulé depuis le dernier feu (adaptée de Bouchard et al. 2008)...	29
Figure 2.2 Plan d'échantillonnage dans le terrain de toute la région de la Côte-Nord. La placette 10 a été initialement classée comme peuplement irrégulier.	31
Figure 2.3 Abattage d'arbres et identification des billes.....	32
Figure 2.4 Positions de coupe des billes dans la tige pour les arbres de la Côte Nord (gauche = échantillonnages à 4 hauteurs, droite = échantillonnage au DHP).	33
Figure 2.5 Découpage des planches sur quartier à 30 mm d'épaisseur.	34
Figure 2.6 Identification des cernes sur la planche (M = moelle).	34
Figure 2.7 Plan de découpe des échantillons pour les essais de flexion statique et de retrait.	35
Figure 2.8 Dimensions des échantillons pour les essais mécaniques et physiques. Où: T = tangentielle, L = longitudinale, R = radiale.....	35
Figure 2.9 Vue du dispositif pour l'essai de flexion statique.	36
Figure 2.10 Refroidissement des échantillons anhydres pour la prise de mesure de masse et dimensions.....	38
Figure 2.11 Profil de la relation entre le retrait volumétrique et la teneur en humidité d'équilibre montrant le paramètre G_V et le PSF estimé par la méthode du point d'intersection à retrait nul.	41
Figure 2.12 Relation entre la teneur en humidité d'équilibre et l'humidité relative obtenue en adsorption et en désorption à 21°C (adapté de Goulet 1968).	43
Figure 2.13 Allure de l'équation adaptée du modèle Michaelis – Menten 1913 (Lobry 2008).	47
Figure 3.1 Map showing the locations of the study areas in the North Shore region of Quebec, Canada.....	52
Figure 3.2 Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) vs. cambial age (points) with predictions (lines) and standard error of predictions (shading) at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from the fixed effects of Eqs. 3.1 and 3.2 using the predicted mean ring width values from Eq. 3.3, where appropriate.....	58
Figure 3.3 Annual ring width vs. cambial age (points) with predictions (lines) and standard error of predictions (shading) at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from the fixed effects of Eq. 3.3 in each case.	60
Figure 3.4 Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) vs. cambial age (points) and model predictions (lines) for regular stands at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from Eq. 3.2 using the predicted mean ring width values from Eq. 3.3 and for the mean ring width values $\pm 50\%$	64

Figure 3.5 Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) vs. cambial age (points) and model predictions (lines) for irregular stands at 1.3 m and the upper stem. MOE predictions were calculated from Eq. 3.1 and MOR predictions were calculated from Eq. 3.2 using the predicted mean ring width values from Eq. 3.3 and for the mean ring width values \pm 50%	65
Figure 4.1 Annual ring width as a function of cambial age (points) with (lines) and standard error of predictions (shading) at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from the fixed effects of Eq. [4.7] in each case.	82
Figure 4.2 Volumetric shrinkage β_v of black spruce wood as a function of EMC for regular and irregular stands at breast height. Standard errors (SE) are shown only when it exceeds the symbol size. The slope of curves within the two bars represents the differential volumetric shrinkage ratio (G_v). Symbol on the x-axis represent the FSP estimated by the shrinkage intersection point method	85
Figure 4.3 Differential volumetric shrinkage ratio G_v and R-ratio as a function of cambial age (points) with predictions (lines) and standard error of predictions (shading) at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from the fixed effects of Eqs. [4.4] and [4.6] using the predicted mean ring width values from Eq. [4.7], where appropriate.....	90
Figure 4.4 Regular stands: Differential volumetric shrinkage ratio G_v and R-ratio as a function of cambial age (points) and model predictions (lines) for regular stands at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from Eq. [4.4] and from Eq. [4.6] (at 1.3 m) using the predicted mean ring width values from Eq. [4.7] and for the mean RW values \pm 50%. Only one line appears in three of the four panels because the effect of ring width was only significant for G_v at breast height.....	93
Figure 4.5 Irregular stands: Differential volumetric shrinkage ratio G_v and R-ratio as a function of cambial age (points) and model predictions (lines) for irregular stands at 1.3 m and at the upper stem. Predictions were calculated from Eq. [4.4] and from Eq. [4.6] (For R-ratio at upper stem) using the predicted mean ring width values from Eq. [4.7] and for the mean RW values \pm 50%. Only one line appears in three of the four panels because the effect of ring width was only significant for the R-ratio in the upper stem.....	94
Figure 5.1 Relationship between differential volumetric shrinkage (G_v) and modulus of elasticity (MOE) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R^2 values were calculated from simple regression models.	116
Figure 5.2 Relationship between differential volumetric shrinkage (G_v) and cambial age (CA) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R^2 values were calculated from simple regression models.	117
Figure 5.3 Relationship between differential volumetric shrinkage (G_v) and oven-dry density (D_o) at 1.3 m and at the upper stem for regular and irregular stands. R^2 values were calculated from simple regression models.	118

Figure 5.4 Relationship between modulus of elasticity (MOE) and cambial age (CA) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R ² values were calculated from simple regression models.	118
Figure 5.5 Relationship between modulus of elasticity (MOE) and oven-dry density (D _o) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R ² values were calculated from simple regression models.	119
Figure 5.6 Relationship between modulus of rupture (MOR) and oven-dry density (D _o) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R ² values were calculated from simple regression models.	119
Figure 5.7 Relationship between modulus of rupture (MOR) and cambial age (CA) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R ² values were calculated from simple regression models.	120

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Liste des variables considérées pour la modélisation.	26
Tableau 2.1 Nombre de placettes et d'arbres échantillonnés par région du Québec.....	30
Tableau 2.2 Résumé des paramètres utilisés pour les essais de flexion statique.....	36
Tableau 2.3 Détails des paramètres utilisés dans chaque condition de teneur en humidité. 37	
Table 3.1 Details of the sampling areas and sample tree characteristics.....	54
Table 3.2 Details of the small clear wood sample characteristics for regular and irregular stands by stem position (1.3 m and combined upper stem data).....	56
Table 3.3 Parameter estimates, associated standard errors (SEs), t values, and p values of the fixed effects and standard deviations (SDs) of the random effects estimates for the modulus of elasticity (MOE) models given by Eq. 3.2 (regular stands) and Eq. 3.1 (irregular stands).	61
Table 3.4 Parameter estimates, associated standard errors (SEs), t values, and p values of the fixed effects and standard deviations (SDs) of the random effects estimates for the modulus of rupture (MOR) models Fixed effects given by Eq. 3.2.....	62
Table 3.5 Error statistics calculated from the fixed parts of the MOE and MOR models and fit indices (R^2) calculated from both the fixed effects and from the fixed plus random effects levels of the models.	62
Table 3.6 Parameter estimates, associated standard errors (SEs), t values, and p values for the ring width models given by Eq. 3.3.	63
Table 4.1 Summary statistics of stand- and tree-level characteristics for the 12 black spruce stands in this study.	75
Table 4.2 Details of the parameters used in each moisture content condition.	77
Table 4.3 Physical properties of the small clear samples for regular and irregular stands by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7 and 10 m). Values shown are the mean and standard error (in parentheses).	87
Table 4.4 Parameter estimates associated standard errors (SE), t-values, and p-values of the fixed effects and standard deviations of the random effects estimates for G_V (%/%) models given by either Eqs. [4.4] or Eq. [4.6].	91
Table 4.5 Parameter estimates associated standard errors (SE), t-values, and p-values of the fixed effects and standard deviations (SD) of the random effects estimates for the R-ratio ($cm^3 g^{-1}$) models given by either Eqs. [4.4] or [4.6].	92
Table 4.6 Error statistics calculated from the fixed effects of the G_V and R-ratio models, and fit indices (R^2) calculated from both the fixed effects and from the fixed plus random effects levels of the models. E =mean error, $ E $ =mean absolute error, RMSE=root mean square error, $E\%$ =mean percentage error, $ E \%$ =mean absolute percentage error (Parresol 1999).	92
Table 5.1 Details of the sampling areas and sample tree characteristics. Values shown are the mean, standard deviation () and range [] of the selected variables	103
Table 5.2 Details of the parameters used in each moisture content condition.	105

Table 5.3 Physical and mechanical properties of small clear samples for regular and irregular stands by stem position (at 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m) (Torquato et al. 2020).	110
Table 5.4 Regression equations of the differential radial shrinkage G_R (%/%) of black spruce wood as a function of cambial age (CA), oven-dry density (D_o), and modulus of elasticity (MOE) for regular and irregular stands, by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m).	114
Table 5.5 Regression equations of the differential tangential shrinkage G_T (%/%) of black spruce wood as a function of modulus of elasticity (MOE), cambial age (CA), and oven-dry density (D_o), for regular and irregular stands, by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m).	115
Table 5.6 Regression equations of the differential volumetric shrinkage G_V (%/%) of black spruce wood as a function of modulus of elasticity (MOE), cambial age (CA), and oven-dry density (D_o), for regular and irregular stands, by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m).	117
Table 5.7 Regression equations of the modulus of elasticity (MOE) of black spruce wood as a function of cambial age (CA), differential volumetric shrinkage G_V (%/%), and oven-dry density (D_o), for regular and irregular stands by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m).	122
Table 5.8 Regression equations of the modulus of rupture (MOR) of black spruce wood as a function of oven-dry density (D_o), cambial age (CA), and differential volumetric shrinkage G_V (%/%) for regular and irregular stands by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7 and 10 m).	123

*Je dédie cette thèse au plus précieux cadeau
que Dieu m'ait offert dans ma vie,
mon mari Diego.*

“Success is not final, failure is not fatal: it is the courage to continue that counts.”

— Winston S. Churchill

Remerciements

Le travail d'équipe était essentiel pour mener à terme ce projet de doctorat, principalement avec la contribution et le partage des connaissances de plusieurs personnes. J'ai pu compter sur des soutiens et encouragements sans précédent. Je ne pouvais donc pas boucler ce cycle sans d'abord remercier tous ceux et celles qui m'ont aidée pour que cela soit possible. Ainsi, je voudrais, très affectueusement, remercier toutes les personnes qui ont cru en moi et qui m'ont aidée à franchir la ligne d'arrivée.

Je commence par remercier Dieu, qui a guidé mes pas, car j'ai prié dans les bons moments, et plus encore dans les moments difficiles.

J'aimerais remercier vivement mon directeur de thèse, M. Alexis Achim, de m'avoir montré qu'il est possible de surmonter les difficultés ensemble pour atteindre un objectif commun. Merci pour ton exemple de dynamisme et de passion pour la recherche. Je remercie ma codirectrice, Mme Isabelle Duchesne, pour son soutien et pour son encouragement toujours pertinent. Merci d'être présente avec ton enthousiasme et prête à tout recommencer avec moi, même longtemps après. Je voudrais exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude à mon co-directeur, M. Roger E. Hernández, qui était toujours proche et disposé à me guider jusqu'à la fin de mon parcours. Merci de m'avoir fait croire en ma capacité d'aller plus loin. Chacun de vous, avec votre précieuse contribution, a été essentiel dans ma trajectoire. Ce fut une occasion inestimable d'être guidé par vous tout au long de ces années.

Je voudrais adresser toute ma reconnaissance à M. Alain Cloutier et M. Ahmed Koubaa pour leurs contributions fructueuses à l'amélioration de cette thèse comme membres du comité d'encadrement. Je vous remercie aussi, bien comme à M. Frédéric Mothe, en tant que membres du jury, pour vos temps précieux consacrés en ma faveur avec l'évaluation de mon travail. Je remercie également M. David Auty pour son indispensable collaboration. Merci de m'avoir montré les meilleurs outils pour travailler, j'ai appris énormément avec toi. Je remercie mes professeurs et professeures de l'UFPR au Brésil, qui ont déployé tous les efforts possibles pour que je puisse relever mon défi, en particulier Graciela Bolzón, qui m'a dirigé vers l'Université Laval. Merci à mon directeur de maîtrise, Setsuo Iwakiri, aussi à Ghislaine Bonduelle, João Garzel, Umberto Klock et Jorge Mattos pour tous leurs encouragements.

Tous mes remerciements et mes appréciations vont également à toute l'équipe du Centre de recherche sur les matériaux renouvelables (CRMR) et de la FFGG. En spécial à Guylaine Bélanger, Jenny McKenzie, Daniel Bourgeault, Luc Germain, Sylvain Auger, Sophie-Anne Landry et à l'équipe d'usinage, pour toute la gentillesse et le support qu'ils m'ont témoigné. Mon grand merci aux collègues de travail pour leur aide précieuse sur le terrain ou dans les laboratoires, Emmanuel, Normand, Martine, Fabien, Louis, Amélie, Erika, Joël et Alexandre.

À mes amis j'aimerais exprimer ma profonde gratitude, notamment à ceux qui étaient les plus proches dans cette partie de ma vie, Ana Claudia et Airton, Ana Paula et André, Andréa Hevia, Angela, Bruna et Jedi, Caroline Frenette, Célia, Claudia et Damien, Cleide et Vini, Dave et Maude, David et Karine, Diane et Étienne, Elaine, Franz, Fred et Isidora, Gab Masson, Gina, Gino, Gisele avec Paula et Nina, Greg et Laurianne, Ione, Jessica, Jeziel, Jonathan et Ana, Ju Sena, Ju et Joelton, Judy et Pierre, Kari et Adriano, Keka et Sincero, Leandro et Erika, Luis et Caro, Luz, Má et Marcio, Marc, Mari et Edu, Mari et Ideval, Marc-André et Steph, Matheus et Myriam, Mathieu et Marie-Claire, Mathieu et Valérie, Nour, Ophélie et Baptiste, Pamela, Paulo Augusto, Raffa et Felipe, Rosilei et Louis-Martin, Sebas et Soléya, Taty et Edu, Tici et Zinho, Vera Correa, Vivi et Diogenes et plein d'autres encore. Merci d'avoir participé à cette longue aventure, presque une légende.

Je tiens également à remercier à toute ma famille, à mes parents Maria (in memoriam) et Zariel Torquato (in memoriam), à mes frères Riva et Cristovão, à mes sœurs Raquel, Rozana et Lucinei, à ma belle-sœur Marta, à mes beaux-frères Júnior et José, à mes neveux Christian, Cristiano, Lucas avec Manu et Mariana, Guilherme, Luciano, Henrique et mes nièces Alice, Roberta, Ruthe e Ananda, qui m'ont soutenue tout au long de mes projets et qui m'ont toujours appris à ne pas abandonner mes objectifs. Je vous aime tellement. Merci à ma belle-famille, Matesa Gentile, Roger Trépanier, Pablo, Pierre, Pascale, Rafaël et Noah, Marie-France, Esmeralda, Pedro, Georges et Andres, Jean-Guy, Claire et Lucie, vous êtes la base la plus solide et la plus motivante que je pouvais avoir ici et vous étiez très importants pour m'aider à relever mon défi. Vous êtes tous mon plus grand trésor.

Merci à mon mari Diego Trépanier, pour son soutien et son amour inconditionnel. Merci infiniment de m'accompagner à chaque instant et merci d'être la lumière dans mon chemin, « *você é assim, um sonho pra mim* », l'amour de ma vie !!

Avant-propos

Cette thèse a été réalisée au sein du Centre de recherche sur les matériaux renouvelables (CRMR) de l'Université Laval. Le projet a été fait dans le cadre du réseau stratégique CRSNG sur l'aménagement forestier pour les produits à valeur ajoutée ForêtValeur (ForValueNet) sous le thème de recherche 2: « Modélisation tridimensionnelle de la qualité de la tige ». Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme de doctorat en génie du bois et des matériaux biosourcés et les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'une thèse de publications. Trois articles font ainsi partie intégrante de cette thèse dont leurs titres sont les suivants :

Chapitre 3: Torquato, L. P., Auty, D., Hernández, R., Duchesne, I., Pothier, D. and Achim, A. 2014. Black spruce trees from fire-origin stands have higher wood mechanical properties than those from older, irregular stands. *Can. J. For. Res.* 44(2), 118-127. (Publié en janvier 2014).

Chapitre 4: Torquato, L. P., Hernández, R., Duchesne, I., Auty, D. and Achim, A. 2020. Black spruce trees from uneven-aged, old-growth stands produce more dimensionally stable wood than trees from fire-origin, even-aged stands. (Soumis à *Wood Science and Technology* en septembre 2020).

Chapitre 5: Torquato, L. P., Hernández, R., Duchesne, I. and Achim, A. Black spruce trees from regular and irregular stands: relationships between cambial age, mechanical properties, and dimensional stability. (À être soumis à *Wood Science and Technology*).

Les résultats de cette étude ont également été présentés sous forme de présentations orales lors des événements et conférences suivantes :

Torquato, L. P., Auty, D., Achim, A., Hernández R., Duchesne, I. Modélisation des propriétés mécaniques et de stabilité dimensionnelle des bois d'épinette noire. Conférence dans le cadre du cours SBO-8001, Séminaire II. Université Laval. Québec (Québec), Canada. Avril 2012.

Torquato, L. P., Auty, D., Achim, A., Hernández R., Duchesne, I. Modelling wood mechanical properties and dimensional stability in black spruce. Annual meeting ForValueNet. Lister Centre, University of Alberta. Edmonton (Alberta), Canada. June 2011.

Achim, A., Duchateau, E., Paes Torquato, L., Auty, D. Développement d'un modèle de qualité du bois pour les épinettes noires de la Côte-Nord. Colloque annuel de la Chaire industrielle CRSNG – Université Laval en sylviculture et faune. Mars 2011.

Affiches scientifiques:

Torquato, L. P., Achim, A., Auty, D., Hernández R., Duchesne, I. Modelling clear wood mechanical properties in black spruce. Annual meeting ForValueNet. Montreal (Québec), Canada. November 2012.

Torquato, L. P., Achim, A., Auty, D., Hernández R., Duchesne, I. Modelling clear wood mechanical properties in black spruce. Colloque du CRB : Développement de produits renouvelables à base de bois. Université Laval. Québec (Québec), Canada. Novembre 2012.

Torquato, L. P., Auty, D., Achim, A., Hernández R., Duchesne, I. Modélisation des propriétés mécaniques et de stabilité dimensionnelle des bois d'épinette noire. Journée du CRB. Université Laval. Québec (Québec), Canada. Novembre 2011.

Torquato, L. P., Gardiner, B.A., Achim, A., Auty, D. The impacts of initial spacing on the timber quality and wood properties of Sitka spruce in Scotland: ForValueNet training at Forest Research. Annual meeting ForValueNet. Lister Centre, University of Alberta. Edmonton (Alberta), Canada. June 2011.

Torquato, L. P., Achim, A., Hernández R., Duchesne, I. Modelling of wood mechanical properties and dimensional stability. Annual meeting ForValueNet. Vancouver (British Columbia), Canada. June 2010.

Torquato, L. P., Achim, A., Hernández R., Duchesne, I. Modélisation des propriétés mécaniques et de stabilité dimensionnelle des bois d'épinette noire et de peuplier faux-tremble. Journée du CRB. Université Laval. Québec (Québec), Canada. Novembre 2009.

En tant que candidate au doctorat et première auteure de ces articles, j'ai effectué la planification du travail, la préparation des échantillons, les essais de laboratoire, l'analyse statistique des données ainsi que la rédaction des publications. Mes directeurs de thèse, le professeur Alexis Achim et le professeur Roger Hernández, en tant que coauteurs des articles, ont été responsables de m'encadrer et de me conseiller pendant tout mon cheminement. Mme Isabelle Duchesne, chercheuse scientifique au sein du Centre canadien sur la fibre de bois de Ressources naturelles Canada et professeure associée à l'Université Laval, m'a aussi conseillée en tant que codirectrice et coauteure des articles, et a participé à la révision et aux corrections des manuscrits. Ce projet de recherche a été financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

Introduction

Les forêts boréales canadiennes non aménagées sont un pilier économique important de la chaîne de valeur forestière consacrée aux produits de base comme les pâtes et papiers et le bois d'œuvre classé visuellement (Antal et Micko 1994; Liu et al. 2007; NRCan 2019). Le bois produit dans la zone boréale canadienne possède des propriétés physico-mécaniques très appréciées pour les applications structurales par rapport à celles du bois provenant d'autres endroits où la gestion forestière est plus intensive et où la croissance est plus rapide (Jessome 2000; Bustos et al. 2003; Torquato et al. 2014). Parmi les espèces boréales, l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) est la plus abondante et produit généralement du bois avec une rigidité et une résistance élevées compte tenu de sa masse volumique (Zhang et al. 2002; Lei et al. 2005; Liu et al. 2007). Cette espèce, de grande importance commerciale au Canada et au Québec, est régulièrement ciblée pour optimiser son application comme matériau de structure. Ainsi, dans l'optique de maintenir une production de bois avec une qualité suffisante pour des usages à haute valeur ajoutée, il importe de bien comprendre les sources de variations de ces propriétés; à la fois à l'intérieur de l'arbre et entre différents arbres.

Dans les forêts boréales canadiennes, la plupart des ressources d'épinette noire sont encore récoltées dans des peuplements naturels sans pratiques sylvicoles et exposées aux perturbations naturelles, comme, par exemple, les incendies de forêt. Les feux de forêt font partie de l'écosystème forestier et sont importants dans plusieurs régions du pays pour maintenir la santé et la diversité des forêts (NRCan 2018). Cette perturbation naturelle est le principal moteur de la dynamique des peuplements forestiers (Bergeron et al. 2001; Bouchard et al. 2008). L'épinette noire a un mode de régénération adapté aux incendies de forêt (Chabot et al. 2009). La structure de cette espèce par âge et la répartition de ces peuplements dans le paysage sont affectées par le régime de passage des feux (Raulier et al. 2009). De courts cycles de feu conduisent à des peuplements de structure régulière plus uniforme, tandis que les incendies de forêt survenant à des intervalles plus longs sont connus pour générer des forêts de peuplements irréguliers (Bouchard et al. 2008). Cependant, certaines régions sont moins sujettes aux incendies forestiers que d'autres (Saucier et al. 2009). Dans certaines parties de la zone boréale orientale, comme la région de la Côte-Nord du Québec, le climat plus humide prolonge l'intervalle moyen de retour des incendies (Cyr et al. 2007; Bouchard

et al. 2008), qui dépasse la durée de vie prévue des arbres individuels. Ainsi, environ 60% de cette région est composée de peuplements de structure inégale, soit de structure irrégulière (Cyr et al. 2007; Bouchard et al. 2008). Par conséquent, l'hétérogénéité de la structure des peuplements due aux différences d'âge des arbres peut affecter les propriétés du bois par le biais de variations au sein de l'arbre.

L'objectif général du présent travail de recherche fut donc d'évaluer l'effet de la structure de peuplement sur les propriétés physiques et mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill). B.S.P.). Les principales propriétés étudiées ont été les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) en flexion statique, les coefficients de retraits tangentiel, radial, longitudinal et volumique, les coefficients de stabilité dimensionnelle en direction radiale et tangentielle, la largeur des cernes et la masse volumique basale. Ces propriétés ont été mesurées de la moelle vers l'écorce et à quatre hauteurs dans la tige. Des patrons de variation radiale des propriétés de flexion et de stabilité dimensionnelle ont été modélisés en fonction du taux de croissance et de l'âge cambial, pour les quatre hauteurs dans l'arbre et pour les deux structures de peuplement forestier séparément. Pour répondre aux objectifs de cette recherche, le travail a été divisé en trois volets principaux. Le premier volet a porté sur le développement de modèles à effets mixtes non linéaires pour décrire la variation intra-arbre du MOE et du MOR du bois d'épinette noire, influencée par l'âge cambial et la largeur des cernes de croissance. Des peuplements forestiers de structure régulière et irrégulière ont été échantillonnés pour tester l'hypothèse selon laquelle une croissance plus lente dans des peuplements irréguliers conduit à des propriétés mécaniques plus élevées. Le deuxième volet de cette thèse a eu comme but de développer des modèles à effets mixtes non linéaires pour décrire la variation intra-arbre de deux critères de stabilité dimensionnelle, le coefficient différentiel de retrait (G) et le facteur de retrait m (*R-ratio* en anglais) du bois d'épinette noire, en fonction de l'âge cambial et de la largeur des cernes de croissance. Des peuplements de structures régulières et irrégulières ont été considérés également pour vérifier l'existence de différences entre ces deux types de peuplements par rapport à la stabilité dimensionnelle du bois. Étant donné que les variations dimensionnelles et les propriétés mécaniques en flexion sont des facteurs déterminants de la qualité du bois, le troisième volet de ce travail a eu pour but d'analyser la relation entre ces propriétés en tenant toujours compte des deux types de forêts et de la masse volumique du bois.

Chapitre 1 Revue de littérature

1.1 L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.)

Le Canada est le quatrième plus grand exportateur de produits forestiers dans le monde, lesquels représentent 7% des exportations totales du pays (RNCan 2019). En 2017, l'industrie forestière a contribué avec plus de 24,6 milliards de dollars au produit intérieur brut du pays. Les produits de bois ont été le principal contributeur suivi des pâtes et papiers et des activités d'aménagement et d'exploitation forestières (RNCan 2019). Le territoire du Canada compte 347 millions d'hectares (ha) de forêts, dont 77% sont constituées de forêts boréales, lesquelles représentent 9% des forêts mondiales et 24% des forêts boréales de la planète (RNCan 2018). Environ 90% de ces forêts sont situées sur des terres provinciales et territoriales publiques (RNCan 2019). Un total de 68% de la forêt canadienne est constitué de conifères et les épinettes dominent le paysage, comptant pour 47% du volume de bois total (RNCan 2019).

L'épinette noire, *Picea mariana* (Mill.) B.S.P., est une espèce présente uniquement en Amérique du Nord (Gagnon et Morin 2001; Gagnon et al. 2004; MRNF 2008). Cette espèce fait partie du regroupement d'essences SEPM (sapin, épinettes, pin gris et mélèzes) principalement destiné au bois d'œuvre (MRNF 2010). Son aire de distribution naturelle s'étend dans une large bande du nord du Massachusetts au nord du Labrador sur la côte atlantique et à l'ouest du Canada jusqu'à la côte ouest de l'Alaska. Ses limites sud sont composées de parcelles isolées dans le nord du New Jersey, dans l'ouest du Connecticut, la Pennsylvanie, le sud du Michigan, le sud du Wisconsin, dans le sud du Minnesota et le sud du Manitoba, à l'ouest dans le Centre-Sud de la Saskatchewan, en Alberta, et le centre de la Colombie-Britannique. Sa limite nord à travers le Canada et l'Alaska correspond à la limite des arbres, où elle alterne avec l'épinette blanche (*Picea glauca*), le mélèze (*Larix laricina*) et le peuplier baumier (*Populus balsamifera*) (Burns et Honkala 1990).

Les forêts du Québec représentent 2% des forêts mondiales, couvrant 761 100 km² en superficie, soit près de la moitié du territoire de la province (MFFP 2017). La forêt boréale en tant que zone de végétation représente environ 72% de cette superficie forestière (Figure 1.1). C'est dans cette zone où se trouvent les grands massifs d'épinette noire, appelés

pessières à mousses (Gagnon et Morin 2001). Au Québec, le domaine forestier de la pessière à mousses est le plus vaste de la province, en couvrant 412 400 km² (MRNF 2010), soit 28% du territoire (Saucier et al. 1998; Gagnon et Morin 2001). Ces forêts occupent une bande latitudinale d'environ 300 km de largeur, qui s'étend approximativement jusqu'au 52e parallèle, couvrant la province d'ouest en est (Gagnon et al. 2004).

ZONES DE VÉGÉTATION DU QUÉBEC

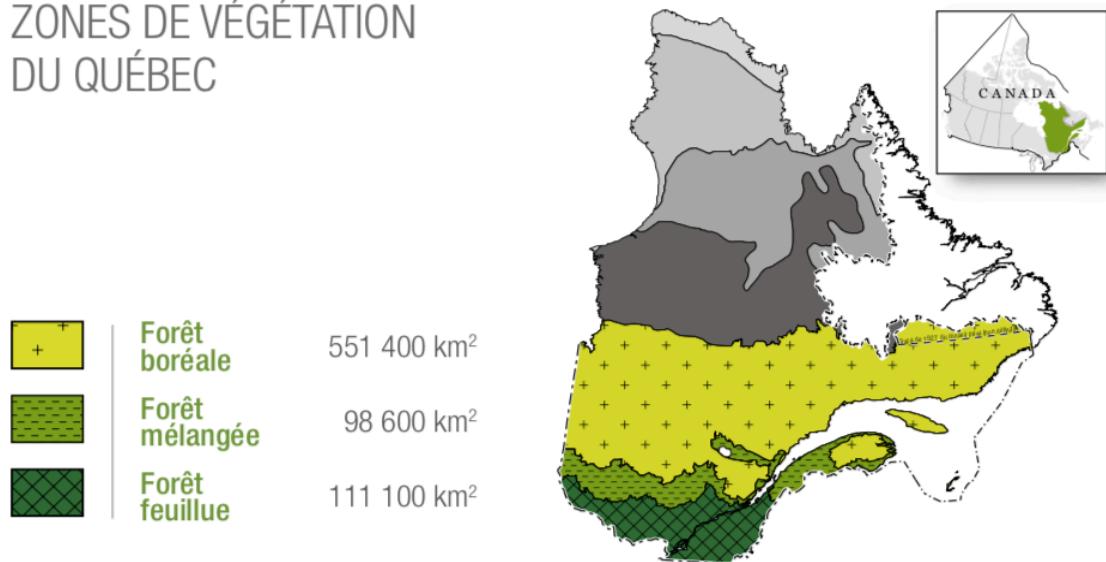


Figure 1.1 Principales zones de végétation au Québec (adapté de MFFP 2017).

L'épinette noire a une énorme valeur commerciale et économique en ce qui concerne son utilisation comme matière première. Considérée comme l'une des plus petites épinettes de l'est, l'épinette noire est une espèce à croissance lente (Forintek Canada Corp. 2006). Dans des conditions normales de peuplements non aménagés, l'arbre atteint environ 12 à 20 m en hauteur et 230 mm en diamètre à la hauteur de la poitrine (DHP) à la maturité dans les stations de bonne qualité, et environ 8 à 12 m en hauteur et 130 mm de DHP dans les stations pauvres (Burns et Honkala 1990). L'épinette noire est la plus abondante parmi les espèces forestières boréales canadiennes, et son bois possède une rigidité et une résistance élevées compte tenu de sa masse volumique (Zhang et al. 2002; Lei et al. 2005; Liu et al. 2007). La couleur pâle, la faible teneur en résine, la qualité de ses fibres, qui sont longues, rigides et très résistantes, permettent la fabrication de papiers minces tout en étant très solides (Gagnon et al. 2004; Zhang et Koubaa 2009). Ces caractéristiques en font une essence très recherchée et hautement appréciée, autant pour la fabrication du papier que pour celle du bois d'œuvre (Gagnon et Morin 2001; Zhang et Koubaa 2009). Comme bois d'œuvre, sa grande résistance

à la rupture en fait un des bois de structure les plus recherchés dans la construction d'habitations en Amérique du Nord (Gagnon et al. 2004; MRNF 2008) et la fabrication d'éléments de bois d'ingénierie structurale (MRNFP 2003). Les sciages de haute valeur d'épinette noire se prêtent notamment particulièrement bien à la confection de semelles et de poutrelles. Sans aucune odeur caractéristique, le bois présente de nombreux petits noeuds entrelacés ou enrobés (Forintek Canada Corp. 2006) qui lui confèrent une forte résistance mécanique due à une faible déviation du fil.

Ce matériau renouvelable permet également d'obtenir davantage de valeur ajoutée sur des produits plus élaborés (MRNFP 2003). L'espèce est une ressource précieuse pour le développement durable du Canada, et plus précisément pour la province du Québec. Ainsi, les entreprises forestières locales font face au défi de devoir constamment optimiser l'usage de cette ressource afin de générer plus de valeur de manière durable. Cette nécessité d'innover, de faire toujours plus avec moins, demande un approfondissement des connaissances sur cette espèce et des moyens d'optimiser son utilisation et d'ajouter de la valeur aux produits que l'on retire.

1.2 Conditions de croissance et sources de variation des propriétés du bois

La théorie de Larson (2001) contribue à expliquer comment l'augmentation de la croissance peut potentiellement affecter les propriétés du bois formé par l'arbre. L'auxine est généralement considérée comme la phytohormone la plus importante impliquée dans la croissance et développement des cellules. Les effets de l'auxine sont multiples, agissant sur les trois réponses cellulaires impliquées dans l'ensemble des processus de croissance chez les plantes, à savoir, la division, l'elongation et la différenciation. Des corrélations ont ainsi été établies entre les contenus en auxine et la croissance ou certaines étapes de développement. Les auxines produites dans la cime vivante favorisent l'activité du cambium qui, à son tour, favorise la production des cernes de croissance plus larges, principalement dans le bois initial. Larson (2001) analyse, entre autres, les effets de l'architecture de l'arbre, de la densité du peuplement, des éclaircies et leurs types, de l'espacement et de la structure du peuplement sur la croissance. Ainsi, les changements dans les caractéristiques qui déterminent la qualité du bois sont contrôlés en grande partie par la taille, la distribution et l'efficacité des organes

foliaires responsables de la photosynthèse. Selon cet auteur, ce processus est la clé pour comprendre la variabilité de la qualité du bois produit.

D'un point de vue plus large, Zobel et Jett (1995) signalent que tout ce qui affecte la physiologie et la croissance de l'arbre peut altérer les propriétés du bois. Les sources de variation comprennent les provenances, les différences entre les arbres et même, pour la plupart des propriétés du bois, la variabilité dans l'arbre (Zobel et Jett 1995). Ceux-ci sont, en général, influencés par de nombreuses facteurs (e.g. génétique) qui sont à leur tour affectés par des pratiques sylvicoles ou par des conditions de croissance.

1.2.1 Les facteurs environnementaux et la génétique

À mesure qu'un arbre grandit, le bois produit varie à la fois suivant le rayon du fût et le long de sa hauteur. Ces variations peuvent être très importantes, en particulier chez les conifères (Zobel et Sprague 1998). Le site sur lequel poussent les arbres affecte la production de bois en raison des changements dans l'environnement qui peuvent influencer le taux de croissance. Selon Zobel et Jett (1995), les conditions de croissance d'un arbre, réagissant avec son potentiel génétique, déterminent les propriétés du bois, car ces facteurs peuvent affecter la physiologie de l'arbre. L'environnement du site détermine non seulement la croissance en diamètre à la base de la tige, mais aussi à des niveaux supérieurs et, par conséquent, ils peuvent affecter le rendement et la qualité du produit final (Larson et al. 2001). L'influence des conditions écologiques (telles que les nutriments et le sol) et des conditions de croissance locales sur les propriétés du bois d'épinette noire, telles que la masse volumique, le module d'élasticité (MOE) et l'angle des microfibrilles, a été rapportée par Giroud et al. (2016). Ces chercheurs ont démontré que ces propriétés étaient significativement différentes entre les sites étudiés.

Les conditions de croissance locales sont étroitement liées aux diverses variables climatiques (Thomson et al. 2009; Williamson et al. 2009; Giroud et al. 2016). Des études antérieures ont décrit les liens entre les facteurs climatiques et les caractéristiques cellulaires de l'épinette noire en remarquant une influence significative de la température (Krause et al. 2010; Xiang et al. 2014). La large distribution géographique de l'épinette noire en forêt boréale pourrait être attribuée à une meilleure adaptation anatomique au climat froid des hautes latitudes

(Krause et al. 2010). En effet, l'épinette noire pousse sur différentes stations et tolère plusieurs types de sol (Burns et Honkala 1990; Zhang et Koubaa 2009). Ceux-ci sont directement influencés par les perturbations naturelles qui pourront aussi affecter les conditions de croissance des arbres. Quant à son habitat, l'espèce pousse généralement sur des sols humides et organiques au nord et sur des sols mal drainés au sud de son aire de distribution (Zhang et Koubaa 2009). Les peuplements d'épinette noire occupent ainsi les sites les plus humides avec une couche organique saisonnière moyenne du sol forestier et une teneur en humidité de 60 à 160% (Bonan et Shugart 1989).

Un autre facteur qui a des effets sur la physiologie de la croissance est la lumière (Dufour et Morin 2013). La quantité de lumière interceptée par une cime peut être mise en relation non seulement avec la croissance de l'arbre en volume et en hauteur, mais aussi avec l'évolution de ses caractéristiques de cime, avec la mortalité induite par la compétition et avec la régénération sous le couvert forestier (Saucier et Groot 2008). Néanmoins, par rapport à la réaction à la compétition pour la lumière, l'épinette noire est classée comme une espèce tolérante à l'ombre, sans être aussi tolérante que le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.) (Burns et Honkala 1990).

En relation à la densité du peuplement, la surabondance de tiges a pour effet de diminuer la croissance des individus qui se trouvent en concurrence en présence de ressources limitées (Doucet et al. 2009). À mesure que la compétition s'intensifie, la capacité des individus à concurrencer se différencie, les plus faibles en perte de vitesse libérant l'espace dans le couvert supérieur pour l'expansion de la cime des plus vigoureux (Doucet et al. 2009). Les arbres soumis à la compétition au début de leur vie pourront présenter des cernes de croissance plus étroits. Alteyrac et al. (2005) a observé, chez l'épinette noire issue de régénération naturelle, que la densité du peuplement a plus d'influence sur les caractéristiques de largeur des cernes que sur celles de leur masse volumique.

Enfin, la croissance des arbres dépend également de leur constitution génétique. Lorsque les variations au sein des arbres s'ajoutent aux différences génétiques inhérentes à la qualité du bois entre les arbres, il en résulte des variations considérables au sein des espèces (Zobel et Sprague 1998). La variation génétique naturelle de l'épinette noire est graduelle, principalement le long d'un gradient géographique sud-nord (Burns et Honkala 1990). Lors

des études sur l'héritabilité de 23 provenances d'épinette noire, Zhang et Koubaa (2009) ont trouvé que la majorité de onze caractéristiques de qualité du bois avaient des valeurs d'héritabilité élevées.

1.2.1.1 Les effets des différences régionales et de la qualité de station

Il est reconnu que les propriétés du bois d'une espèce peuvent varier selon la région de croissance et, à l'intérieur de celle-ci, avec les particularités du peuplement (Zobel et Van Buijtenen 1989; Bowyer et al. 2007). Un facteur qui explique ces différences est la dynamique des perturbations naturelles, qui est fortement influencée par les conditions climatiques et, qui peuvent varier grandement d'une région à l'autre (Ruel et al. 2007). Des différences de structures de peuplement vont amener à des différences de patrons de croissance, ce qui peut affecter la proportion de bois juvénile, par exemple.

Un autre facteur pouvant expliquer les différences entre régions est relié à celui appelé l'effet du site ou de la station (Zobel et Sprague 1998; Macdonald and Hubert 2002). Normalement, les arbres qui poussent sur de sites considérés de bonne qualité atteignent un taux maximum de croissance en hauteur avant ceux qui croissant sur des sites pauvres (Thrower 1987; Mailly et Gaudreault 2005). Ce comportement a été également observé pour l'épinette noire (Rycabel 2007; Zhang et Koubaa 2009). Rycabel (2007) a noté que le bois provenant des sites riches est plus léger que le bois issu des sites pauvres. D'après Philip (1994), ce résultat est possible lorsque des conditions de croissance sont favorables suite à un feu, soit en absence de compétition avec la végétation au sol.

1.2.2 Dynamique forestière, l'influence du temps après feu et la structure de peuplement

Les perturbations naturelles sont essentielles à prendre en compte en forêt boréale non aménagée, car elles déterminent, en fonction de leur sévérité et leur fréquence (Bouchard 2008), la structure d'âge et, conséquemment, les essences qui y sont présentes (Raulier et al. 2009). Les perturbations peuvent aller de l'échelle de la mort des arbres individuels dans un peuplement jusqu'aux incendies de forêt catastrophiques à l'échelle du paysage (Harvey et al. 2003). Parmi la variété de perturbations naturelles ayant cours en forêt boréale, les feux,

par leur sévérité et leur répartition sur la totalité du territoire, jouent un rôle prépondérant dans la dynamique forestière à l'échelle de l'est du Canada (Gauthier et al. 2008; Chabot et al. 2009; RNCAN 2010).

Au-delà des divers facteurs énumérés précédemment, la dynamique forestière, telle qu'influencée par le temps écoulé depuis le dernier feu, représente donc un facteur important qui affecte la croissance de l'épinette noire. Les arbres sont facilement tués par les feux de cimes (Burns et Honkala 1990), qui sont une des principales causes de mortalité naturelle chez cette espèce (Gagnon et Morin 2001). Cependant, l'épinette noire présente un mode de régénération adapté au feu (Chabot et al. 2009), qui lui permet d'être l'une des premières espèces à s'établir après un feu (Lieffers et al. 2003).

Gauthier et al. (2008) expliquent la dynamique naturelle de la pessière à mousse en trois parties, comme suit :

- « En supposant que les feux soient sévères, particulièrement en ce qui concerne leurs effets sur la couche de matière organique du sol, et que la régénération après feu soit dominée par l'épinette noire, on peut observer une première cohorte (groupe d'arbres) caractérisée par une forêt dense et équienne d'épinettes issues de graines. »
- « En absence de feu, lorsque ces épinettes seront à maturité et commenceront à mourir, elles seront graduellement remplacées par une forêt plus ouverte comportant encore des tiges issues du feu et une régénération issue principalement de marcottes, constituant alors des peuplements dits de deuxième cohorte. »
- « Sans feu, ces peuplements évolueront vers des peuplements inéquiennes principalement maintenus par le marcottage et caractérisés par une structure hétérogène et une accumulation de débris ligneux, constituant alors les peuplements de troisième cohorte. »

Ainsi, les pessières issues de feu sont caractérisées par une structure équienne, témoins d'un établissement rapide après le passage de l'incendie (Lussier et al. 2002). Ce sont des peuplements majoritairement formés d'individus provenant de graines (Lussier 1991). Selon Burns et Honkala (1990), ces peuplements sont les plus fréquents parmi les peuplements

naturels, puisque les feux de forêt sont assez fréquents et assez larges pour empêcher le développement de structures irrégulières ou inéquaines. Cependant, les forêts dominées par l'épinette noire sont souvent dotées d'un potentiel considérable de régénération naturelle. L'espèce se régénère bien, principalement à partir de marcottes issues de l'enracinement des branches basses, essentiellement à partir des petites tiges en place, au moment de la coupe par exemple (Gagnon et al. 2004). Ces peuplements sont donc constitués d'épinette d'origine végétative, ayant subi une période de suppression plus ou moins longue (Lussier 1991).

Des études dans la région de la Côte-Nord ont permis de constater qu'au cours des 300 dernières années, le cycle de feu a été de 295 ans (Cyr et al. 2007; De Grandpré et al. 2008). Avec un cycle de 295 ans, on s'attend à ce que près de 63% de peuplements aient plus de 150 ans (ayant dépassé l'âge de bris) et aient atteint le statut de vieille forêt (De Grandpré et al. 2008). L'âge maximal des arbres constituant le peuplement est d'environ 200 ans, mais des âges allant jusqu'à 280 ans ont été signalés (Burns et Honkala 1990). Le régime de feux affecte donc non seulement la structure d'âge, mais également la disposition des peuplements, jeunes, matures ou âgés dans le paysage (Chabot et al. 2009).

Si l'absence de feu se prolonge, une dynamique de trouées va se mettre en place (Belleau et Légaré 2008). Or, le patron de croissance varie de manière importante entre une cohorte d'arbres régénérés après feu et une autre régénérée dans des trouées naturelles créées dans un peuplement n'ayant pas subi l'influence du feu pendant une longue période. En effet, dans le premier cas, les arbres devraient bénéficier de conditions favorables à une croissance initiale rapide jusqu'à ce que la compétition entre les arbres s'installe et que la croissance radiale ralentisse fortement. Au contraire, dans le deuxième cas, un arbre aura typiquement une croissance lente attribuable à sa position inférieure dans le couvert forestier. Par la suite, la présence de trouées pourrait faire en sorte d'augmenter la croissance des individus qui se sont élevés dans le couvert forestier. D'après Larson et al. (2001), ce changement dans le patron de croissance devrait affecter les propriétés du bois. Pamerleau-Couture et al. (2019) ont détecté des différences dans les propriétés du bois d'épinette noire entre les parcelles équennes et inéquennes, c'est-à-dire dans les peuplements à croissance rapide et à croissance plus lente, respectivement. Pourtant ils n'ont détecté aucun changement dans la masse volumique moyenne des cernes, en raison de changements dans la masse volumique

du bois initial et du bois final qui ont abouti à des cernes plus hétérogènes dans les parcelles équiennoises. Même si la masse volumique moyenne était la même, ils ont observé une hétérogénéité plus élevée à l'intérieur du cerne, notamment une plus grande différence ou un plus grand contraste de masse volumique entre le bois initial et le bois final. Torquato et al. (2014), dans des études similaires ont montré que les propriétés mécaniques du bois étaient plus élevées dans les peuplements de structure régulière à croissance rapide que dans ceux de structure irrégulière à croissance lente pour un âge cambial donné.

1.3 Qualité du bois

Au cours du développement, les arbres produisent différents types de bois, souvent avec des propriétés très différentes (Zobel et Sprague 1998). La qualité du bois est un terme arbitraire qui s'applique à certaines caractéristiques du bois qui peuvent être quantifiées et analysées, puis utilisées pour évaluer un produit final (Panshin et de Zeeuw 1980; Larson et al. 2001). En général, la qualité du bois est la somme de toutes les caractéristiques et les propriétés qui affectent la performance des produits finaux (Jozsa et Middleton 1994). Cependant, les caractéristiques du bois requises pour un produit sont souvent différentes de celles demandées pour un autre. Ainsi, la qualité dans certains cas peut être mesurée en termes de masse volumique basale, d'uniformité des cernes de croissance et de proportion de bois sans nœuds, tandis que dans d'autres cas, des propriétés telles que la proportion de bois final, le rendement en cellulose et en fibre seront des indices plus importants (Shmulsky et Jones 2011). D'après Larson et al. (2001), considérant que pendant la formation du bois, de nombreux facteurs à l'intérieur et à l'extérieur de l'arbre entraînent des variations dans la taille, la forme, la structure physique et la composition chimique des tissus cellulaires. La qualité du bois doit être évaluée compte tenu de ces variations dans un but d'utilisation précis.

1.3.1 Principales sources de variation des propriétés du bois à l'intérieur de l'arbre

Un des facteurs qui complique l'étude des propriétés du bois est relié au fait qu'elles peuvent varier selon certains éléments qui s'expriment à des échelles fort différentes. Comme décrit précédemment, certaines sources de variation peuvent ainsi s'exprimer aux échelles de la

région, du peuplement ou des arbres. Or, les propriétés du bois varient aussi à l'intérieur d'un arbre. Les principales sources de variation qui affectent la qualité du bois s'expriment à cette échelle et qui sont d'importance pour cette étude sont décrites ci-dessous.

Le bois juvénile est généralement défini comme le bois formé le plus près de la moelle, où ses caractéristiques subissent des changements rapides et progressifs dans les cernes de croissance (Zobel et Sprague 1998; Larson et al. 2001). Dans cette zone, les caractéristiques du bois sont en constante évolution, avant de devenir plus stables dans le bois mature (Kennedy 1995). Les propriétés telles que la masse volumique basale, la longueur et orientation des cellules, les caractéristiques des parois cellulaires et leur chimie changent rapidement (Panshin et de Zeeuw 1980; Zobel et Jett 1985). Le bois juvénile diffère du bois mature par le fait qu'il a une faible proportion de bois final, une masse volumique généralement plus faible, des trachéides plus courtes avec des angles des microfibrilles plus grands, et parfois une présence importante de bois de compression et une pente du fil prononcée (Larson et al. 2001). Le nombre de cernes de croissance en période juvénile varie d'arbre en arbre (Zobel et al. 1959). La taille de la zone juvénile varie alors considérablement, non seulement entre les espèces, mais aussi entre les individus au sein d'une espèce (Zobel et Sprague 1998). Larson et al. (2001) affirment que l'âge de transition généralement reconnu de 10 ans pour le pin à encens (*Pinus taeda* L.) semble être une moyenne acceptable pour la plupart des usages. Cependant, pour Zobel et Sprague (1998), il n'est pas possible de déterminer la ligne exacte de démarcation entre le bois juvénile et le bois mature en raison de la transition progressive entre les deux classes de bois. Pour l'épinette noire, Koubaa et al. (2005) signalent que la période de transition du bois juvénile dépend du taux de croissance et que l'âge de transition doit donc être défini plus précisément en fonction de processus biologiques. La notion de bois juvénile démontre donc que l'âge du cerne (l'âge cambial) est un paramètre très important pour évaluer la qualité des arbres. La structure anatomique du bois juvénile conduit à une résistance, rigidité et stabilité dimensionnelle faible par rapport au bois mature (Macdonald and Hubert 2002).

La masse volumique du bois est le critère le plus ancien et le plus largement utilisé pour évaluer la qualité du bois, notamment ses propriétés mécaniques (Larson et al. 2001). Les variations de masse volumique sont principalement dues à des différences dans la structure

anatomique du bois, qui sont déterminées par les proportions des différents types et dimensions de cellules, et en particulier de l'épaisseur de la paroi cellulaire (Heger 1974). Zhang (1998), sur 348 arbres d'épinette noire, a constaté qu'avec l'augmentation de l'âge cambial, la largeur et la masse volumique des cernes ont tendance à présenter une variation constante d'arbre en arbre. Par ailleurs, les cernes de croissance du même âge à partir de la moelle, mais avec différentes largeurs diffèrent généralement en masse volumique (Larson et al. 2001).

La forme et la structure des trachéides sont très importantes pour déterminer la qualité du bois. En modifiant la structure des trachéides, des changements significatifs peuvent être réalisés dans la qualité du bois et ses propriétés structurales (Larson et al. 2001). Selon Macdonald et Hubert (2002), par exemple, les variations de la longueur des trachéides ne devraient pas avoir d'impact sur le bois de sciage, bien que les trachéides plus courtes soient associées à des angles de microfibrilles élevés, ce qui réduit la résistance, la rigidité et la stabilité dimensionnelle du bois. Les trachéides pour l'épinette noire font en moyenne 3,5 mm (entre 3,0 et 4,5 mm) de long et entre 25 et 30 μm de diamètre (Zhang et Koubaa 2009). Dans le bois juvénile, la longueur des trachéides est souvent plus courte au sommet de l'arbre par rapport à la longueur à la base (Zobel et Sprague 1998).

L'angle des microfibrilles (AMF) est généralement défini comme l'inclinaison des microfibrilles dans la paroi par rapport au grand axe de la cellule dans la couche S2 (Guitard et Gachet 2004), celle qui est prédominante dans la paroi cellulaire des trachéides. Il est un des principaux éléments affectant la performance du bois massif en raison de sa forte influence sur la rigidité, la résistance mécanique, les propriétés de retrait et la stabilité dimensionnelle du bois (Cave and Walker 1994; Alteyrac et al. 2006; Shmulsky et Jones 2011; Auty et al. 2013). L'angle des microfibrilles varie avec le taux de croissance et montre une forte corrélation avec le retrait longitudinal (Larson et al. 2001). Le bois dont les fibres ou trachéides ont des angles de microfibrilles élevés est susceptible de se déformer, de fendre et tordre durant le séchage et lors de son utilisation (Macdonald and Hubert 2002). Alteyrac et al. (2006) ont montré que l'AMF et le MOE présentaient une forte corrélation négative chez l'épinette noire. Selon Macdonald and Hubert (2002), à mesure que l'AMF diminue, la

paroi cellulaire devient plus rigide et ce comportement se reflète sur la rigidité du bois de charpente et offre aussi une meilleure stabilité dimensionnelle lors du séchage du bois.

Le bois de compression, ou bois de réaction se trouve sur les côtés inférieurs des tiges de conifères inclinées, sur le dessous des branches et en dessous du niveau d'insertion des branches sur une tige (Larson et al. 2001). Le bois de compression est associé à des trachéides plus courtes et plus larges et à un angle de microfibrilles plus élevé, ce qui est généralement associé à une valeur inférieure de retrait tangentiel et radial (Timell 1986). De plus, la caractéristique physique la plus évidente du bois de compression est l'augmentation de la masse volumique par rapport à celle du bois normal (Panshin et de Zeeuw 1980; Gryc et al. 2007). La présence de bois de compression peut entraîner une rupture soudaine des pièces de bois lorsque soumises à une contrainte de flexion. De plus, le retrait longitudinal, dû à cet AMF élevé, provoque une mauvaise stabilité dimensionnelle lors du séchage (Macdonald and Hubert 2002). Gryc et al. (2007) ont réalisé une étude visant à déterminer la variabilité du gonflement du bois d'épicéa (*Picea abies* [L.] Karst.) en présence de bois de compression. Les résultats ont montré que le gonflement du bois de compression était plus faible dans le plan transversal (dans les axes radial et tangentiel) et plus élevé dans l'axe longitudinal. L'explication de ce comportement, selon Desch et Dinwoodie (1996), est que le bois formé dans cette zone est normalement plus fort et plus rigide en compression longitudinale, car la rigidité du bois est nécessairement liée au retrait. Cependant, ils affirment que ce bois est beaucoup plus faible en traction que le bois normal en raison, en partie, de la teneur en lignine plus élevée des parois cellulaires du bois de compression et de l'AMF plus élevé.

Finalement, à une échelle plus large, il faut aussi prendre en considération la présence des branches et des nœuds. La présence de nœuds, surtout s'ils sont pourris ou non adhérents, déprécie la valeur d'une pièce de bois (Doucet et al. 2009). La longévité de la branche, et sa dimension peuvent être contrôlées dans une large mesure par la densité du peuplement. Ainsi, un espacement initial étroit restreint la croissance des branches et favorise une mortalité précoce, alors qu'un espacement initial large encourage la production de grosses branches (Larson et al. 2001). Des propriétés mécaniques pourront être réduites par la présence de nœuds, puisque ceux-ci représentent une discontinuité dans le fil du bois et peuvent ainsi causer des concentrations de contraintes (Calil et al. 2003). Lemieux et al. (2001) ont

caractérisé la nodosité des arbres de peuplements naturels d'épinette noire et leurs résultats montrent qu'il y avait un plus grand nombre de nœuds sur le côté sud des troncs que sur le côté nord, mais que leurs diamètres étaient en moyenne plus petits sur le côté sud.

Il existe en fait bien d'autres facteurs, comme la pente du fil, la conicité ou défilement de la tige, la présence d'extractibles ou même la couleur, pouvant être considérés comme déterminants de la qualité du bois et pouvant varier à différents niveaux (Larson et al. 2001). Ces éléments renforcent l'idée selon laquelle il faut bien connaître le bois depuis ses origines, c'est-à-dire qu'il est nécessaire de bien maîtriser les facteurs influençant son développement et qui peuvent affecter ses propriétés. L'étude de la qualité du bois doit donc débuter par une identification des variables pertinentes.

1.3.2 Principales propriétés physiques et mécaniques de la qualité du bois

L'évaluation du comportement des composants en bois soumis à des charges environnementales nécessite que les performances hygroscopiques et mécaniques du bois soient considérées de manière conjointe (Derome et al. 2013). Les propriétés de résistance et de rigidité d'un matériau sont généralement les caractéristiques les plus importantes pour les applications structurelles des produits de bois (Shmulsky et Jones 2011). Les changements dimensionnels doivent également être pris en compte, car ces altérations affectent considérablement le bois lors de la transformation ainsi qu'en tant que produit (Zhang et al. 1994). Il est bien connu que les propriétés mécaniques et la stabilité dimensionnelle de tout produit à base de bois sont affectées par la quantité d'eau présente, principalement celle sous forme hygroscopique (Shmulsky et Jones 2011).

Le bois, comme tout autre matériau, peut être soumis à des efforts de traction, flexion, compression, cisaillement et torsion (Beaudoin et al. 2009). La résistance à la rupture indique la capacité maximale d'un matériau à supporter des charges ou des forces appliquées. La rigidité ou la résistance à la déformation, détermine la capacité du matériau à être comprimé, étiré, plié, c'est-à-dire déformé par une charge appliquée (Shmulsky et Jones 2011). Lors de la sollicitation d'une pièce en flexion statique, ces deux propriétés mécaniques sont évaluées au moyen du module de rupture (MOR) et du module d'élasticité (MOE). Ces deux paramètres évalués en flexion sont très importants pour la caractérisation technologique du

bois, parce qu'ils évaluent le comportement mécanique d'une charge appliquée perpendiculairement à l'axe longitudinal de la pièce (Scanavaca et Garcia 2004). Les MOR et MOE ont souvent une bonne corrélation avec la masse volumique du bois (Larson et al. 2001). Par contre, pour le bois juvénile, ces deux modules sont plus affectés par l'angle des microfibrilles des trachéides que par la masse volumique. Un autre facteur d'influence sur les propriétés mécaniques est la teneur en humidité du bois, son effet étant principalement important au-dessous du point de saturation des fibres.

Chez les matériaux hygroscopiques, le comportement à la sorption d'humidité, soit le retrait et le gonflement, sont des propriétés et des caractéristiques de qualité très importantes, car elles déterminent la stabilité des dimensions et de la forme que les pièces et éléments de charpentes auront durant leur utilisation (Noack et al. 1973). La différence entre les retraits radial et tangentiel provoque des changements dans la forme des pièces de bois. Ces déformations seront également affectées par la courbure des cernes de croissance et par la déviation du fil présente régulièrement dans les pièces de bois. Le retrait et le gonflement varient en fonction de la position radiale et axiale d'où le morceau de bois a été prélevé (Scanavaca et Garcia 2004). Selon Larson et al. (2001) le retrait est dû à plusieurs facteurs interdépendants mais est essentiellement provoqué par l'élimination de l'humidité hygroscopique entre les microfibrilles de cellulose.

1.3.2.1 Effets de la masse volumique du bois sur les propriétés physico-mécaniques

La masse volumique agit comme un déterminant majeur de la qualité du bois (Zobel et Sprague 1998) et est reliée à de nombreuses propriétés du bois, notamment la résistance mécanique, la rigidité et la stabilité dimensionnelle (Koubaa et al. 2002). En général, la masse volumique du bois est distribuée différemment dans le tronc, principalement dans ses axes radial et axial, et les propriétés de retrait et mécaniques tendent à augmenter avec cette propriété. Les bois denses sont généralement plus résistants, durs et rigides que les bois légers (USDA 1999; Bowyer et al. 2007). Selon Beaudoin et al. (2009), sauf quelques exceptions, plus la masse volumique du bois est élevée, plus il est résistant mécaniquement. La plupart des aspects technologiques de cette matière première sont liés à la masse volumique, qui sert à évaluer et à classer le bois (Bowyer et al. 2007). En fait, la masse volumique est aussi l'une

des plus importantes propriétés physiques du bois. La masse volumique basale est celle la plus utilisée. Son principal avantage vient du fait que la masse anhydre et le volume à saturation sont des conditions constantes et facilement reproductibles pour un matériau comme le bois (Beaudoin et al. 2009). La masse volumique d'une pièce de bois est beaucoup affectée par les facteurs comme la structure interne du bois, la position suivant l'axe vertical de l'arbre, la distance à partir du centre de la tige ainsi que la proportion des bois initial et final (Beaudoin et al. 2009). Chez l'épinette la masse volumique du bois est généralement plus élevée dans les premiers cernes près de la moelle, soit dans la zone de bois juvénile, atteint un minimum vers 20 ans d'âge cambial, puis augmente lentement à une valeur intermédiaire (Antal et Micko 1994; Kennedy 1995; Alteyrac et al. 2005; Koubaa et al. 2005).

La masse volumique basale présente ainsi des différences entre le bois juvénile et le bois adulte (Zobel et Sprague 1998; Koubaa et al. 2002). D'après Koubaa et al. (2002), cela est lié aux variations de la masse volumique et de proportion des bois initial et de bois final dans les cernes à partir de la moelle vers l'écorce. Chez le bois mature par exemple, la variation de la masse volumique des bois initial et final avec l'âge cambial est beaucoup plus faible que la variation de la proportion de bois final (Koubaa et al. 2002). Cela peut expliquer, du moins partiellement, la variation radiale de cette propriété pour l'épinette noire (Panshin et de Zeeuw 1980). Chez le bois juvénile, la résistance et la rigidité du bois seront affectées par un effet combiné d'une faible masse volumique et d'un AMF prononcé (Kennedy 1995). À partir des études des propriétés de résistance de certaines espèces de pins de plantation, Kennedy (1995) a conclu que la résistance et la rigidité du bois juvénile sont significativement plus faibles que celles du bois adulte. Toutefois, ces différences ne peuvent pas être seulement expliquées par les différences de masse volumique. De plus, chez l'épinette, Kennedy (1995) a montré que la zone près de la moelle, où la masse volumique du bois est plus élevée, serait lié au bois de compression. Pour un bois montrant ces caractéristiques, on peut s'attendre à ce que le lien entre la masse volumique et les propriétés mécaniques ne soit pas observé.

La masse volumique et la teneur en humidité du bois sont donc deux facteurs étroitement liés aux propriétés mécaniques et aux variations dimensionnelles (USDA 1999). La variation de l'humidité relative (HR) de l'air cause des changements dans les dimensions du bois lorsque

sa teneur en humidité est en dessous du point de saturation des fibres (PSF) (Hernández 2007a). La relation entre la masse volumique, la teneur en humidité, le gonflement et retrait sont ainsi d'un grand intérêt pour l'utilisation du bois (Rezende et al. 1995). De façon générale, plus la masse volumique du bois est élevée, plus les variations de dimension sont accentuées pour un même changement d'humidité (Jankowsky 1979; Hernández 2007a). Ces variations dans les dimensions du bois vont définir la stabilité dimensionnelle du matériau. Néanmoins, un bois qui présente un grand retrait total (de l'état vert vers la condition anhydre) peut être encore considéré comme un bois dimensionnement stable. En effet, considérant un bois donné et ses caractéristiques, ceci peut avoir un retrait total élevé et, pourtant, le changement dimensionnel entre deux conditions hygrothermiques peut être relativement faible (Hernández 2007a). Il est donc nécessaire d'évaluer le comportement dimensionnel du bois dans des conditions hygroscopiques stables ou à travers des critères prenant en compte des intervalles d'humidité relative où le bois sera exposé lors de son utilisation, par exemple, l'intervalle de 6 - 18% pour application structurelle.

1.3.2.2 Variations radiale et longitudinale des propriétés physico-mécaniques

Les propriétés physico-mécaniques du bois progressent en fonction de l'âge cambial et de la hauteur dans l'arbre (Park et al. 2009). Elles varient systématiquement de la moelle à l'écorce ainsi qu'au long de la tige (Auty et Achim 2008; Xiang et al. 2014). Chez la plupart des conifères, la relation entre la position radiale (ou l'âge cambial) et la masse volumique a été employée pour décrire les profils de sa variation (Kennedy 1995). Les relations décrites suivent souvent des tendances non linéaires pour lesquelles on observe une progression rapide près de la moelle (bois juvénile) suivie d'une zone où les propriétés restent plutôt constantes (Torquato et al. 2014; Auty et al. 2016). L'âge cambial a ainsi un effet sur les propriétés du bois et peut être décisif pour son utilisation (Scanavaca et Garcia 2004). La détermination de la transition de l'âge du bois juvénile au bois adulte a été largement étudiée en raison de son impact sur la qualité du bois (Alteyrac et al. 2005; Koubaa et al. 2005). En général, à mesure que l'âge cambial augmente, la longueur des trachéides, l'épaisseur des parois cellulaires, la teneur en matières extractibles et la masse volumique basale aussi augmentent (Harris 1970; Scanavaca et Garcia 2004). Ces relations auront un impact sur les propriétés physiques et mécaniques et, par conséquent, sur la qualité du bois. Pour ces

raisons, l'âge cambial est souvent utilisé pour évaluer la variation des propriétés physiques et mécaniques au sein de l'arbre, comme par exemple, pour évaluer les profils de la stabilité dimensionnelle (Zhang et al. 1995; Leonardon et al. 2010; Peng et al. 2013) ou des propriétés mécaniques (Alteyrac et al. 2006; Torquato et al. 2014; Auty et al. 2016;). Selon Pokharel et al. (2014), l'âge est une bonne variable prédictive pour la modélisation forestière. Ils soulignent, cependant, que la forme de la courbe de croissance liée à l'âge varie en fonction du site et il est possible que le site ait des effets sur les propriétés du bois qui soient indépendants des effets de croissance.

1.3.2.3 Effet de la croissance radiale sur les propriétés physico-mécaniques

Le taux de croissance radiale des arbres est souvent mesuré par la largeur de cernes. L'effet de ce taux sur la qualité du bois est tel qu'il faut souvent le prendre en compte (Zobel and Van Buijtenen 1989; Zhang 1995; West 2014). La mesure de la largeur des cernes annuels de croissance aide à évaluer la vigueur des arbres, qui est un reflet de l'ensemble des conditions de croissance (Larson et al. 2001). Sur les bois des essences résineuses les cernes annuels sont marqués, délimités du cerne suivant par le contraste entre le bois final, fin et foncé, et le bois initial, plus clair et large (Zhang et Koubaa 2009). La largeur des cernes présente aussi une variation spécifique de la moelle vers l'écorce (Alteyrac et al. 2006). La variation axiale des propriétés du bois peut être largement estimée, en reconnaissant que dans les positions supérieures le bois a moins de cernes et il a donc des propriétés similaires à celles du bois préalablement formé à des niveaux inférieurs de l'arbre, c'est-à-dire similaire au bois juvénile formé en bas âge (Kennedy 1995). Ce bois est sous l'influence directe des hormones de croissance du houppier vivant, et le bois formé constitue du bois juvénile. Les différences remarquables dans les relations des propriétés physico-mécaniques du bois avec le taux de croissance semblent être étroitement liées à leurs différences dans la structure du bois (Zhang 1995).

De nombreuses études se sont penchées sur l'impact des taux de croissance sur la qualité du bois et sur la relation entre le taux de croissance et la masse volumique du bois de plusieurs espèces commerciales (Kellison 1983; Barbour et Kellogg 1990; Zhang and Jiang 1998; Alteyrac et al. 2005; Auty et al. 2018). Compte tenu des variations des conditions de

croissance, les cernes de croissance diffèrent considérablement en largeur et en masse volumique entre les arbres et au sein d'un arbre, soit en hauteur, soit dans l'axe radial (Larson et al. 2001). Pamerleau-Couture et al. (2019) ont rapporté que l'augmentation de la largeur des cernes n'a eu aucun impact sur la masse volumique du bois d'épinette noire. Cela a été attribué au fait que la proportion et la masse volumique du bois initial ont diminué tandis que celles du bois final ont augmenté. Ces auteurs ont également établi que l'influence de la largeur des cernes sur les dimensions des cellules de l'épinette noire était assez limitée. Par contre, selon Koubaa et al. (2005), la croissance rapide de l'épinette noire est généralement associée à une plus faible masse volumique du bois, à une faible proportion de bois final, à un bois moins uniforme et à une forte proportion de bois juvénile. Les études d'Alteyrac et al. (2005) ont montré que la diminution de la largeur des cernes de l'épinette noire est proportionnelle à l'augmentation de leurs masses volumiques.

En ce qui concerne l'effet de la largeur des cernes sur les propriétés mécaniques, Zhang et Koubaa (2009) n'ont pas trouvé de relations entre ces propriétés pour l'épinette noire. Alteyrac et al. (2006) ont montré que la relation entre le module d'élasticité et l'angle des microfibrilles ne dépend pas du taux de croissance radial pour cette espèce. Par ailleurs, d'après ces résultats, la largeur des cernes n'était pas un facteur significatif de variation des modules d'élasticité et de rupture. Ainsi, le taux de croissance n'explique pas suffisamment la variation des propriétés de flexion du bois, et donc son application pour la prédiction de la qualité mécanique du bois est très faible (Fernández Golfin et Diez 1994). Cependant, Henin et al. (2018) ont évalué l'influence du taux de croissance sur le bois de sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) à des fins structurelles. Ces derniers ont conclu que le taux de croissance affecte considérablement les valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques du bois juvénile.

La stabilité dimensionnelle peut être affectée par les différentes conditions de croissance et par ses relations avec les caractéristiques des cernes de croissance (Bannan 1965; Dutilleul et al. 1998; Larson et al. 2001). Les relations entre le retrait et la largeur des cernes ont été discutées par plusieurs auteurs (Skaar 1988; Koubaa et al. 1998). Du point de vue de la physiologie de l'arbre, Kennedy (1995) défend que l'âge des cernes régît la variation de la masse volumique de façon significative en raison de la proximité du noyau juvénile à la cime

vivante de l'arbre, qui est la source de régulation de la croissance, des hormones et des produits de la photosynthèse. Les profils de variation de la masse volumique en direction radiale sont donc le reflet de cette relation.

1.4 Des connaissances inexistantes ou mal intégrées

Plusieurs études montrent les difficultés de relier les informations empiriques existantes sur les propriétés du bois, ou la difficulté de travailler avec l'absence de ces informations (Zhang et al. 1995; Mailly et Gaudreault 2005; Liu et al. 2007; St-Germain et Krause 2008; Garet et al. 2009). D'excellentes études empiriques ont été menées sur la qualité de l'épinette noire, comme celle d'Alteyrac (2006). L'auteur affirme que les relations entre les caractéristiques du bois restent nombreuses et complexes, de telle façon qu'un facteur dépendant doit être expliqué par plus d'une variable indépendante. Villeneuve et al. (1987) ont étudié la variation et les relations entre l'âge cambial et la masse volumique du bois d'épinette noire, en utilisant un modèle aléatoire d'analyse de variance. Selon ces auteurs, il serait possible de prédire la masse volumique future du bois de cette espèce aux environs de 12 à 15 ans. En revanche, leurs résultats sont non significatifs par rapport aux composantes de la variance, ce qui est dû à la taille réduite de l'échantillon (12 familles) et de la grande variance intra familiale. Singh (1986) a évalué les variations de masse volumique de six espèces, dont l'épinette noire, afin de construire un modèle pour prédire la moyenne pondérée, obtenir des gradients de masse volumique et optimiser l'utilisation des différentes parties d'un arbre. Dans son modèle, il a considéré des paramètres inconnus estimés par des coefficients de régression. Étant donné la variation qui peut exister résultant des régions et des classes de diamètre pour certaines sections de tige, il suggère de compléter les données dans de tels cas avec un échantillonnage local.

Des aspects tels que la densité du peuplement, la hauteur dominante des arbres, le volume d'un arbre et ses relations avec les variations de la croissance et des propriétés du bois ont beaucoup été étudiés depuis plusieurs années. Ils servent généralement de bases pour la construction de modèles. Par contre, les connexions de ces modèles avec la qualité du bois sont souvent limitées (Houllier et al. 1995). Le besoin évident d'un outil de gestion qui

intègre à la fois la croissance et les informations de qualité du bois a conduit à une nouvelle génération de modèles plus détaillés (Houllier et al. 1995).

De toute évidence, la croissance du bois est influencée par plusieurs facteurs et, par conséquent, ses propriétés le sont également. Cependant, il est aussi évident que les connaissances de ces facteurs d'influence et de ses relations ne sont pas encore bien maîtrisées. Des informations comme la structure des peuplements, la vitesse de croissance et les traitements sylvicoles existent, mais elles ne sont pas bien reliées à la qualité du bois. De plus, les résultats des études empiriques sont utilisés individuellement et, chaque fois qu'il y a un nouveau traitement sylvicole, par exemple, une étude doit généralement être répétée. Ainsi, lorsque l'information est présente, elle n'est souvent pas évaluée et interprétée de façon cohérente pour être utile à un aménagiste de la forêt. Il n'existe pas d'outil qui réunisse toutes ces informations pour faciliter son usage et son application par les gestionnaires.

1.4.1 La modélisation, une proposition de solution

La modélisation est un moyen par lequel on peut répondre aux problématiques énoncées dans les paragraphes précédents. C'est un outil mis à la disposition du gestionnaire pour améliorer la compréhension de la dynamique forestière et pour l'aider dans l'élaboration d'une gestion durable sur des plus grandes zones et sur des périodes plus longues (Messier et al. 2003). Par exemple, des modèles de rendement en sciage basés sur les caractéristiques des arbres obtenus à partir de mesures sur le terrain peuvent être utiles aux gestionnaires forestiers pour une variété de stratégies de gestion, telles que l'optimisation basée sur la valeur des produits issus du peuplement, par opposition à une approche uniquement basée sur le volume du peuplement (Liu et Zhang 2005). Nepveu (1996) affirme que les aménagistes et les utilisateurs de bois sont intéressés depuis longtemps à évaluer la qualité présente et future de la ressource bois. Selon lui, ces personnes utilisent souvent une approche classique pour prédire la qualité du bois: soit établir des placettes expérimentales avec les conditions d'essai (la sylviculture, les génotypes, les stations et les interactions entre eux), soit faire la recherche de telles conditions contrastées dans les forêts existantes. Toutefois, cette approche, que l'on peut qualifier d'entièrement empirique, est accompagnée d'un problème significatif, puisque l'on doit attendre la croissance des arbres à analyser.

Une approche plus moderne, telle que celle de la modélisation, peut aider à poursuivre le même objectif d'évaluer et de prédire la qualité, mais en permettant d'obtenir des réponses plus rapidement. De plus, une telle approche peut servir à mieux comprendre les processus impliqués. Des modèles de simulation permettent d'organiser la complexité de l'information et des données dans un outil cohérent d'analyse des systèmes à différentes échelles (Messier et al. 2003). En modélisation, il est possible d'exprimer l'effet de processus complexes, qui se déroulent aux échelles du peuplement, de l'arbre, de la feuille et même des cellules, sur une ou quelques variables d'intérêt (Saucier et Groot 2008). Les modèles statistiques semblent donc avantageux pour répondre aux besoins des gestionnaires de l'industrie forestière car ils fournissent des outils informatiques qui facilitent la prise de décisions (Houllier et al. 1995). C'est donc une telle approche de modélisation qui a été appliquée dans le cadre de ce projet.

1.4.1.1 La modélisation pour le bois

Le défi de la modélisation est de faire le lien entre la sylviculture et la qualité du bois au moyen des outils qui favorisent l'industrie et les gestionnaires forestiers dans la prise de décision (Nepveu 1996; Pokharel et al. 2014). Les modèles de croissance et de rendement individuels basés sur les arbres deviennent de plus en plus populaires, car ils sont capables de simuler diverses options de sylviculture et de gestion dans des peuplements ayant une structure, une composition en espèces et des antécédents de gestion divers (Pokharel et Dech 2012). En plus, une approche de modélisation statistique est un moyen utile de gérer les effets divers de la croissance des arbres, leur position le long de la tige et les caractéristiques structurelles des peuplements (voir par exemple les travaux de Leban et Haines 1999; Auty et al. 2013; Auty et al. 2016; Franceschini et al. 2018).

L'utilisation efficace de la modélisation dans l'analyse des systèmes vivants demande une connaissance approfondie des processus biologiques et écologiques, des relations entre ceux-ci par le biais de l'analyse du système, et la traduction opérationnelle de ces relations en utilisant les statistiques et les mathématiques (Messier et al. 2003). Des modèles de prédition des propriétés du bois et des fibres ont été utilisés pour estimer le potentiel d'amélioration de l'approvisionnement en bois vers les usines et pour des analyses stratégiques des ressources

potentielles en bois (Wilhelmsson et al. 2002). Selon Wilhelmsson et al. (2002), les processus à base de modèles ont plusieurs avantages, en particulier lorsqu'il faut simuler les effets des types de régimes sylvicoles, de la compétition interarbre et des changements climatiques. Par exemple, un modèle peut aider à prédire l'évolution de la croissance et de la qualité des tiges (Saucier et Groot 2008). Par contre, des résultats biaisés peuvent être obtenus si les modèles sont utilisés pour prédire des différences trop précises et détaillées entre les types de tiges et les différentes conditions du site, entre autres. Cette préoccupation doit être considérée au moins jusqu'à ce qu'une validation du modèle ait été effectuée (Wilhelmsson et al. 2002). Également, il faut considérer qu'il y aura toujours des événements imprévisibles, comme une tempête, une maladie, ou un changement climatique, qui n'auront pas été inclus dans le modèle, même si celui-ci comporte une composante stochastique (Goreaud et al. 2005). Selon Zhang et al. (1993), l'établissement d'un modèle prédictif de la variation intra-arbre de la masse volumique du bois est souhaitable pour assurer une gestion forestière efficace de la transformation du bois. Ils indiquent également qu'une meilleure compréhension de la variation intra-arbre de la masse volumique est également une base pour des études sur la variation entre les arbres et pour l'amélioration de la qualité du bois. De plus, le recours à des modèles de MOE et MOR a permis aux industries d'estimer la qualité du bois d'œuvre d'arbres individuels basée sur les caractéristiques des peuplements et des arbres à partir de l'inventaire forestier (Liu et al. 2007).

Il est reconnu que le bois est un matériau d'origine biologique, soumis à des variations de structure, ce qui cause des changements dans ses propriétés (Calil et al. 2003). Compte tenu du fait que la tige et ses produits sont le résultat de processus biologiques dynamiques, l'intégration de leurs effets dans les modèles est un moyen efficace de comprendre les différents facteurs qui déterminent la qualité du bois (Houllier et al. 1995). Fournir des outils informatiques aux gestionnaires forestiers et aux industriels du bois peut aider à prendre des décisions éclairées. Cependant, un modèle reste une représentation simplifiée d'un peuplement forestier réel, qui sera toujours plus complexe et plus riche que les résultats de simulation (Goreaud et al. 2005). Ces derniers auteurs conseillent donc que les résultats des simulations des modèles forestiers doivent être vus comme des compléments à l'expertise et à la connaissance des forestiers, et n'ont pas comme but de les remplacer.

1.4.2 Modèles linéaires et non linéaires mixtes comme approches statistiques

Les procédures de régression par la méthode des moindres carrés sont les plus couramment utilisées pour ajuster des modèles de qualité du bois à l'échelle d'un arbre ou d'un peuplement. Selon Liu et Zhang (2005) ces méthodes classiques sont souvent basées sur certaines hypothèses concernant la distribution des données, telles que la normalité, l'interdépendance des données, et la variance homogène. Ces derniers affirment que certaines hypothèses sont souvent violées telles que la présence de multi colinéarité entre les données et le traitement de valeurs extrêmes.

Les modèles linéaires et non linéaires mixtes sont utilisés avec des données groupées et servent à décrire une variable dépendante en fonction de covariables, en tenant compte de la corrélation entre les observations dans le même groupe (Pinheiro et Bates 2000). L'effet aléatoire est utilisé pour représenter la dépendance au sein des groupes, à la fois dans le modèle linéaire mixte (*lme*) et le modèle non linéaire mixte (*nlme*). La modélisation non linéaire à effets mixtes peut être utilisée pour estimer les effets de ces processus au niveau de la population tout en modélisant également la variation individuelle entre les sujets (par exemple : bille dans l'arbre, l'arbre dans placette). Les hypothèses sur les effets aléatoires et les erreurs au sein du groupe sont identiques dans les deux modèles.

Leban et Haines (1999) ont appliqué une modélisation linéaire dans une étude du MOE d'espèces hybrides à croissance rapide et ont justifié ce choix par sa facilité d'utilisation. Toutefois, ce type de modèle présente une grande incertitude quant à l'extrapolation au-delà de la portée des données utilisée pour le produire. Pour surmonter ce problème et afin de rendre la modélisation plus réaliste physiquement et biologiquement interprétable, ils ont proposé un modèle de croissance exponentielle qui impose un MOE égal à zéro pour l'âge cambial zéro et un MOE maximal atteignable (Leban et Haines, 1999). Une telle approche est dite non linéaire. Un modèle *nlme* est généralement plus interprétable et parcimonieux que son équivalent empirique *lme* en raison de sa plus grande flexibilité (Pinheiro et Bates 2000).

Par ailleurs, Auty et Achim (2008) confirment sur du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) que le développement d'un modèle de régression utilisant des courbes de tendance non linéaires

offre une meilleure approximation de la variation réelle des propriétés mécaniques en fonction de l'âge cambial. Les auteurs affirment que l'approche non linéaire se rapproche plus de la réalité biologique que l'approche de modélisation linéaire. Selon Pinheiro et Bates (2000) les modèles non linéaires comportant des effets mixtes permettent d'étendre la portée des modèles linéaires mixtes, en permettant à la fonction de régression de dépendre non linéairement des effets fixes et des effets aléatoires. Les prédictions obtenues à partir d'un modèle *nlme* permettent donc de s'étendre de façon plus fiable à l'extérieur de la série de données observées. Cette dernière approche a donc été privilégiée dans le cadre de cette recherche doctorale.

1.5 Objectifs de recherche

1.5.1 Objectif général

L'objectif général de ce projet fut de développer un modèle de prédiction du patron de variation de certaines propriétés physico-mécaniques du bois claire de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) à l'intérieur de la tige en utilisant des variables indépendantes simples, soit principalement la hauteur dans la tige, la largeur des cernes, l'âge cambial et la masse volumique (basale ou anhydre). Les propriétés physico-mécaniques d'intérêt furent les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) en flexion statique et les coefficients de stabilité dimensionnelle, représentés par les paramètres de coefficient différentiel de retrait (G) et le facteur de retrait m (*R-ratio* en anglais). La description de toutes les variables utilisées pour le développement des modèles est présentée au Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Liste des variables considérées pour la modélisation.

Variables réponse	Variables explicatives (Fixes)	Variables explicatives (Aléatoires)
MOE et MOR	Âge cambial	Placette (dans la région)
G_U et m (<i>R-ratio</i>)	Largeur des cernes	Arbre (dans la placette)
	Hauteur le long de la tige	Bille (dans l'arbre)
	Masse volumique basale	

L'approche proposée par ce travail de recherche est d'intégrer les données sur les principales propriétés du bois et simuler l'effet des conditions de croissances et des décisions sylvicoles, sur la distribution des propriétés physico-mécaniques à l'intérieur des tiges (en lien avec les sous objectifs présentés ci-dessous). Le défi était de construire un modèle de qualité du bois qui s'alimente des sorties d'un modèle de croissance (Figure 1.2).

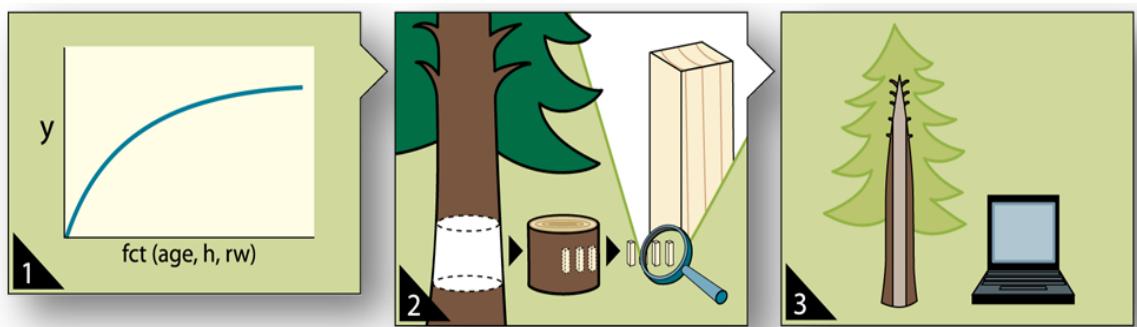


Figure 1.2 Représentation schématique de l'approche de modélisation.

1.5.2 Objectifs spécifiques

En accord avec la proposition pour le Thème 2 (Modélisation tridimensionnelle de la qualité de la tige) du projet ForêtValeur, quatre objectifs spécifiques ont été poursuivis dans ce travail de recherche, soit:

Objectif 1: Modéliser l'effet de la structure de peuplement sur les propriétés mécaniques (MOE et MOR) du bois sans défauts d'épinette noire.

Objectif 2: Modéliser l'effet de la structure du peuplement sur la stabilité dimensionnelle (G_U et $R\text{-ratio}$) du bois d'épinette noire.

Objectif 3: Évaluer les relations entre les propriétés de stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques du bois d'épinette noire en fonction de la structure du peuplement.

Objectif 4: Examiner l'effet de la masse volumique du bois (basale ou anhydre) sur les propriétés physico-mécaniques. Bien qu'il soit reconnu qu'une relation existe entre la masse volumique basale et les propriétés physico-mécaniques, celle-ci devrait être plus faible dans la zone de bois juvénile et en présence de bois de réaction.

Chapitre 2 Matériel et méthodes

2.1 Régions étudiées

Le bois d'épinette noire a été sélectionné pour répondre aux objectifs du projet. Le matériel d'étude provient de peuplements réguliers et irréguliers (équienne et inéquienne) représentant différents âges et plusieurs classes de densité de peuplement. Cette variation devrait affecter le taux de croissance des arbres et, probablement, les propriétés du bois. Les arbres ont été prélevés dans des peuplements naturels, régénérés par le feu et sans avoir subi un autre traitement sylvicole connu. Ils provenaient de différentes localisations dans la province de Québec, plus particulièrement sur les territoires de la Côte-Nord, de l'Abitibi et du Lac-St-Jean, présentant ainsi des différences importantes en termes d'âge, de diamètre et de hauteur.

La zone d'étude principale est localisée dans la région administrative de la Côte-Nord, dans l'est de la province de Québec. Les sites d'échantillonnage ont été identifiés à l'aide d'une cartographie de la distribution de placettes d'échantillonnage permanentes déjà caractérisée dans la région (Bouchard et al. 2008). La zone d'étude couvre 66 467 km² et s'étend au long du fleuve Saint-Laurent. Les forêts de la région sont dominées par l'épinette noire et le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), avec des composantes relativement mineures de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et de bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) (Garet et al. 2009).

2.2 Structure du plan d'expérience

Les échantillons prélevés sur le territoire de la Côte-Nord ont visé des peuplements de structure fortement hétérogène, soit avec des taux de croissance radiale très variables. Des arbres ont été échantillonnés à partir de deux emplacements distincts, soit au sud (49° 42'N, 68° 51'W) près de Baie-Comeau et au nord (50° 57'N, 68° 50'W), à proximité du réservoir Manic-5. Ces emplacements forment des chronoséquences après-feux représentant deux structures de peuplement distinctes. À partir des cartes d'historique des passages de feu établies à partir des données d'archives (Bouchard et al. 2008), le temps écoulé depuis le dernier feu (*time since the last fire - TSF*) a été déterminé pour des placettes situées à ces emplacements (Figure 2.1). Pour représenter une structure régulière et une structure

irrégulière, les sites d'échantillonnage ont été stratifiés en deux classes TSF: TSF <150 ans (peuplements réguliers) et TSF> 200 ans (peuplements irréguliers). Six placettes (trois au nord et trois au sud) pour chaque classe TSF ont été initialement sélectionnées. Cependant, une étude ultérieure a révélé qu'une placette de peuplement irrégulier avait été mal classée (Barrette et al. 2013). L'échantillonnage a donc finalement comporté 5 placettes de peuplements irréguliers et 7 placettes de peuplements réguliers. Cinq arbres ont été sélectionnés par placette pour un total de 60 (Figure 2.2).

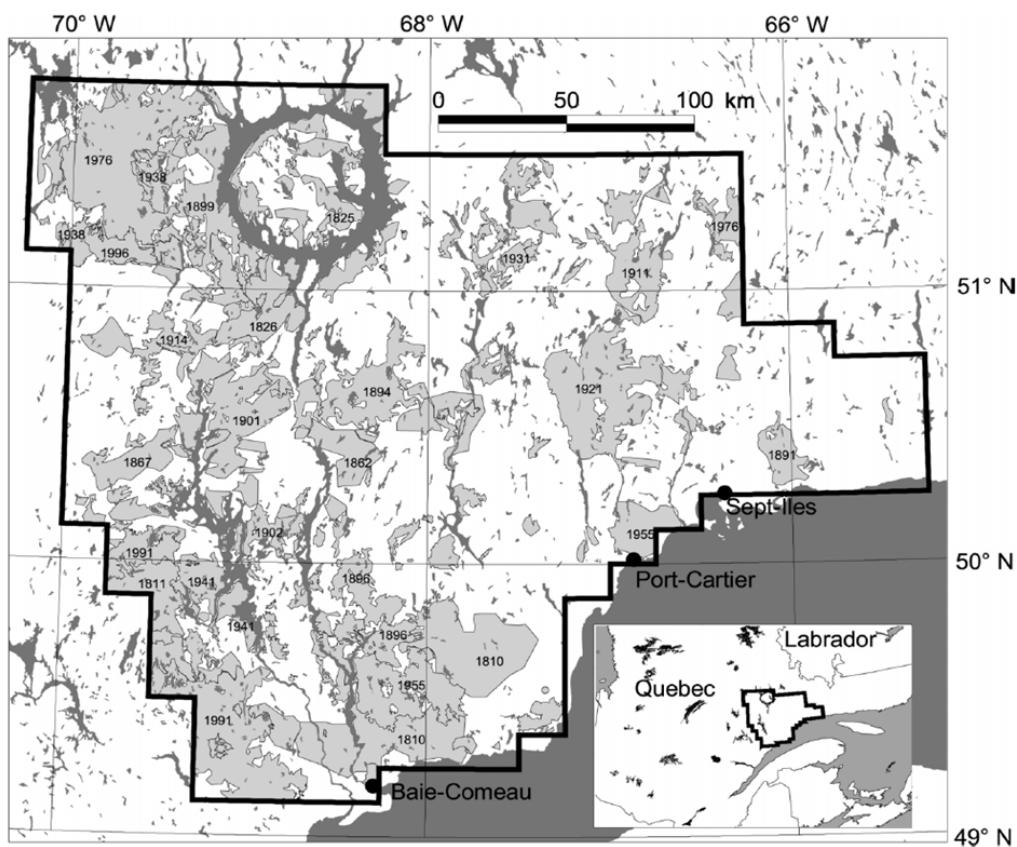


Figure 2.1 Région d'échantillonnage dans la forêt boréale sur la côte nord de Québec, indiquant le temps écoulé depuis le dernier feu (adaptée de Bouchard et al. 2008).

Les zones d'échantillonnage dans les peuplements ont été sélectionnées en localisant d'abord le centre des placettes permanentes précédemment marquées par Barrette et al. (2013). Une nouvelle parcelle de 400 m^2 (11,28 m de rayon) a été établie pour un échantillonnage destructif, qui était située à 50 m du centre des placettes permanentes, vers une direction choisie au hasard. La diversité de la taille des arbres pour les placettes a été estimée en calculant l'indice de régularité de Shannon (Lexerød et Eid 2006). Cet indice décrit la

répartition de la surface terrière basale de la placette dans la gamme des classes de diamètre des arbres.

Par ailleurs, des échantillons supplémentaires ont été obtenus à partir de deux autres études menées au Québec: une dans la région de l'Abitibi, échantillonnée en 2001, et l'autre menée en 2009 dans la région du Lac Saint-Jean (Figure 3.1). La première comportait une étude sur les propriétés mécaniques du bois d'œuvre d'épinette noire (Liu et al. 2007) et la seconde a analysé les caractéristiques du houppier des épinettes noire et blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) (Power et al. 2012). Six placettes ont été échantillonnées dans la région de l'Abitibi et neuf au Lac-Saint-Jean, pour un grand total de 27 placettes dans l'ensemble de l'étude. Tous les peuplements de l'Abitibi et du Lac-St-Jean étaient équiennes, régénérés naturellement et avaient moins de 120 ans. Ils étaient donc considérés comme des cohortes après-feux avec une structure régulière. Le nombre total de placettes et d'arbres étudiés dans le cadre de ce travail est décrit au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Nombre de placettes et d'arbres échantillonnés par région du Québec.

Région	Nombre de placettes		Nombre d'arbres
	Régulier	Irrégulier	
Côte Nord	7	5	60
Abitibi-Témiscaminque	6	-	30
Lac Saint-Jean	9	-	42
Total	22	5	132

Les arbres prélevés sur la Côte-Nord ont suivi le protocole d'échantillonnage initial proposé pour le projet (volets 1, 2 et 3). Une partie de cet échantillonnage était destinée à l'évaluation des variations en hauteur (2 arbres sur 5), bien qu'en gardant la priorité des analyses au DHP. Les arbres prélevés dans les régions de l'Abitibi et du Lac Saint-Jean ont été intégrés au projet initialement pour servir à la validation du modèle. Les échantillons dans ces deux régions n'ont été prélevés qu'à 1.3 m de hauteur. Enfin, avec l'avancement des simulations, il a été observé que les données déjà mesurées pouvaient être intégrées dans l'ensemble des analyses (volet 1). Cela serait plus représentatif en matière d'effectifs dans l'ensemble de résultats.

Cependant, cette décision a été révisée, et la continuité des analyses (volets 2 et 3) n'a été faite qu'avec des échantillons de la côte nord afin de standardiser le nombre d'échantillons à comparer entre peuplements régulier et irrégulier.

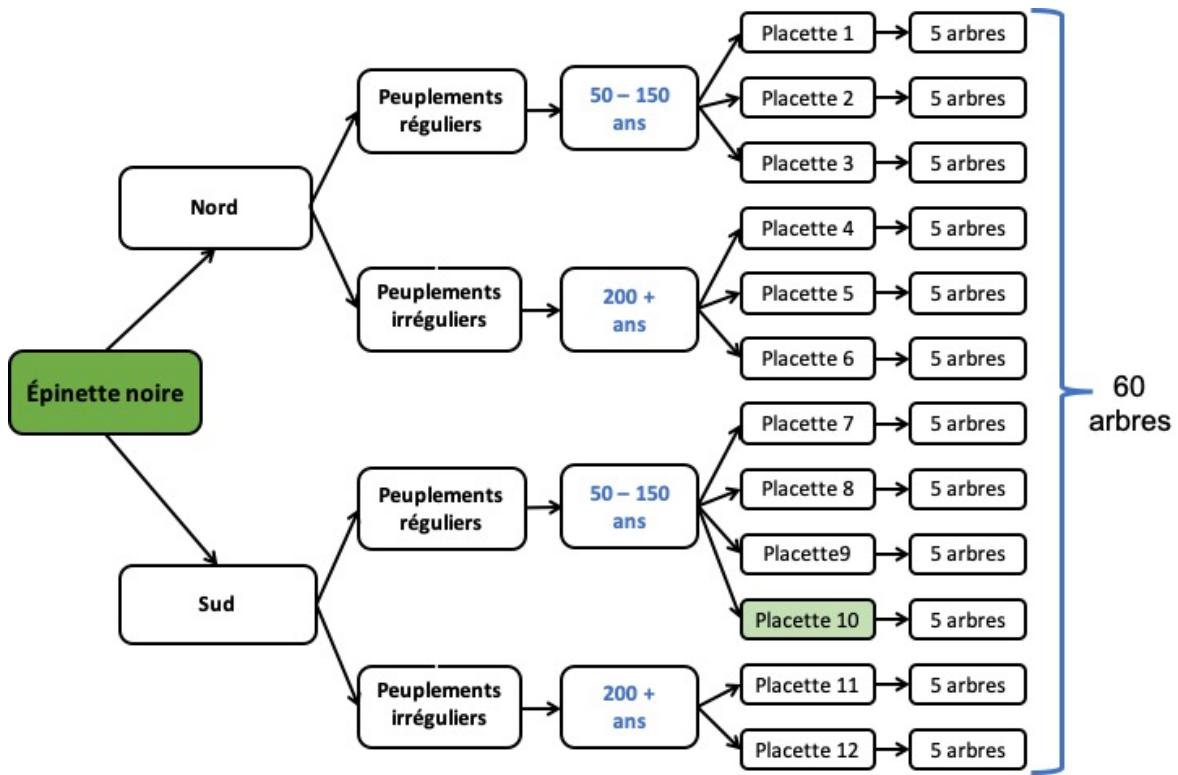


Figure 2.2 Plan d'échantillonnage dans le terrain de toute la région de la Côte-Nord. La placette 10 a été initialement classée comme peuplement irrégulier.

2.2.1 Structure de l'échantillonnage sur terrain

Pour toutes les placettes, le diamètre à la hauteur de la poitrine (DHP), à 1,3 m au-dessus du sol, a été mesuré pour tous les arbres vivants d'épinette noire. Ensuite, tous ceux de taille commerciale ($DHP > 9 \text{ cm}$) ont été regroupés en quartiles selon leur diamètre. Les arbres échantillonnés ont été sélectionnés au hasard dans chaque quartile par classe représentant leur statut social au sein du peuplement, soit un dans le premier quartile (dominants), deux dans le deuxième quartile (co-dominants) et deux dans le troisième quartile (intermédiaires). L'échantillonnage stratifié a assuré une large gamme de tailles d'arbres dans l'ensemble de données de l'échantillon, tout en évitant les arbres supprimés. Chaque arbre a été identifié de sorte que ses données dendrométriques étaient facilement liées à celles des échantillons au

laboratoire (Figure 2.3). Les arbres avec des tiges fourchues, des défauts de tige importants ou des cimes endommagées ont également été évités. La stratégie d'échantillonnage a différé dans la région du Lac-Saint-Jean, où un à six arbres par classe de DHP a été récolté par placette.



Figure 2.3 Abattage d'arbres et identification des billes.

2.2.2 Préparation des billes

Des lignes verticales ont été tracées sur chaque arbre pour indiquer la direction cardinale ouest avant l'abattage. Une fois l'arbre abattu, un billot de 50 cm de long a été coupé à 1,3 m du sol. Sur deux arbres par placette des sites de la Côte-Nord, des billots ont également été prélevés à 4 m, 7 m et à la base de la cime vivante, ce qui a donné un total de 24 arbres avec des billes échantillonnées à quatre hauteurs (Figure 2.4). Les positions d'échantillonnage ont été ajustées pour éviter les verticilles des branches et autres défauts. Les billots ont été transportés au Centre de recherche sur les matériaux renouvelables (CRMR) de l'Université Laval et stockés dans un congélateur avant d'être traités.

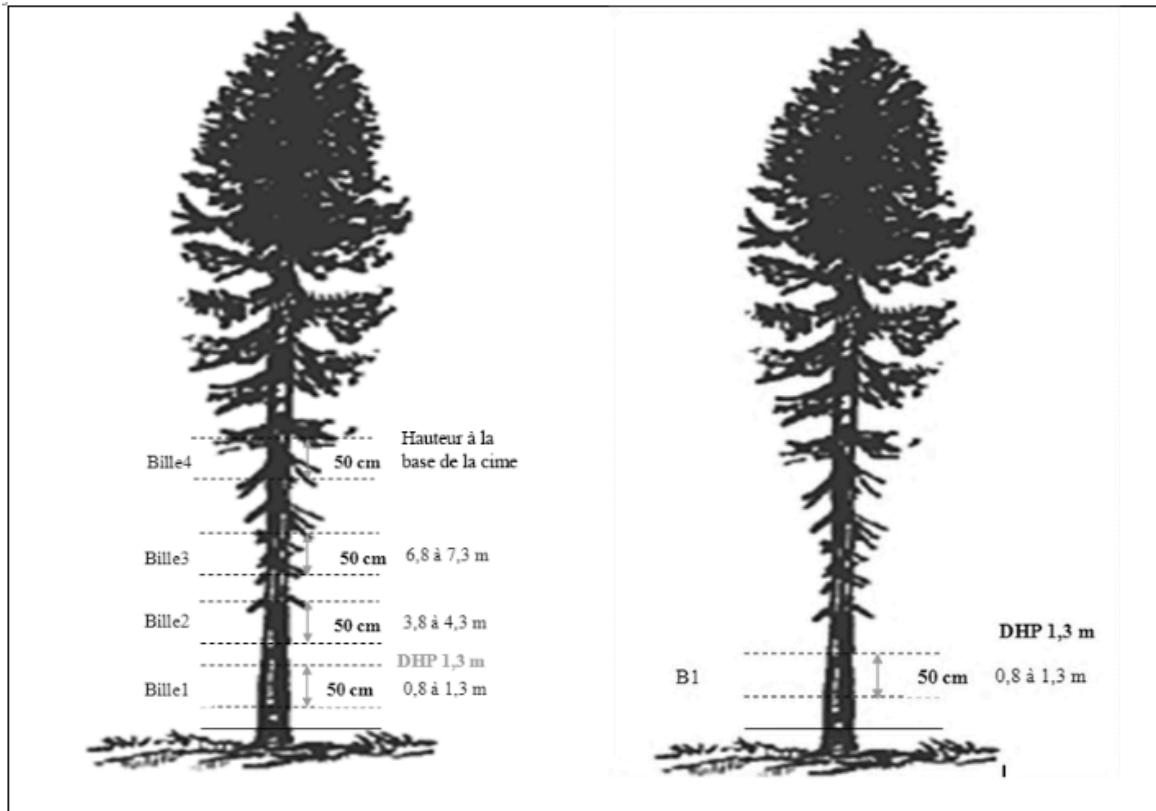


Figure 2.4 Positions de coupe des billes dans la tige pour les arbres de la Côte Nord (gauche = échantillonnages à 4 hauteurs, droite = échantillonnage au DHP).

2.2.3 Préparation des échantillons pour les essais de laboratoire

Les billots ont d'abord été coupés sur quartier, en direction est-ouest, en planches de 30 mm d'épaisseur en incluant la moelle (Figure 2.5). Les planches ont été ensuite placées dans une chambre de conditionnement à 20°C et 65% d'humidité relative jusqu'à ce qu'elles atteignent une teneur en humidité nominale constante de 12%. Un suivi de la masse des planches dans le temps a été fait pour s'assurer de l'obtention de leur teneur en humidité d'équilibre. Après conditionnement, les bouts des planches ont été poncés au grain 100 afin de mieux visualiser les cernes. Leurs deux faces transversales ont été scannées pour analyser les images avec le logiciel de dendrochronologie WinDendroTM LA 1600 (Regent Instruments Inc., Quebec, Canada). La largeur du cerne (RW, en mm) et sa distance (au centre du cerne) par rapport à la moelle (RD, en mm) ont été mesurées. Le nombre de cernes de croissance a été compté et identifié manuellement à chaque extrémité des planches afin que l'âge cambial des échantillons puisse être déterminé après la coupe. L'identification des cernes a alors été faite

de la moelle vers l'écorce à chaque 5 anneaux tel qui est montré à la Figure 2.6. L'âge cambial et la largeur du cerne par planche ont été calculés comme la moyenne des valeurs enregistrées aux deux extrémités des planches.



Figure 2.5 Découpage des planches sur quartier à 30 mm d'épaisseur.

Les planches ont ensuite servi à fabriquer les échantillons pour les essais de flexion et de retrait. Elles ont alors été délinéées pour obtenir des baguettes bien orientées dans les directions radiale (R) et tangentielle (T) ainsi que suivant le fil (L). Plusieurs baguettes de 10 mm (R) par 10 mm (T) et 205 mm (L) suivant le fil ont ainsi été obtenues à partir de la moelle vers l'écorce (Figure 2.7). La largeur moyenne des cernes (RW) de chaque échantillon a été calculée en divisant sa dimension radiale par le nombre de cernes complets. Un soin particulier a été pris pour bien identifier les cernes de croissance pour tenir compte des pertes dues au trait de scie et au rabotage des baguettes. Les défauts tels que les nœuds, la pourriture, les trous d'insectes, le bois de compression, les déviations du fil localisées ont été évités.

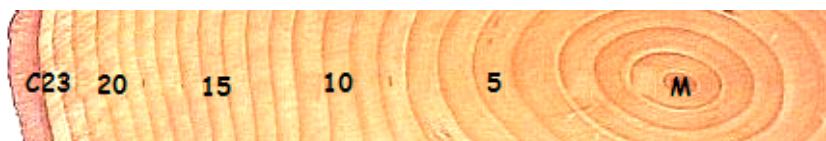


Figure 2.6 Identification des cernes sur la planche (M = moelle).

Chaque baguette a été éboutée pour obtenir un échantillon de 40 mm de longueur pour les mesures des propriétés physiques et une autre de 160 mm pour l'essai de flexion statique (Figure 2.7 et Figure 2.8). Le cerne annuel situé au centre de la section transversale de l'échantillon a servi pour assigner l'âge cambial (CA) de celui-ci. La méthode couramment acceptée pour déterminer l'âge des cernes de croissance en relation à la qualité du bois, est celle de compter le nombre de cernes de croissance à partir de la moelle (Larson et al. 2001).

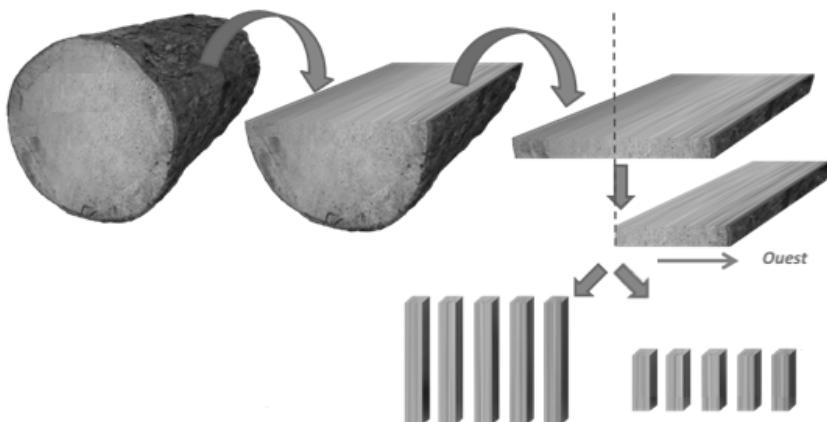


Figure 2.7 Plan de découpe des échantillons pour les essais de flexion statique et de retrait.

Certains échantillons ont présenté des défauts tels que la pourriture, le bois de compression visible (sévère) ou les nœuds et ont été retirés de l'analyse. Il s'est agi de tous les échantillons de trois arbres de la Côte-Nord et d'un arbre de l'Abitibi. Au total, 833 échantillons ont été testés, dont 588 provenant de peuplements réguliers et 245 provenant de peuplements irréguliers.

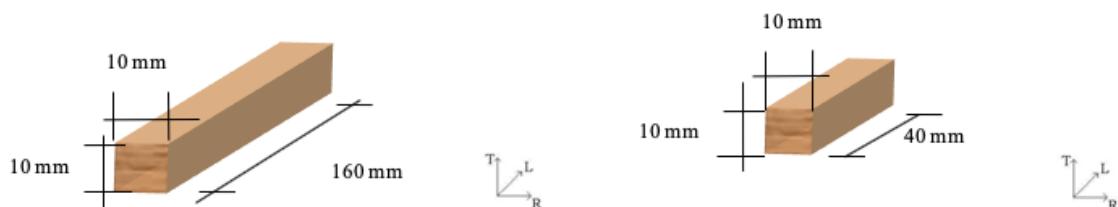


Figure 2.8 Dimensions des échantillons pour les essais mécaniques et physiques. Où: T = tangentielle, L = longitudinale, R = radiale.

2.3 Procédures d'essais

2.3.1 Essais mécaniques

Le module d'élasticité et le module de rupture ont été déterminés en flexion statique sur trois appuis suivant la norme ASTM D143-94 (ASTM 2007). L'essai fut effectué à l'aide d'un banc d'essai universel de marque MTS-QTEST/5 selon les conditions indiquées au Tableau 2.2. La charge a été appliquée sur la face tangentielle de l'échantillon plus près de la moelle (Figure 2.9). Il faut signaler que les dimensions des échantillons ont été plus petites que celles demandées par la norme. Ces dimensions furent choisies afin d'augmenter le nombre d'échantillons prélevés de la moelle vers l'écorce. Cependant, un rapport épaisseur/longueur de 1 à 4 fut conservé tel que celui préconisé par la norme pour ce type d'essai (ASTM D143-94 2007).

Tableau 2.2 Résumé des paramètres utilisés pour les essais de flexion statique.

Paramètres	Valeurs et dimensions appliquées
Teneur en humidité des échantillons (%)	12
Dimension des échantillons (mm)	10 (T) x 10 (R) x160 (L)
Portée (mm)	140
Vitesse d'essai (mm/min)	2
Diamètre des appuis et de l'élément d'application de la force (mm)	30
Cellule de charge (kN)	5



Figure 2.9 Vue du dispositif pour l'essai de flexion statique.

2.3.2 Essais des propriétés physiques

Les essais physiques ont comporté des mesures de retrait partiel et total sur des échantillons de 10 mm (T) par 10 mm (R) par 40 mm (L). Cinq conditions de teneur en humidité, de l'état saturé (vert) à l'état anhydre, ont été étudiées (étapes 2 à 6, Tableau 2.3). Les échantillons verts avaient été initialement conditionnés à 20°C et 65% HR (étape 1). Ils ont ensuite été équilibrés à des valeurs spécifiques de température et d'humidité relative pour atteindre trois teneurs en humidité nominales de 6%, 12% et 18%, successivement (étapes 2 à 4). Ils ont ensuite été immergés dans de l'eau distillée pendant 24 heures et exposés à des cycles de vide et de pression pour obtenir une teneur en humidité supérieure au point de saturation des fibres (PSF, étape 5). Enfin, les échantillons ont été séchés dans une étuve à des températures augmentant progressivement jusqu'à 103±2°C. Après cette étape, les échantillons ont été sortis de l'étuve par groupes de 20, puis refroidis dans des dessicateurs munis de pentoxyde de phosphore (P_2O_5) tout en évitant l'adsorption de vapeur d'eau avant la prise de mesures à l'état anhydre (Figure 2.10). La masse et les dimensions dans ses directions principales ont été prises pour ces cinq conditions de teneur en humidité (étapes 2 à 6). La masse a été obtenue à l'aide d'une balance à 0,001g près et le volume saturé a été déterminé par la méthode du déplacement de l'eau (à 0,001g près). Les dimensions de l'échantillon ont été prises au micromètre de 0,001 mm de précision dans les directions tangentielle, radiale et longitudinale.

Tableau 2.3 Détails des paramètres utilisés dans chaque condition de teneur en humidité.

Étape	Teneur en humidité nominale EMC (%)	Température (°C)	HR ¹ (%)	Condition d'humidité ou de sorption
1	12	20	65	État initial
2	6	30	30	Desorption
3	12	20	65	Adsorption
4	18	20	85	Adsorption
5	État saturé	20	100	Immersion dans l'eau distillée
6	0	103	0	Séchage à l'étuve

¹ Humidité relative de l'air ambiant.

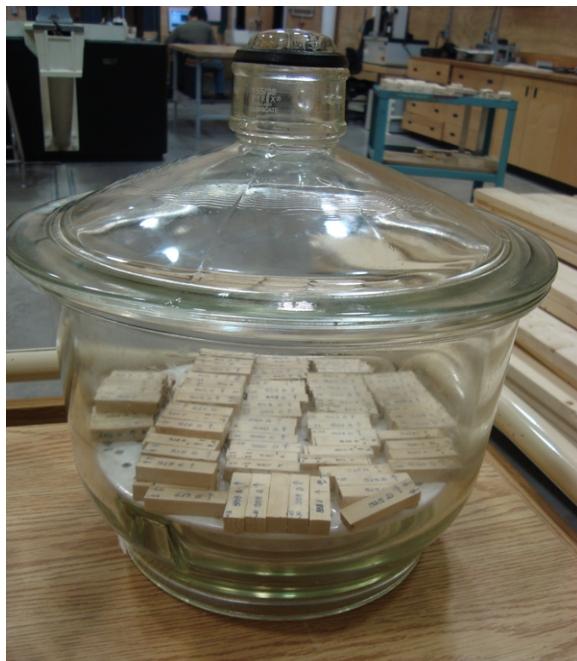


Figure 2.10 Refroidissement des échantillons anhydres pour la prise de mesure de masse et dimensions.

2.3.2.1 Teneur en humidité

La teneur en humidité d'une pièce de bois est définie comme étant la quantité d'eau (vapeur ou liquide) contenue dans celle-ci, à un moment précis, exprimée en proportion de sa masse anhydre (Beaudoin et al. 2009). Pour compléter toutes les étapes et les conditions de teneur en humidité établies dans le protocole d'essais physiques, les échantillons ont été pesés à l'état humide et séchés jusqu'à ce qu'ils présentent une masse constante. La teneur en humidité a été donc calculée par l'équation suivante:

$$[2.1] \quad H = \frac{M_h - M_o}{M_o} \times 100$$

Où : H = teneur en humidité (%)

M_h = masse à l'état humide (g)

M_o = masse à l'état anhydre (g)

La fréquence des mesures comme le temps de chaque étape pour atteindre leurs valeurs en teneur d'humidité d'équilibre, ont été déterminés en fonction de la stabilité de la masse, c'est-à-dire qu'elle devait être constante.

2.3.2.2 Détermination de la masse volumique basale et de la masse volumique anhydre

Dans le cas d'un matériel hétérogène et hygroscopique comme le bois, sa masse volumique est fonction non seulement de la dimension des cellules qui le composent et de l'épaisseur de leurs parois, mais aussi de la teneur en humidité du matériel qui influence à la fois la masse et le volume (Beaudoin et al. 2009). La masse volumique basale est définie par le rapport de la masse anhydre par le volume vert ou saturé. La masse volumique basale est alors calculée selon la formule suivante:

$$[2.2] \quad D_b = \frac{M_o}{V_s}$$

Où : D_b = masse volumique basale (g/cm³)

M_o = masse à l'état anhydre (g)

V_s = volume saturé ou vert (cm³)

La masse volumique anhydre a été calculée comme le rapport entre la masse anhydre et le volume mesuré à l'état anhydre :

$$[2.3] \quad D_o = \frac{M_o}{V_o}$$

Où : D_o = masse volumique anhydre (g/cm³)

M_o = masse à l'état anhydre (g)

V_o = volume à l'état anhydre (cm³)

L'estimation de la masse volumique d'une essence donnée doit être basée sur un grand nombre de mesures pour être valable (Beaudoin et al. 2009). À la fin des travaux, plus de 1000 petits échantillons ont été mesurés pour déterminer les masses volumiques et le retrait du bois.

2.3.2.3 Détermination du retrait du bois

Le retrait et le gonflement sont des propriétés qui confèrent au bois l'aptitude de changer de dimensions lorsque sa teneur en humidité hygroscopique varie (Beaudoin et al. 2009). Le

gonflement se produit lorsque le bois gagne de la vapeur d'eau tandis que le retrait a lieu quand il perd son humidité (Hernández 2007a). Les variations de dimensions sont fonction de l'orientation des tissus du bois. Ils diffèrent donc entre les trois axes, soit radial, tangentiel et longitudinal.

Les retraits partiels et totaux dans les directions tangentielle (β_T), radiale (β_R) et longitudinale (β_L) du bois ont été calculés en utilisant les différences de dimension des échantillons. Ces coefficients de retrait ont alors été calculés par la formule suivante:

$$[2.4] \quad \beta_{UH} = \frac{d_{US} - d_{UH}}{d_{US}} \times 100$$

Où : β_{UH} = retrait partiel, de l'état saturé jusqu'à la teneur en humidité H, suivant la direction U (%)

d_{UH} = dimension de l'échantillon à la teneur en humidité H, suivant la direction U

d_{US} = dimension de l'échantillon à l'état saturé, suivant la direction U

Pour le cas du retrait total, la formule 2.3 devient:

$$[2.5] \quad \beta_U = \frac{d_{US} - d_{Uo}}{d_{US}} \times 100$$

Où : β_U = retrait total, de l'état saturé jusqu'à la teneur en humidité H, suivant la direction U (%)

d_{US} = dimension de l'échantillon à l'état saturé, suivant la direction U

d_{Uo} = dimension de l'échantillon à l'état anhydre, suivant la direction U

Les retraits volumétriques partiel et total (β_V) ont été estimés comme la somme des trois retraits directionnels [$\beta_T + \beta_R + \beta_L - (\beta_T \times \beta_R)$]. Les retraits directionnels et en volume ont été alors déterminés à trois conditions intermédiaires d'équilibre, soit à 6%, 12%, 18% de teneurs en humidité nominales. Les échantillons ont été également amenés aux états saturé et anhydre afin de calculer le retrait total du bois et les masses volumiques. Les mesures à ces diverses

conditions ont servi à construire les courbes entre les différents coefficients de retrait en fonction de la teneur en humidité d'équilibre.

En particulier, la courbe du coefficient de retrait volumétrique en fonction de H a été utilisée pour estimer le PSF par la méthode du point d'intersection proposée par Kelsey (1956). Cette méthode définit le PSF comme la teneur en humidité du bois à laquelle la partie linéaire droite de la courbe coupe la ligne de zéro retrait (Figure 2.11). Ces courbes ont également servi pour déterminer les paramètres de la stabilité dimensionnelle du bois (Figure 2.11).

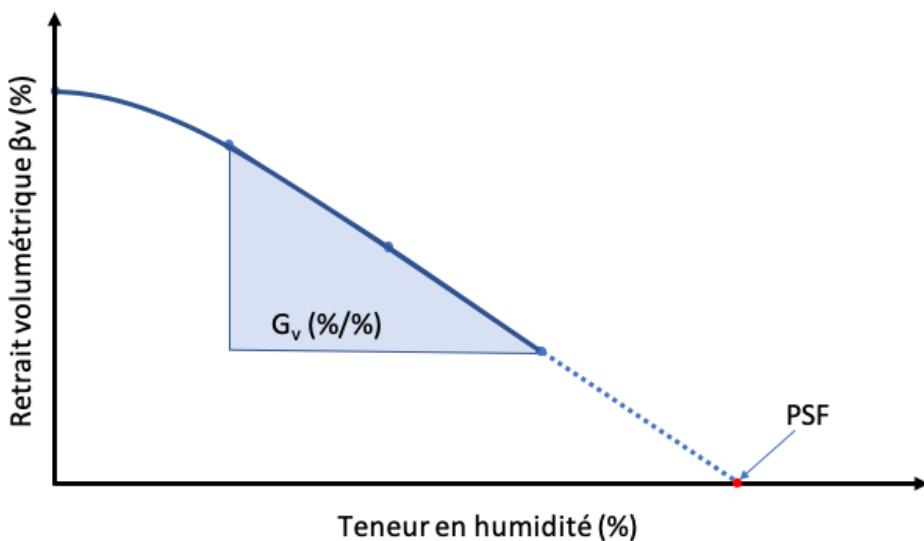


Figure 2.11 Profil de la relation entre le retrait volumétrique et la teneur en humidité d'équilibre montrant le paramètre G_v et le PSF estimé par la méthode du point d'intersection à retrait nul.

2.3.2.4 Détermination des paramètres de stabilité hygroscopique et dimensionnelle

Les paramètres de stabilité hygroscopique et dimensionnelle ont été déterminés dans un intervalle de teneur en humidité observé couramment lors des différentes applications (ou utilisations) du bois, soit entre 6% et 18% H. Afin d'obtenir ces valeurs de H, les échantillons ont été conditionnés à 30% et 85% d'humidité relative de l'air, respectivement (étapes 2 et 4 du Tableau 2.3) (Noack et al. 1973; Skaar 1988).

Le rapport de sorption (S) a été utilisé pour évaluer la stabilité hygroscopique du bois. Il est calculé à partir de la relation suivante (Noack et al. 1973; Hernández 2007b) :

$$[2.6] \quad S = \frac{\Delta H}{\Delta HR} \quad (\%/\%)$$

Ce rapport suppose une relation linéaire entre la teneur en humidité d'équilibre et l'humidité relative. On sait que les courbes complètes d'équilibre de sorption d'humidité ont plutôt une allure sigmoïde (Figure 2.12). Le rapport S doit ainsi être calculé dans des intervalles intermédiaires d'humidité relative où il y a effectivement une tendance plus linéaire entre H et HR . Ce rapport a alors été calculé entre 30% et 85% d'humidité relative de l'air. Il caractérise la sensibilité des changements de H (ou EMC en anglais) face aux changements de HR (Noack et al. 1973; Hernández 2007b).

Par ailleurs, trois paramètres ont été utilisés pour évaluer la stabilité dimensionnelle du bois. Le premier paramètre était le retrait différentiel (G_U), défini comme suit :

$$[2.7] \quad G_U = \frac{\Delta \beta_U}{\Delta H} \quad (\%/\%)$$

Ce rapport suppose également qu'il existe une relation linéaire entre la teneur en humidité H (ou EMC) et le retrait du bois. G_U représente le rapport de retrait (β_U) suivant la direction U , soient les directions tangentielle (T), radiale (R) et longitudinale (L) et en volume (V). Cela exprime ainsi le retrait en % par 1% de changement de H (Figure 2.11). Un bois dimensionnellement stable sera celui qui présente de faibles valeurs de G_U , soit de petits changements de taille dus à des changements de H (Skaar 1988; Hernández 2007b).

Le deuxième paramètre utilisé pour déterminer la stabilité dimensionnelle du bois est le facteur de retrait m (*R-ratio*). Ce facteur représente la variation du volume extérieur de bois par rapport à un changement de volume d'eau adsorbée ou désorbée (Chafe 1986; 1987). Ce paramètre s'exprime comme le rapport entre G_V et la masse volumique basale (D_b), comme suit:

$$[2.8] \quad m \text{ (R-ratio)} = \frac{G_V}{D_b} = \frac{\Delta \beta_V}{\Delta H \times D_b} \quad (\text{cm}^3 \text{ g}^{-1})$$

Le troisième critère utilisé a été la relation entre le retrait tangentiel et le retrait radial (T/R). Le rapport T/R est également utilisé pour évaluer l'anisotropie du retrait d'un bois donné (Arévalo et Hernández 2001). Les valeurs de T/R ont été calculées pour toutes les conditions de sorption d'humidité étudiées.

Finalement, l'effet du phénomène d'hystérèse de la sorption du bois a été considéré lors de l'expérience (Figure 2.12). À une humidité relative de l'air donnée, l'humidité d'équilibre varie selon que le bois a été conditionné en adsorption ou en désorption. Les conditions de sorption pour chaque étape étudiée sont indiquées au Tableau 2.3.

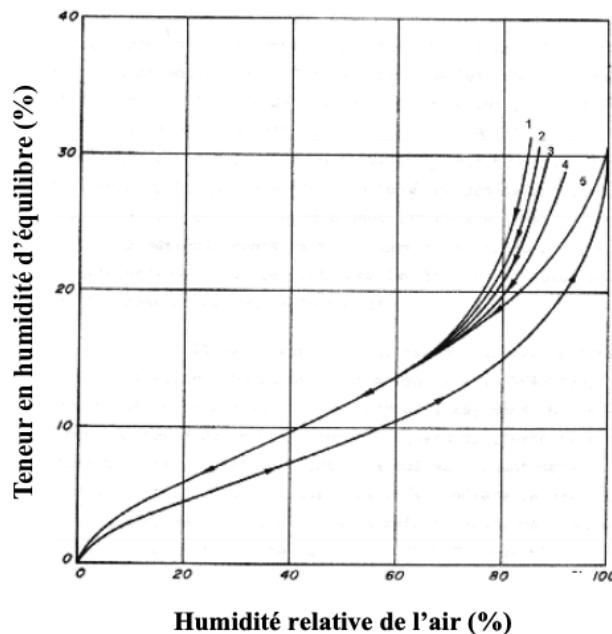


Figure 2.12 Relation entre la teneur en humidité d'équilibre et l'humidité relative obtenue en adsorption et en désorption à 21°C (adapté de Goulet 1968).

2.4 Procédures d'analyses statistiques

Une approche de modélisation non linéaire a été utilisée pour faire des simulations de la variation des propriétés physico-mécaniques (Houllier et al. 1995 ; Le Moguédec et Nepveu 2004). La modélisation contribue à développer des équations permettant de décrire l'évolution des propriétés du bois, principalement, en fonction de l'âge cambial. Les analyses ont été effectuées à l'aide de l'environnement de programmation statistique R (R Development Core Team 2013 ; 2019).

Les procédures d'analyse statistique ont été appliquées en deux étapes, à travers une structure logique de modélisation basée sur les modèles mixtes. La première étape a utilisé un modèle linéaire et a mis l'emphase sur la sélection des meilleures variables explicatives. Dans cette étape, il était important de vérifier la nécessité d'entrer différents effets aléatoires (se référer au Tableau 1.1 pour voir la liste des effets fixes et aléatoires considérés). Plusieurs modèles linéaires ont alors été analysés pour décrire la variation des propriétés par rapport à l'arbre sujet, tel que suggéré par Nepveu (1996).

La deuxième étape de l'analyse a été réalisée en utilisant un modèle non linéaire, s'il s'avérait que la meilleure corrélation entre les principales variables explicatives était aussi non linéaire. Les mêmes procédures de l'analyse statistique mises au point dans la première phase ont été répétées de manière à trouver le meilleur modèle. Le défi principal de cette étape était relié à l'insertion de l'équation de base pour expliquer les paramètres de la variation des propriétés. Celle-ci s'est basée sur l'analyse des résidus obtenus dans les modèles développés à l'étape précédente. L'approche de modélisation non linéaire choisie pour ce projet devrait préciser la variation des propriétés physico-mécaniques en fonction de l'âge cambial et du taux de croissance pour les différentes hauteurs dans l'arbre.

2.4.1 Approche statistique

Il existe plusieurs approches de modélisation pour décrire une variable dépendante en fonction de ses covariables à partir de données de structure groupée. Dans tous les cas, il est essentiel d'examiner la structure de corrélation entre les variables. Pour cela, des matrices de corrélations simples ont d'abord été calculées entre les variables indépendantes pour identifier les sources de multicolinéarité. Cela a permis de déterminer quelles variables restaient relativement indépendantes lors qu'elles étaient prises ensemble pour une analyse ultérieure. Une méthode efficace pour intégrer les effets de la croissance des arbres, leur position le long de la tige, les caractéristiques structurelles des peuplements et leurs variations, consiste à utiliser une approche de modélisation statistique (par ex. Leban et Haines 1999; Auty et al. 2013).

En particulier, l'utilisation de modèles mixtes non linéaires permet de considérer la structure hiérarchique des données (Pinheiro et Bates 2000). Cette approche a été appliquée pour

décrire la variation intra-arbre des propriétés de flexion (MOE et MOR) du bois' d'épinette noire en fonction de l'âge cambial et du taux de croissance annuelle (Objectif 1). Des peuplements de structure régulière et irrégulière ont été échantillonnés pour tester l'hypothèse selon laquelle une croissance plus lente dans des peuplements irréguliers conduit à des propriétés mécaniques plus élevées. Des modèles similaires à effets mixtes non linéaires ont été développés pour décrire la variation intra-arbre de la stabilité dimensionnelle du bois d'épinette noire, influencée par l'âge cambial (Objectif 2). L'hypothèse testée dans ce travail était qu'une croissance plus lente dans des peuplements irréguliers conduit à une meilleure stabilité dimensionnelle du bois d'épinette noire.

Pour atteindre les objectifs 3 et 4, l'analyse a été développée, en plus des corrélations entre les propriétés physiques et mécaniques, également vers une modélisation linéaire de la variation radiale par une approche statistique de régressions linéaires Stepwise. Plusieurs modèles de régression ont été développés pour évaluer la variation du retrait différentiel (G_U) et le facteur de retrait m (R -ratio) liés au MOE ou au MOR influencés ou non par chaque variable indépendante (CA et D_o ou D_b). Les différences entre les peuplements de structure régulière et irrégulière ont également été prises en compte dans ces analyses.

2.4.2 Application du modèle linéaire (lm) et du modèle linéaire mixte (lme)

Considérant qu'il n'existe pas de loi physique qui établit la validité des modèles linéaires par rapport au non-linéaire et en raison de la simplicité du modèle linéaire, ce dernier a été initialement appliqué au départ des analyses (Leban et Haines 1999). Le suivi a été fait par un modèle de contrôle toujours linéaire, mais en tenant compte des effets aléatoires (*lme*). L'idée était d'appuyer le choix préalable de certaines variables qui ont été sélectionnées comme importantes pour cette étude en s'assurant d'inclure seulement celles qui amélioraient le modèle (principe de parcimonie).

L'âge cambial a été utilisé comme variable explicative principale, tel que proposé dans les objectifs de l'étude. Ensuite, le lien entre les variables explicatives a été examiné avec la fonction "pairs" du logiciel R. Cette étape exploratoire visait à vérifier s'il y avait des problèmes potentiels de colinéarité entre variables explicatives candidates. Le modèle s'est donc bâti par étapes successives, en ajoutant les effets fixes et aléatoires pertinents. En

général, la pertinence d'ajouter un nouvel effet dans le modèle a été déterminé sur la base des coefficients de corrélation (r), des coefficients de variation (CV) et du critère d'information d'Akaike (AIC). Les procédures de comparaison ont été appliquées dans le cas des modèles linéaires avec ces trois coefficients, bien que les valeurs plus élevées du r et moins élevées du CV ont été priorisées pour le choix du modèle.

2.4.3 Application du modèle non-linéaire mixte (nlme)

Dans la partie des analyses non-linéaires, les étapes de la modélisation linéaire ont été également appliquées, en utilisant d'abord l'âge cambial seul comme variable d'effet fixe. Une structure de corrélation pour tenir compte de la dépendance des observations a aussi été testée. Des tests de vraisemblance et l'AIC ont été appliqués pour évaluer les effets fixes et aléatoires dans les modèles. Celui affichant l'AIC le plus bas était utilisé comme base pour choisir le meilleur modèle. Les paramètres du modèle ont été estimés à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance au niveau de probabilité de 0,05. Les performances du modèle ont été évaluées sur la base de critères statistiques tels que l'erreur moyenne (E), l'erreur absolue moyenne ($|E|$), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur en pourcentage moyenne ($E\%$) de la partie fixe de chaque modèle. De plus, les coefficients de détermination (R^2) ont été calculés à partir des effets fixes et aléatoires du modèle individuel (Parresol 1999). Pour vérifier toutes les tendances possibles, une inspection visuelle des données et des prédictions du modèle ont été effectuées grâce à une analyse exploratoire des données. Toutes les analyses ont été effectuées à l'aide des fonctions contenues dans le package *nlme* disponible dans l'environnement de programmation statistique R (R Development Core Team 2013 ; 2020).

Les procédures pour la formulation des modèles utilisant les effets mixtes étaient similaires aux modèles précédents lorsque les effets aléatoires n'étaient pas considérés. Le changement le plus important dans ce deuxième tour de la construction de modèles non-linéaires, a été l'ajout d'une structure de corrélation (*corARI*) entre les échantillons provenant d'un seul arbre (structure de corrélation d'ordre autorégressif *AR-I*) pour tenir compte des valeurs non-mesurées (inconnues) entre les échantillons. À l'aide des valeurs prédites par les modèles et

de l'évaluation des distributions des résidus, la nécessité d'appliquer un modèle non linéaire a pu être déterminée.

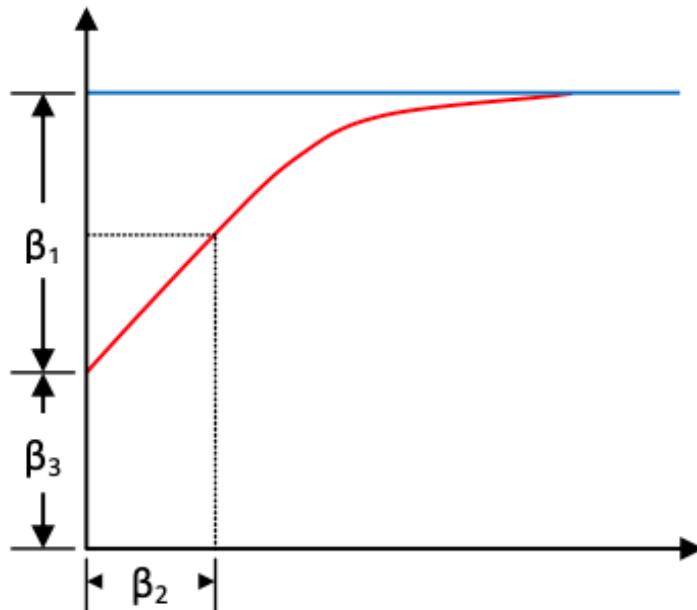


Figure 2.13 Allure de l'équation adaptée du modèle Michaelis – Menten 1913 (Lobry 2008).

Le développement initial du modèle était basé sur une équation de Michaelis-Menten de 1913 (Lobry 2008). Son modèle a été proposé pour décrire la cinétique des enzymes (c'est-à-dire la relation entre la concentration du substrat et la vitesse de réaction). Dans la présente étude, l'équation de Michaelis-Menten (Figure 2.13) a été modifiée de manière à ce que la concentration du substrat a été remplacée par l'âge cambial de même que par l'ajout d'une intersection (β_3):

$$[2.9] \quad \text{MOE, MOR, } G_U, \text{ R-ratio} = \left[\frac{\beta_1 \times CA}{\beta_2 + CA} \right] + \beta_3$$

Où: β_1 = est la valeur entre l'ordonnée à l'origine et l'asymptote (un estimé de la valeur maximale que la variable réponse peut atteindre).

β_2 = est l'âge cambial auquel représente la moitié de la différence entre l'ordonnée à l'origine et l'asymptote.

β_3 = est l'ordonnée à l'origine ou intersection.

Ainsi, la relation décrit une progression asymptotique d'une valeur minimale à l'âge 0 (β_3) vers une valeur maximale (β_1) qui n'est jamais réellement atteinte (une asymptote). Le taux de progression est caractérisé par β_2 , l'âge cambial auquel la moitié de l'augmentation entre β_3 et β_1 est atteinte. Auty et Achim (2008) ont utilisé un modèle similaire pour décrire l'effet de l'âge cambial sur les propriétés mécaniques du bois de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*).

Différentes équations ont été testées pour évaluer l'adéquation du modèle en fonction des variables sélectionnées. L'équation adaptée de Michaelis-Menten a été utilisée comme modèle de départ dans une première étape du développement du modèle final, celui qui représentait le mieux les variables sélectionnées. Les analyses ont montré qu'une équation exponentielle serait plus adaptée aux données existantes. Ainsi, la fonction Weibull modifiée, avec 2 paramètres, a été sélectionnée pour être appliquée comme fonction de base pour le développement du modèle final.

Chapitre 3 Black spruce trees from fire-origin stands have higher wood mechanical properties than those from older, irregular stands

3.1 Résumé

Dans l'est de la forêt boréale canadienne, de longs intervalles entre les feux font en sorte que 60 % des peuplements acquièrent une structure irrégulière et inéquienne qui est associée à une croissance plus lente. Le but de cette étude était d'examiner l'effet de la structure de peuplement sur les propriétés mécaniques du bois sans défauts d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Au total, 128 arbres ont été échantillonnés de manière destructive dans des peuplements de structure régulière et irrégulière à travers le Québec, Canada. Des modèles non linéaires mixtes ont été développés pour chaque type de peuplement afin de décrire les variations du module d'élasticité (MOE) et du module de rupture (MOR) en fonction de l'âge cambial et de la largeur des cernes annuels dans des petites éprouvettes dépourvues de défauts. Les propriétés mécaniques étaient fortement reliées à l'âge cambial, et dans une moindre mesure par la largeur de cerne. Après avoir tenu compte de ces variables, le MOE et le MOR étaient plus élevés dans les échantillons provenant des peuplements de structure régulière, bien que les différences fussent moins prononcées dans le haut de la tige qu'à hauteur de poitrine (DHP). Les effets fixes des modèles ont expliqué entre 34 et 53 % de la variation des propriétés mécaniques. Une incidence plus élevée du bois de compression de moindre sévérité dans les arbres d'origines de marcottes pourrait expliquer les différences observées entre les structures de peuplement.

3.2 Abstract

In the eastern Canadian boreal forest, long fire return intervals lead to over 60% of stands having an irregular, uneven-aged structure, which is associated with slower growth. The aim of this study was to examine the effect of stand structure on the clear wood mechanical properties of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). A total of 128 trees were destructively sampled from stands of regular and irregular structure across Quebec, Canada. Nonlinear mixed-effects models were developed for each stand type to describe the variation in modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) in small defect-free samples

as functions of cambial age and annual ring width. Mechanical properties were strongly related to cambial age, with a smaller influence of ring width. After accounting for these variables, both MOE and MOR were higher in samples from stands of regular structure, although differences were less pronounced in the upper stem compared with breast height. The fixed effects of the models explained between 34% and 53% of the variation in mechanical properties. A higher incidence of mild compression wood in trees of layer origin may explain the observed differences between stand structures.

3.3 Introduction

Wood from the old-growth, unmanaged Canadian boreal forests, mainly supports a value chain dedicated to commodity products such as visually graded lumber and pulp and paper (Antal and Micko 1994; Duchesne 2006; Liu et al. 2007). However, since 2004, there has been a steady decline in timber production due to a fall in demand for Canadian wood products (NRCan 2012). In addition, low prices for products coupled with high production costs have resulted in the temporary or permanent closure of several mills. A potential solution to this problem is to focus on the development of value-added products (Paradis et al. 2013), for which there is increasing demand. In fact, although secondary processing for structural products may increase profitability, it also requires a deeper knowledge of the factors affecting wood properties.

Among Canadian boreal forest species, black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) is the most abundant and typically produces wood with high stiffness and strength (Zhang et al. 2002; Lei et al. 2005; Liu et al. 2007). Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) are important properties for the use of wood as a structural material. The former is a measure of stiffness, or resistance to bending, of the material, while the latter is an indicator of its maximum load at failure or bending strength. Although few studies have examined the within-tree variation of mechanical properties in black spruce, they are known to be related to wood density, microfibril angle (MFA), and tree growth parameters (Larson et al. 2001; Alteyrac et al. 2006; Liu et al. 2007). Wood density in black spruce is generally higher near the pith, declining to a minimum value at a cambial age of around 20 years, before slowly increasing to an intermediate value (Panshin and de Zeeuw 1980; Kennedy 1995). Despite a

generally positive correlation between density and mechanical properties, the high-density wood near the pith has lower stiffness and strength (Alteyrac et al. 2006). This is attributed to the higher MFA in the S2 layer of cell walls located near the pith (Zobel and Sprague 1998).

At a given ring number from the pith, wood properties can also be influenced by the width of the annual rings (Larson et al. 2001). However, in unmanaged black spruce stands, Alteyrac et al. (2006) found that ring width was not a significant factor affecting variation in the bending properties of clear wood samples. This result could have been due to the limited variation in ring widths among these samples or to the presence of more complex interactions with other variables that influence wood properties. For instance, Koubaa et al. (2000) found that ring width was negatively related to wood density in black spruce samples from commercial plantations, but the strength of the relationship decreased at higher cambial ages. Wood properties may also vary as a function of height along the stem, although observed trends are inconsistent, even for the same species. A decrease in growth rate and concomitant increase in wood density with increasing height in the stem was found in black spruce, although the effect was greater near the pith than in the outer growth rings (Alteyrac et al. 2005).

Most of the black spruce resource is still harvested from unmanaged natural stands in which the factors influencing tree growth, and, in turn, wood properties can differ from those that occur in managed forests. For example, in the absence of thinning treatments, the effects of growth rate on wood properties are more likely to be the result of natural variations in stand structure. In the northeastern Canadian boreal forest, wildfires are the main driver of stand dynamics (Bergeron et al. 2001; Bouchard et al. 2008). Short fire cycles prevail in the west of the region, leading to stands of a more even-aged, regular structure. However, in parts of the eastern boreal zone such as the North Shore region of Quebec, the wetter climate extends the mean fire return interval to an estimated 300 to 500 years (Cyr et al. 2007; Bouchard et al. 2008), which exceeds the expected lifespan of individual trees. After approximately 100 to 150 years of growth, the gaps formed by isolated tree mortality are no longer filled by the lateral expansion of surrounding crowns (Bouchard et al. 2008), which provides the conditions for the recruitment of new stems. This process explains the high proportion

(>60%) of stands with an irregular, uneven-aged structure in the region (Cyr et al. 2007; Bouchard et al. 2008). The heterogeneity in stand structure due to differences in tree age is therefore expected to induce additional variation in wood properties.

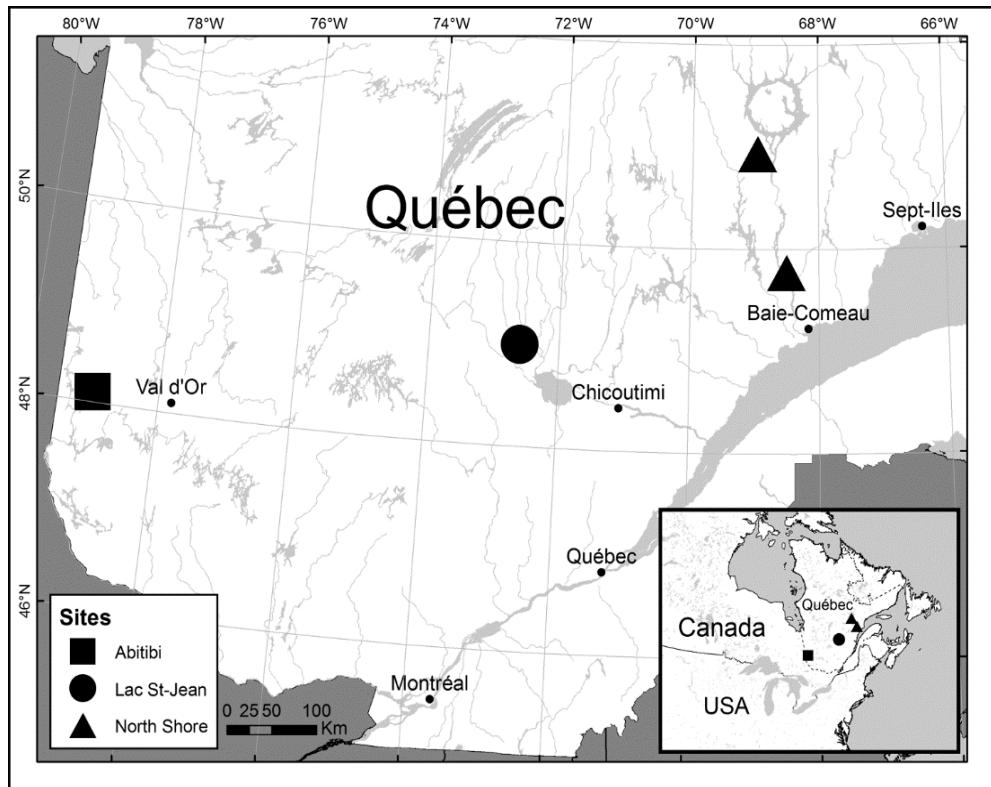


Figure 3.1 Map showing the locations of the study areas in the North Shore region of Quebec, Canada.

In such situations, a useful way to handle the confounding effects of tree growth, position along the stem, and stand structural characteristics is through a statistical modelling approach (e.g., Leban and Haines 1999; Auty et al. 2013). In particular, the use of mixed models can account for the hierarchical structure of the data (Pinheiro and Bates 2000). The objective of this study was to develop nonlinear mixed-effects models for describing the within-tree variation in MOE and MOR of black spruce wood as influenced by cambial age and annual growth increment. We sampled stands of regular and irregular structure to test the hypothesis that slower growth in irregular stands leads to higher mechanical properties.

3.4 Materials and methods

3.4.1 Sampling locations

Trees were sampled from three distinct regions in Quebec, Canada (Figure 3.1). The main sampling area (12 plots) was located in the North Shore region of the province. Here, samples were collected in the summer of 2009 from two separate locations forming postfire chronosequences (Barrette et al. 2013). Using fire history maps reconstructed from archival data (Bouchard et al. 2008), the time since the last fire (TSF) was determined in each plot that had burned in the last 150 years. These postfire cohorts were considered to be “regular” in structure. For stands where no fire had occurred in the last 150 years, TSF was estimated by radiocarbon dating of charcoal samples from the soil (for details, see Barrette et al. 2013). Hereafter, these stands are referred to as “irregular”. The sampling areas were selected by first locating the centre of the permanent plots established by Barrette et al. (2013) and then establishing a new plot of 400 m² (11.28 m radius) for destructive sampling. The new plots were located 50 m away from the centre of the permanent plots, in a randomly selected direction. A measure of tree size diversity for the North Shore plots was obtained by calculating the Shannon evenness index (Lexerød and Eid 2006), which describes how the plot basal area is distributed across the range of diameter classes.

Additional sample material was obtained from two other studies conducted in Quebec - one in the Abitibi region in western Quebec, sampled in 2001, and the other conducted in 2009 in the Lac-Saint-Jean area in the centre of the province (Figure 3.1). The first was a study on the mechanical properties of structural black spruce lumber (Liu et al. 2007) and the second was a comparative analysis of the crown characteristics of black and white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) (Power et al. 2012). In total, six plots were sampled in the Abitibi region and nine were sampled at Lac-Saint-Jean, giving a total of 27 plots in the whole study. All of the stands sampled in Abitibi and Lac St-Jean were even-aged, naturally regenerated, and less than 120 years old. They were thus considered to be postfire cohorts with a regular structure.

Table 3.1 Details of the sampling areas and sample tree characteristics.

Region	Stand structure	Nº. plots	Nº. trees	Tree age (years)	Tree height (m)	DBH (cm)	Shannon evenness index*	TSF (years)
Abitibi	Regular	6	29	84.7 (17.5) [50 -110]	17.7 (3.5) [12.3-25.3]	18.9 (5.2) [10.4-29.8]	NA	<120
Lac-Saint-Jean	Regular	9	42	73.0 (27.0) [30-120]	16.5 (2.7) [8.1-20.7]	18.7 (4.7) [7-25.7]	NA	<120
North Shore	Regular	7	34	101 (20.2) [68-154]	17.0 (3.2) [11.1-23.1]	18.5 (4.9) [11.3-27.5]	0.69 (0.03) [0.65-0.73]	106.2 (24.5) [67-158]
	Irregular	5	23	164.8 (49.8) [71-251]	17.6 (3.7) [8.6-24.2]	22.4 (3.9) [11.8-30]	0.80 (0.06) [0.70-0.87]	667.2 (169.8) [464-993]

Note: Values shown are the mean, standard deviation (), and range [] of the selected variables. DBH, diameter at breast height measured 1.3 m above ground level; TSF, time since the last fire; NA, not available.

*The Shannon evenness index is a measure of tree size diversity within a stand, indicating the proportion of total basal area in each diameter class (Lexerød and Eid 2006). A value of zero is obtained if all trees are in the same diameter class, and the maximum value is equivalent to $\ln(S)$, which is the case when basal area is evenly distributed among the diameter classes; S represents the total number of diameter classes.

At all sites, the diameter at breast height (DBH, measured 1.3 m above ground level) was measured on all live black spruce trees in each plot. Using the list of DBH measurements for trees of commercial size ($DBH > 9$ cm), stems were divided into diameter quartiles and sample trees were randomly selected within the first (one tree), second (two trees), and third (two trees) quartiles. This ensured a wide range of tree sizes in the sample data set, while avoiding suppressed trees. Trees with forked stems, major stem defects, or damaged crowns were also avoided. The sampling strategy differed in the Lac-Saint-Jean region, where one to six trees were sampled from each plot from across the entire DBH range.

Prior to felling, vertical lines were painted on the trees to indicate the west-facing cardinal direction. Once felled, the lines were extended along the stems to the tree tip. A 50 cm long bolt was cut from each stem at 1.3 m in all of the sample trees. In two trees per plot at the North Shore sites, bolts were also taken at 4 m, 7 m, and at the base of the live crown, giving a total of 24 trees with samples from multiple heights. All sampling positions were adjusted to avoid branch whorls and other defects. Bolts were transported to Laval University's Wood Research Centre and stored in a freezer before further processing. In total, 60 trees were

destructively sampled from the North Shore region, 30 from Abitibi, and 42 from the Lac-Saint-Jean region (Table 3.1).

3.4.2 Preparation of small defect-free samples

Bolts were first cut longitudinally along the east-west direction into 30 mm thick planks centred on the pith. These were stored in a conditioning chamber at 20°C and 65% relative humidity until they reached a constant nominal moisture content (MC) of 12%. Growth rings numbers were marked on each end of the planks so that the cambial age of the samples could be recorded. Next, defect-free samples measuring 10 × 10 mm in the transverse plane and 205 mm in the longitudinal direction were cross-cut sequentially from pith to bark along the west-facing radial direction. From these samples, a 40 mm section was then cut from each specimen to measure physical properties, so the nominal length of the mechanical properties test specimens was 160 mm. The ring number located closest to the midpoint of the cross section was recorded as the cambial age (CA) of each specimen. The mean ring width (RW) was also calculated as the number of complete rings divided by the radial dimension of the specimen. Measurements of both CA and RW were taken as the average of the values recorded at each end.

3.4.3 Determination of mechanical properties

Static MOE ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$) and MOR ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$) were determined in three-point bending in accordance with ASTM D143-94 (ASTM International 2007), using an MTS-QTEST/5 universal testing machine (MTS Systems Corporation, Eden Prairie, Minnesota, USA). Mechanical tests were performed at nominal 12% MC. The basic density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) was calculated on the 40 mm samples as the ratio of oven-dry mass to saturated volume. Specimens with defects such as decay, visible (severe) compression wood, or knots were removed from the analysis. These included all of the samples from three trees in the North Shore and one tree in Abitibi. In total, 833 samples were tested, comprising 588 samples from regular stands and 245 samples from irregular stands (Table 3.2).

Table 3.2 Details of the small clear wood sample characteristics for regular and irregular stands by stem position (1.3 m and combined upper stem data).

	Regular Stands (TSF <150 years)				Irregular Stands (TSF >200 years)			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
Stem position 1.3 m								
No. of samples	450							
Ring width (mm)	1.2	0.7	0.2	3.4	0.8	0.4	0.2	2.5
MOE (kN mm ⁻²)	10.29	1.82	5.13	15.03	9.58	1.51	5.16	12.66
MOR (N mm ⁻²)	91.7	12.8	47.7	123.0	88.9	13.8	58.4	129.9
Specific modulus (MOE/ρ)	24.01	3.55	12.23	31.48	22.48	3.76	11.74	28.09
Wood density (g cm ⁻³)	0.43	0.04	0.32	0.54	0.43	0.05	0.32	0.57
Combined upper stem								
No. of samples	138							
Ring width (mm)	1.2	0.6	0.2	2.5	0.9	0.5	0.2	2.0
MOE (kN mm ⁻²)	10.63	1.47	6.86	13.77	9.65	1.72	5.31	13.45
MOR (N mm ⁻²)	90.7	9.1	66.4	116.3	85.0	11.4	60.0	113.4
Specific modulus (MOE/ρ)	25.22	3.34	15.02	31.17	23.26	3.82	13.33	29.74
Wood density (g cm ⁻³)	0.42	0.03	0.35	0.51	0.41	0.03	0.33	0.51

Note: MOE, modulus of elasticity; MOR, modulus of rupture; ρ, density; TSF, time since the last fire; SD, standard deviation.

3.4.4 Statistical analysis

A recognized technique for modelling data with a hierarchical structure is to use a mixed-effects modelling approach, whereby random effects at different grouping levels (e.g., trees within plots) are included in the models to allow population-level parameter estimates (fixed effects) to vary around their mean values (Lindstrom and Bates 1990). Such an approach allows for unbalanced or missing data and for heteroscedasticity (nonconstant variance) and autocorrelation (dependence among observations) to be accounted for in the model-fitting process (Pinheiro and Bates 2000).

The significance of both fixed and random effects in the models were determined using likelihood ratio tests and Akaike's information criterion (AIC), and model parameters were estimated using the maximum likelihood method with the significance level set to 0.05. Model performance was evaluated by calculating mean error (E), mean absolute error ($|E|$), root mean square error (RMSE), and mean percentage error ($E\%$) from the fixed part of each

model. In addition, fit indices (R^2) were calculated (Parresol 1999) from the fixed and random effects of each model. All analyses were carried out using functions contained in the *nlme* library of the R Statistical Programming environment (R Development Core Team 2013).

3.4.5 Model development

Mechanical properties in black spruce increase rapidly from the pith outwards before attaining more stable values in mature wood. For this reason, the basic functional form selected for initial model fits was a modified two-parameter Weibull function of cambial age (Duchateau et al. 2013). This model was expressed as:

$$[3.1] \quad y_{ijkl} = \beta_1 \cdot (1 - e^{-\beta_2 \cdot CA_{ijkl}}) + \beta_3$$

where y_{ijkl} is either the MOE (kN mm^{-2}) or MOR (N mm^{-2}) in each sample, CA_{ijkl} is the cambial age (years) of the l th annual ring in the k th disc from the j th tree in the i th plot, and β_1, β_2 and β_3 are parameters to be estimated, representing the asymptote, rate and intercept of the model, respectively. Either the β_1 or the β_3 parameter was allowed to vary randomly, with the choice made according to model fit statistics. This can be expressed as follows:

$$[3.1.1] \quad \beta_n = \beta + b_i + b_{ij} + b_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

where β_n represents either β_1 or β_3 , β represents the fixed part of the parameter and b_i, b_{ij} and b_{ijk} represent the random effects at the plot, tree and disc levels, respectively, where appropriate. When random effects for both the β_1 and β_3 parameters were included, there was either a very high (>-0.8) or near perfect correlation between them, which is an indication that the models were overparameterized (Baayen et al. 2008). In addition, models with more than a single random effect failed to converge in many cases, so a single random effect was preferred.

To incorporate the additional influence of growth rate on mechanical properties, mean sample ring width was included as a covariate in the model by allowing parameter β_1 to vary as a linear function of RW:

$$[3.2] \quad y_{ijkl} = (\beta_1 + \beta_4 \cdot RW_{ijkl}) \cdot (1 - e^{-\beta_2 \cdot CA_{ijkl}}) + \beta_3$$

Models were firstly fitted to breast height data. In the subset of trees where samples were available from multiple heights along the stem, there was no evidence of a linear effect of disc height on mechanical properties, but a difference was found between breast height and the pooled upper stem data. Hence, the latter were modelled separately.

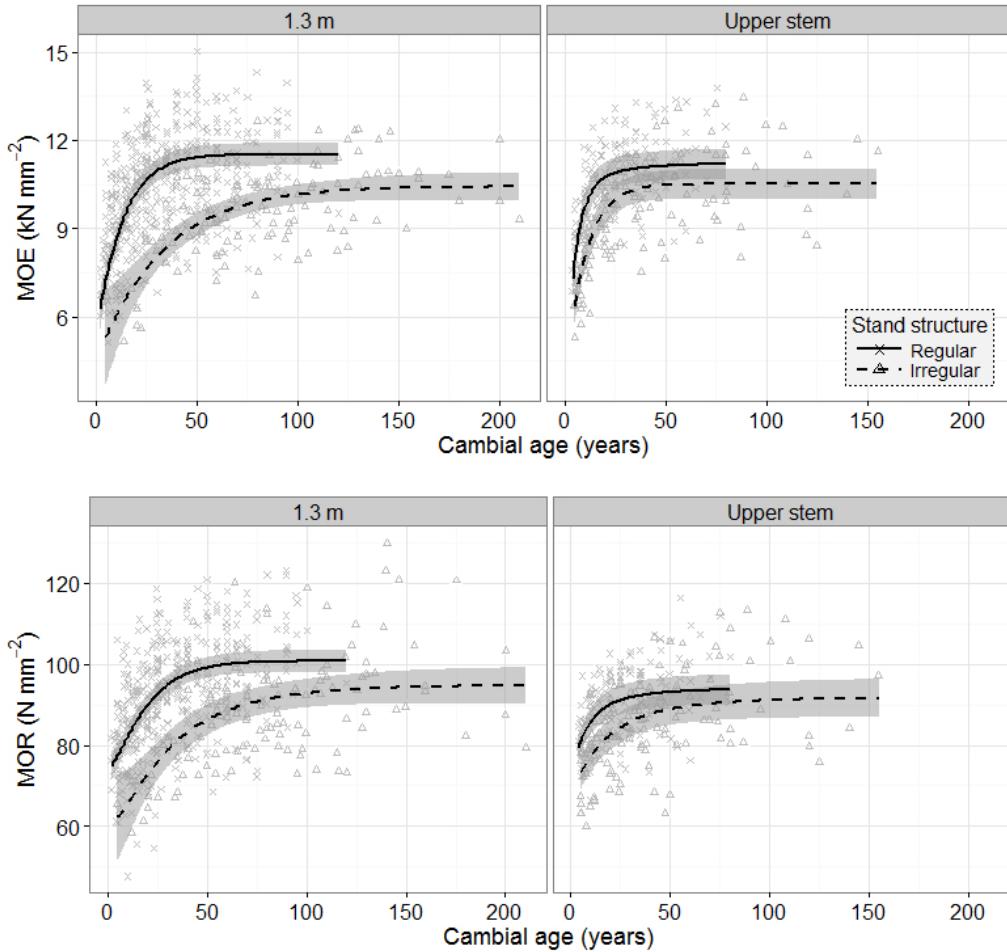


Figure 3.2 Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) vs. cambial age (points) with predictions (lines) and standard error of predictions (shading) at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from the fixed effects of Eqs. 3.1 and 3.2 using the predicted mean ring width values from Eq. 3.3, where appropriate.

In addition, as radial trends differed according to stand structure, separate models were parameterized for regular and irregular stands. A first-order autoregressive correlation structure $AR(1)$ was applied to model the dependence among observations at successive

cambial ages within each level of the random effects. Heteroscedasticity was modelled as a power function of cambial age. In the models fitted to breast height data from regular stands, random plot and tree effects were included, although in irregular stands the random plot effect was not significant and was therefore omitted. For upper stem data, the random plot effect was also not significant, and a random effect of disc was added to account for unobserved variation between sampling positions in the pooled dataset. Finally, in order to control for possible effects of wood density on mechanical properties, Eq. [3.2] was refitted with the response changed to the specific modulus (MOE/density) of each sample.

3.4.6 Simulations incorporating annual ring width

The mean ring width of the samples decreased rapidly from the pith before reaching stable values at higher cambial ages (Figure 3.3). To incorporate this variation into the predictions calculated from Eq. [3.2], models for predicting mean ring width as a function of cambial age were fitted separately to both the breast height and combined upper stem data from regular and irregular stands. Model predictions of mean ring width were then generated from a new sequence of cambial ages based on the range of values in the model-fitting datasets. The best model for annual ring width was a simple exponential function of the form:

$$[3.3] \quad y = ae^{-bx} + c$$

where y is the mean ring width of each sample (mm) and x is cambial age (years). Parameters were obtained by maximum likelihood estimation using the *nls* function in the R statistical programming environment. Predicted ring width values were then increased and decreased by 50% from their mean values at each cambial age to illustrate the effect of changes in growth rate on mechanical properties. The new datasets were then used to generate MOE and MOR predictions from Eq. [3.2]. For MOE in irregular stands, Eq. [3.1] was used since the effect of ring width was not significant.

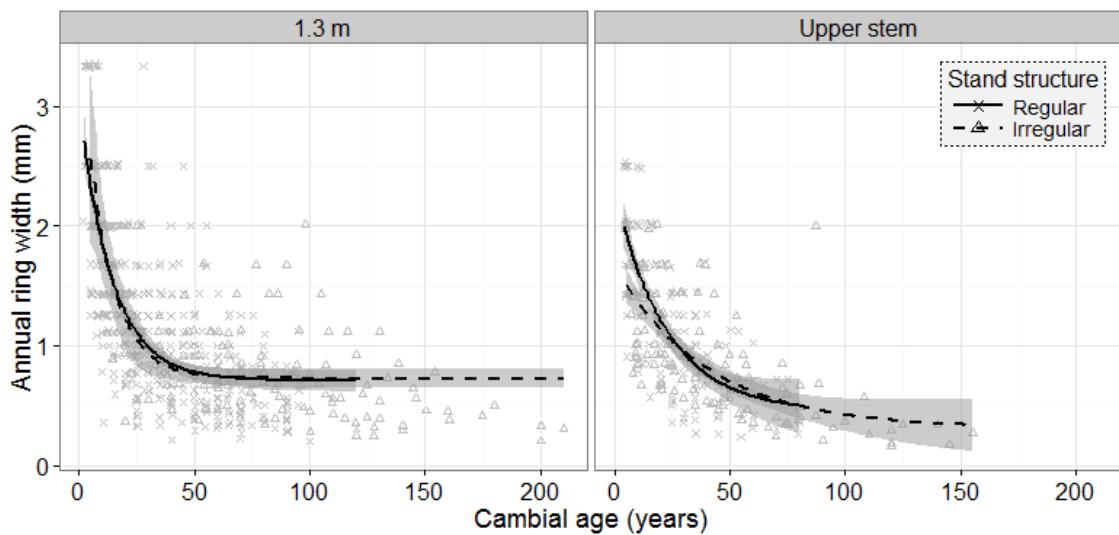


Figure 3.3 Annual ring width vs. cambial age (points) with predictions (lines) and standard error of predictions (shading) at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from the fixed effects of Eq. 3.3 in each case.

3.5 Results

The mean values of MOE and MOR were higher in regular stands (Table 3.2). In both stand types, mechanical properties increased rapidly in the first 30 - 50 rings from the pith before reaching more stable values at higher cambial ages. The higher values in regular stands were maintained along the entire radial profiles, although the differences were more pronounced at breast height than higher in the stem, particularly for MOE (Figure 3.2). Differences between stand structures were also observed when the analyses were run on the subset of data from the North Shore region, where both regular and irregular stands were sampled (not shown).

The largest source of variation in the random effects of each model was at the level of individual trees. There was also significant variation between plots for the breast height models from regular stands and between discs for the upper stem models. In addition, there were no obvious trends in the model residuals when plotted against the explanatory variables and predicted values (not shown). The fixed effects parameter estimates and standard deviation of the random effects for each model are presented in Tables 3.3 and 3.4.

Table 3.3 Parameter estimates, associated standard errors (SEs), t values, and p values of the fixed effects and standard deviations (SDs) of the random effects estimates for the modulus of elasticity (MOE) models given by Eq. 3.2 (regular stands) and Eq. 3.1 (irregular stands).

Stand structure	Fixed effects					Random effects		
	Parameter	Estimate	SE	t-value	p-value	Variable	SD	Level
Regular (1.3 m)	β_1	6.617	0.37	17.99	<0.001	$b_{3,i}$	0.69	Plot
	β_2	0.094	0.01	10.83	<0.001	$b_{3,ij}$	0.89	Tree
	β_3	5.461	0.42	13.13	<0.001	$b_{3,ijk}$	-	Disc
	β_4	-0.789	0.13	-6.24	<0.001	ε_{ijkl}	2.09	Residual
Irregular (1.3 m)	β_1	5.985	1.03	5.83	<0.001	$b_{3,i}$	-	Plot
	β_2	0.031	0.01	4.46	<0.001	$b_{3,ij}$	0.61	Tree
	β_3	4.446	1.11	4.01	<0.001	$b_{3,ijk}$	-	Disc
	β_4	-	-	-	-	ε_{ijkl}	1.60	Residual
Regular (upper stem)	β_1	8.308	0.95	8.77	<0.001	$b_{1,i}$	-	Plot
	β_2	0.207	0.03	7.69	<0.001	$b_{1,ij}$	0.79	Tree
	β_3	3.113	0.90	3.45	0.001	$b_{1,ijk}$	0.48	Disc
	β_4	-0.453	0.17	-2.63	0.01	ε_{ijkl}	0.87	Residual
Irregular (upper stem)	β_1	6.917	0.50	13.84	<0.001	$b_{3,i}$	-	Plot
	β_2	0.103	0.01	8.52	<0.001	$b_{3,ij}$	0.60	Tree
	β_3	3.598	0.57	6.34	<0.001	$b_{3,ijk}$	0.30	Disc
	β_4	-	-	-	-	ε_{ijkl}	0.84	Residual

In general, the MOE models were relatively unbiased, with mean error values close to zero. The RMSE was less than $1.5 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-2}$, although the errors for the models fitted to data from regular stands at breast height were slightly higher than for the other MOE models (Table 3.5). Fit indices also varied between models, with the percentage of variation in MOE explained by the fixed effects varying from 34% (77% with random effects) for regular stands at breast height to 53% (74% with random effects) for the upper stem data from irregular stands (Table 3.5). The MOR models also performed relatively well in terms of error statistics, although mean error was much larger in the upper stem model for regular stands. The fixed effects of the MOR models explained between 23% (regular stands, upper stem) and 39% (irregular stands, breast height) of the variation in MOR (80% and 73% with random effects, respectively). In all cases, the fit indices from the fixed effects were higher for the models for irregular stands than for the corresponding models for regular stands (Table 3.5).

Table 3.4 Parameter estimates, associated standard errors (SEs), t values, and p values of the fixed effects and standard deviations (SDs) of the random effects estimates for the modulus of rupture (MOR) models Fixed effects given by Eq. 3.2.

Stand structure	Parameter	Fixed effects				Random effects		
		Estimate	SE	t-value	p-value	Variable	SD	Level
Regular (1.3 m)	β_1	33.016	1.67	19.77	<0.001	$b_{3,i}$	4.25	Plot
	β_2	0.065	0.01	7.64	<0.001	$b_{3,ij}$	6.65	Tree
	β_3	73.976	1.96	37.80	<0.001	$b_{3,ijk}$	-	Disc
	β_4	-8.796	1.10	-7.97	<0.001	ε_{ijkl}	6.16	Residual
Irregular (1.3 m)	β_1	43.537	6.98	7.16	<0.001	$b_{3,i}$	-	Plot
	β_2	0.028	0.01	3.82	<0.001	$b_{3,ij}$	7.27	Tree
	β_3	61.216	6.47	9.46	<0.001	$b_{3,ijk}$	-	Disc
	β_4	-13.735	3.62	-3.81	<0.001	ε_{ijkl}	6.05	Residual
Regular (upper stem)	β_1	23.243	4.44	5.23	<0.001	$b_{1,i}$	-	Plot
	β_2	0.160	0.04	3.94	<0.001	$b_{1,ij}$	5.86	Tree
	β_3	72.462	4.21	17.23	<0.001	$b_{1,ijk}$	4.59	Disc
	β_4	-4.007	1.30	-3.07	0.003	ε_{ijkl}	3.32	Residual
Irregular (upper stem)	β_1	25.558	2.85	8.97	<0.001	$b_{3,i}$	-	Plot
	β_2	0.076	0.02	3.42	<0.001	$b_{3,ij}$	5.10	Tree
	β_3	68.164	3.35	20.34	<0.001	$b_{3,ijk}$	4.25	Disc
	β_4	-6.203	2.66	-2.34	0.022	ε_{ijkl}	1.89	Residual

Table 3.5 Error statistics calculated from the fixed parts of the MOE and MOR models and fit indices (R^2) calculated from both the fixed effects and from the fixed plus random effects levels of the models.

Response	Stand structure	Model errors					Fit indices			
		E	E	RMSE	E%	E %	Fixed	Plot	Tree	Disc
MOE	Regular (1.3 m)	-0.02	1.18	1.49	0.23	11.69	0.34	0.52	0.77	-
	Irregular (1.3 m)	0.03	0.94	1.16	0.35	9.91	0.41	-	0.60	-
	Regular (upper)	0.28	0.91	1.14	2.80	8.81	0.43	-	0.72	0.84
	Irregular (upper)	0.05	0.96	1.17	0.48	9.99	0.53	-	0.70	0.74
MOR	Regular (1.3 m)	-0.50	8.20	10.46	-0.47	8.91	0.34	0.48	0.79	-
	Irregular (1.3 m)	-0.06	8.33	10.78	-0.13	9.20	0.39	-	0.73	-
	Regular (upper)	1.37	6.42	8.00	1.52	7.15	0.23	-	0.65	0.80
	Irregular (upper)	0.34	7.33	9.36	0.34	8.58	0.32	-	0.57	0.70

Note: MOE, modulus of elasticity; MOR, modulus of rupture; E, mean error; |E|, mean absolute error; RMSE, root mean square error; E%, mean percentage error; |E|%, mean absolute percentage error (Parresol 1999).

When the response variable was changed to specific modulus, similar differences were found between regular and irregular stands (parameter estimates not shown). The variation of annual ring width with cambial age and predictions from Eq. 3.3 are shown in Figure 3.3, and parameter estimates and associated standard errors for these models are given in Table

3.6. The effects of annual ring width on MOE and MOR in regular and irregular stands are shown in Figures 3.4 and 3.5, respectively. There was a small but significant effect of mean ring width on MOE in regular stands and on MOR in regular and irregular stands. In all cases, the effect of ring width was smaller in the upper stem than at breast height.

Table 3.6 Parameter estimates, associated standard errors (SEs), t values, and p values for the ring width models given by Eq. 3.3.

Stand structure	Parameter	Estimate	SE	t-value	p-value
Regular (1.3 m)	a	2.293	0.13	17.45	<0.001
	b	0.070	0.01	9.59	<0.001
	c	0.798	0.05	15.14	<0.001
Irregular (1.3 m)	a	2.835	0.76	3.71	<0.001
	b	0.087	0.02	4.00	<0.001
	c	0.727	0.04	17.52	<0.001
Regular (upper stem)	a	1.850	0.15	12.44	<0.001
	b	0.044	0.01	3.76	<0.001
	c	0.445	0.16	2.75	0.007
Irregular (upper stem)	a	1.359	0.13	10.63	<0.001
	b	0.025	0.01	3.49	<0.001
	c	0.309	0.14	2.19	0.031

3.6 Discussion

Interestingly, both MOE and MOR were higher in regular stands for a given cambial age, although the differences between stand types were greater at breast height. Similar results have also been reported for black spruce structural lumber from the same sampling area (Paradis et al. 2013). In the latter study, both acoustic velocity, which is closely related to wood stiffness (Achim et al. 2011), and static MOE were significantly lower in locations where TSF was greater than 200 years. In light of results from the current study, we can infer that the results of Paradis et al. (2013) are at least partly attributable to differences in clear wood properties. Despite the observed differences between regular and irregular stands, black spruce from natural stands still produces wood with high mechanical properties. In plantation-grown black spruce, Zhang et al. (2002) reported a significant decrease in wood stiffness in trees established at wide initial spacings and a 30% overall reduction in stiffness compared with wood from natural stands. In addition, Paradis et al. (2013) showed that predicted pass rates for machine stress rated (MSR) lumber from irregular stands in the North

Shore region of Quebec remained high. They calculated that 92% of the black spruce trees from irregular stands would meet the requirements of MSR grade 1650Fb-1.5E, while 64% would meet those for the 2100Fb-1.8E grade (for grade specifications, see National Lumber Grades Authority (NLGA) 2003).

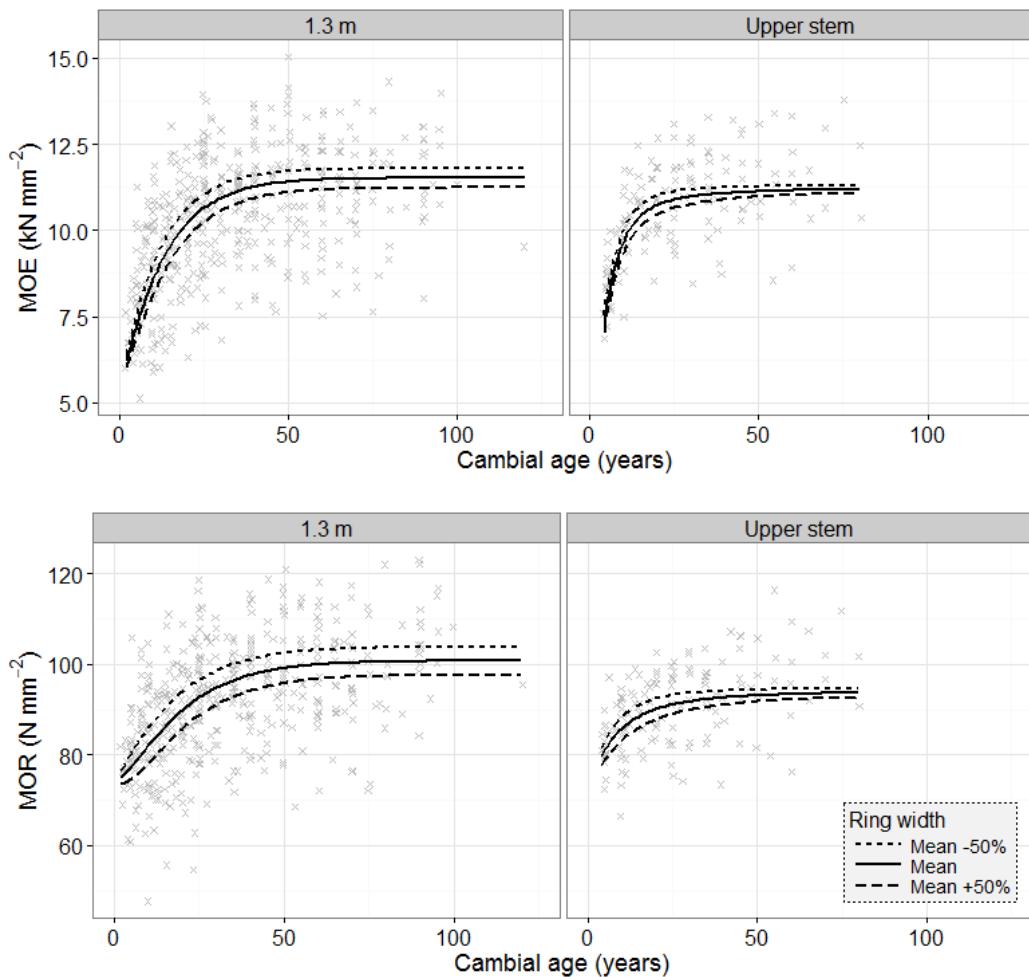


Figure 3.4 Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) vs. cambial age (points) and model predictions (lines) for regular stands at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from Eq. 3.2 using the predicted mean ring width values from Eq. 3.3 and for the mean ring width values $\pm 50\%$.

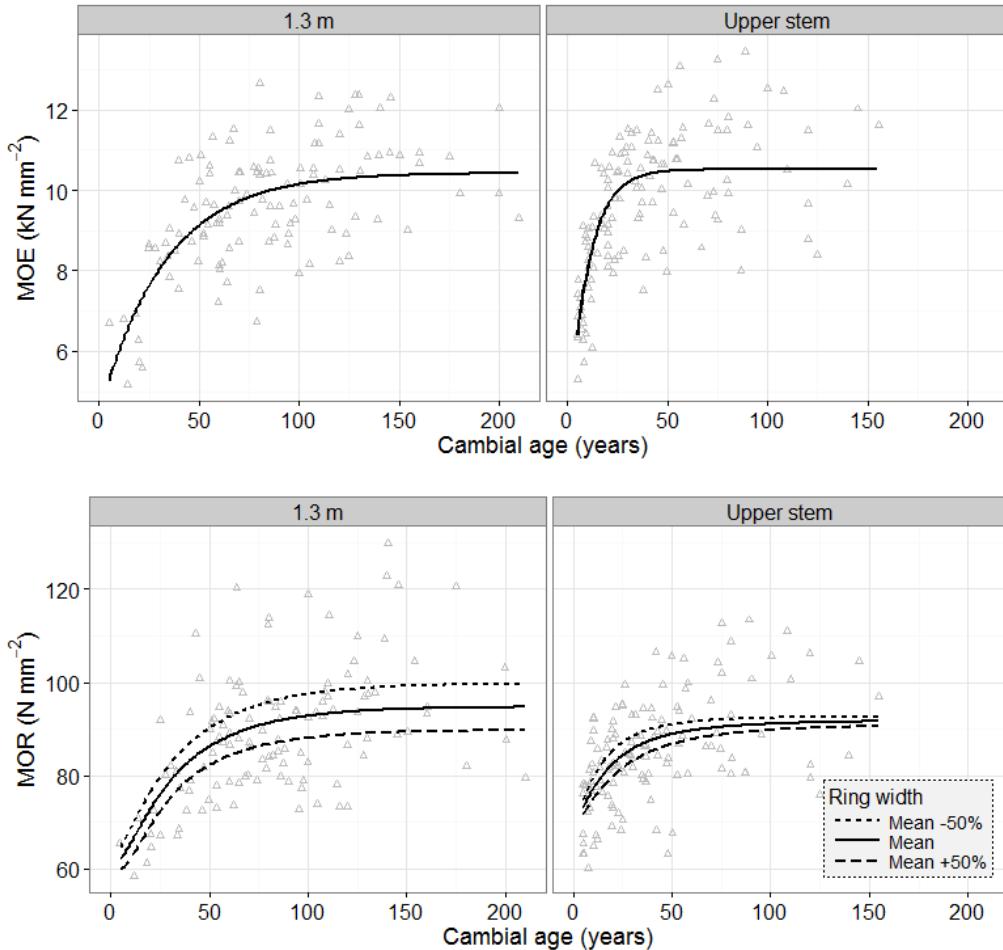


Figure 3.5 Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) vs. cambial age (points) and model predictions (lines) for irregular stands at 1.3 m and the upper stem. MOE predictions were calculated from Eq. 3.1 and MOR predictions were calculated from Eq. 3.2 using the predicted mean ring width values from Eq. 3.3 and for the mean ring width values $\pm 50\%$.

Our results and those of Paradis et al. (2013) were unexpected because for a given cambial age and position along the stem, the rate of radial growth is usually seen as an important driver of mechanical properties (Kennedy 1995; Larson et al. 2001). In the current study, there were small differences in annual ring width between regular and irregular stands, and even when this variable was included in the MOE and MOR models, the differences in mechanical properties between stand structures remained. This indicates that the observed differences may not be attributable to variation in radial growth rate.

Within a given stand structure, although ring width was negatively correlated with mechanical properties, its overall effect was small. In trees from the same stands as our

Abitibi samples, Liu et al. (2007) also found that the stiffness of black spruce dimension lumber was negatively correlated with growth rate. Similarly, Leban and Haines (1999) found a negative effect of growth rate (expressed as rings per centimetre) on MOE in hybrid larch. Based on mechanical testing of clear wood samples of four spruce and fir species, Zhang (1995) reported a negative effect of growth rate on MOE and MOR, over and above any effect due to changes in specific gravity. However, the influence of growth rate in other conifer species in the latter study was less clear-cut. This may be partly due to differences in the response to faster growth between species groups, which may affect the relative proportions of earlywood and latewood (Zhang 1995).

Generally, the observed radial trends in mechanical properties were very similar to those reported in previous work on black spruce (Alteyrac et al. 2006), white spruce (Kuprevicius et al. 2013), red spruce (*Picea rubens* Sarg.) (Wollcott et al. 1987), jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) (Schneider et al. 2008), red pine (*Pinus resinosa* Ait.) (Shepard and Shottafer 1992), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) (Auty and Achim 2008), and hybrid larch (*Larix × eurolepsis*) (Leban and Haines 1999). Values tend to increase rapidly in the first 30 to 50 annual rings before stabilising. This similarity in typical radial patterns is advantageous because it means that the same exponential function can be fitted to the data from different species. The within-stem variation in mechanical properties is largely a result of changes to the microstructural properties of wood such as tracheid dimensions, cell wall thickness, and microfibril angle over the life of the tree (Alteyrac et al. 2006; Lachenbruch et al. 2011). The resulting core of juvenile wood (or corewood) has inferior mechanical properties and largely reflects the shifting requirements (e.g., biomechanical or hydraulic) of trees as they respond to different environmental and developmental stimuli (Zobel and Sprague 1998; Larson et al. 2001; Burdon et al. 2004).

The fixed effects of the models in this study accounted for between 34% and 53% of the variation in MOE and between 23% and 39% of the variation in MOR using just cambial age and annual ring width as covariates. This compares with 63% of MOE variation explained by the nonlinear model developed by Leban and Haines (1999) for hybrid larch. Linear models developed for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) sampled in Finland and France accounted for 38% and 68% of the variation in MOE in each data set, respectively (Verkasalo

and Leban 2002). In the latter study, however, the inclusion of the density of each sample in the model improved the fit statistics. When microfibril angle (MFA) was included as a predictor variable, Alteyrac et al. (2006) found no significant effect of either ring density or annual ring width on MOE in black spruce clear wood samples but a significant influence of density on MOR.

Wood density is known to exert a strong influence on MOE and especially MOR (e.g., Panshin and de Zeeuw 1980; Burdon et al. 2001; Alteyrac et al. 2006) and is known to be negatively correlated with growth rate in spruces (Zhang 1995; Koubaa et al. 2005; Gardiner et al. 2011). Hence, it was expected that a large proportion of the observed variation in mechanical properties in this study could be attributed to the differences in wood density. However, there was little variation in the mean density of the samples between stand structures or between the lower and upper stem (Table 3.2). Furthermore, when the specific modulus (MOE/density) of each sample was modelled as a function of cambial age, differences in radial trends between stand types were very similar to those observed in the MOE and MOR models. As wood density alone seems to explain very little of the variation between stand types, other important processes or wood formation mechanisms might influence mechanical properties.

The elapsed time since the last stand-initiating fire is one of the key determinants of stand structural dynamics in the boreal forest (Bouchard et al. 2008). In stands that remain undisturbed by fire for long periods, black spruce reproduces mainly by vegetative layering rather than from seed, which often results in dense regeneration (Stanek 1961; 1968). Wood structural characteristics may be affected by the layering process because trees originate from branches, which contain shorter tracheids (Bannan 1965). Also, vertical growth in layers is achieved through the production of compression wood, which has lower mechanical properties (Timell 1986). The de-differentiation of lower branches into stems allows black spruce trees to reproduce in the absence of cones or a viable seed source by replicating their basic architectural units as a response to increased physiological requirements (Bégin and Filion 1999; Ishii et al. 2007). Thus, the larger differences in mechanical properties observed at breast height could reflect physiological changes to the cambium associated with the transformation of branches into stems (basal reiteration).

Evidence that poor stem form in young trees of layer origin is not observed in older trees (Stanek 1968) may further explain the differences as compression wood may continue to be more prevalent in the lower stem after the de-differentiation process (Ladell et al. 1968). Alternatively, greater and more complex wind-induced mechanical stimuli in the canopy gaps of irregular stands (Stacey et al. 1994; Gardiner et al. 2005) may also lead to compression wood formation. Due to its shorter and wider tracheids and higher MFA, compression wood is generally associated with lower mechanical properties (Timell 1986). However, severe compression wood is usually characterized by higher density, which we did not observe in this study. In fact, samples with visible (i.e., severe) compression wood were removed from the analysis.

Mild compression wood can also be produced in straight stems (Warensjö and Rune 2004; Donaldson et al. 2004). According to Donaldson et al. (2004), mild compression wood has a more pervasive distribution and is more difficult to identify because of its less distinctive visual appearance. In any case, differences in wood density are small between normal wood and mild compression wood (Donaldson et al. 2004). Therefore, a higher proportion of mild compression wood in irregular stands could explain the differences in mechanical properties found in this study.

3.7 Conclusion

This study quantified the radial variation in black spruce MOE and MOR clear wood samples from regular and irregular stands in Quebec, Canada. Annual ring number accounted for most of the variation in mechanical properties, with an additional influence of ring width. However, after accounting for these variables, differences remained between stands of recent fire origin and those that had been undisturbed for more than 200 years. Mechanical properties may be affected by the occurrence of mild compression wood, which can be present in trees of layer origin or in trees subjected to greater and more complex mechanical stimuli. Research efforts are currently focusing on other wood properties such as tracheid length and microfibril angle, which may indicate the presence of compression wood. In addition, further sampling will be carried out in a regular, even-aged stand regenerated after a clear-cut, where most of the trees will be of layer origin.

Chapitre 4 Black spruce trees from uneven-aged, old-growth stands produce more dimensionally stable wood than trees from fire-origin, even-aged stands

4.1 Résumé

Dans la forêt boréale de l'est du Canada, de longs intervalles de retour du feu entraînent plus de 60 % des peuplements ayant une structure irrégulière, inéquienne, ce qui est associé à une croissance plus lente. Le but de cette étude était d'évaluer l'effet de la structure du peuplement sur la stabilité dimensionnelle du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Soixante arbres ont été échantillonnés à partir de peuplements avec des structures régulières et irrégulières de la région de la Côte-Nord du Québec, Canada. Des modèles à effets mixtes non linéaires ont été développés pour chaque structure de peuplement afin de décrire la variation de deux paramètres de stabilité dimensionnelle, le rapport différentiel de retrait volumétrique (G_V) et le coefficient d'hygroexpansion dimensionnel (le facteur m), dans de petites éprouvettes de bois dépourvues des défauts en fonction de l'âge cambial et de la largeur des cernes annuels. Le rapport G_V et le facteur m étaient fortement liés à l'âge cambial, mais il y avait un effet limité de la largeur de cernes. Après avoir pris en compte ces variables, les échantillons prélevés sur des peuplements de structure irrégulière avaient une plus grande stabilité dimensionnelle que ceux des peuplements ayant une structure régulière, bien que les différences de G_V et du facteur m étaient plus prononcées dans la tige supérieure par rapport à la hauteur de poitrine. Les parties d'effets fixes des modèles ont expliqué entre 44% et 60% de la variation en G_V , et entre 7% et 44% de la variation du facteur m . Une présence plus élevée de bois de réaction modéré ou une variation faible de la masse volumique du bois à l'intérieur des cernes chez les arbres issus de marcottes provenant de peuplements irréguliers peuvent expliquer les différences observées entre les structures des peuplements.

4.2 Abstract

In the eastern Canadian boreal forest, long fire return intervals lead to over 60% of stands having an irregular, uneven-aged structure, which is associated with slower growth. The aim of this study was to evaluate the effect of stand structure on the dimensional stability of black spruce wood (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Sixty trees were sampled from stands with

regular and irregular structures from the North Shore region of Quebec, Canada. Nonlinear mixed-effects models were developed for each stand structure to describe the variation in two indicators of dimensional stability, the differential volumetric shrinkage ratio (G_V) and the dimensional hygroexpansion coefficient (R-ratio), in small defect-free wood samples as functions of cambial age and annual ring width. G_V and R-ratio were strongly related to cambial age, but there was a limited effect of ring width. After accounting for these variables, samples from stands of irregular structure had greater dimensional stability than those from stands with a regular structure, although G_V and R-ratio differences were more pronounced in the upper stem compared with breast height. The fixed effects parts of the models explained between 44% and 60% of the variation in G_V , and between 7% and 44% of the variation in R-ratio. A higher presence of mild reaction wood or lower within-ring variation in wood density in trees of layer origin from irregular stands may explain the observed differences between stand structures.

4.3 Introduction

Unmanaged Canadian boreal forests are an important source of feedstock to forest value chains dedicated to commodity products such as lumber and pulp and paper (Antal and Micko 1994; Liu et al. 2007). The US has long been the main importer of Canadian forest products; however, the impact of the US housing crash and global financial crisis that began in 2008 spurred Canadian producers to expand into other markets. Exports to Asia, mainly China, have risen sharply over the past decade and helped to increase the robustness of this trade-dependent sector (NRCan 2018). In such competitive global markets, new strategies are required to optimize the wood supply chain and increase industry profitability. A potential solution is the development of value-added products for structural uses (Benjamin et al. 2009; Paradis et al. 2013), for which there is an increasing demand. However, the development (and quality control) of secondary processes for value-added structural products requires not only strategic analyses of potential wood resources in terms of volume and quality, but also a deeper knowledge of the factors affecting wood properties in forest stands (Wilhelmsson et al. 2002).

In the Canadian boreal forest, black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) is the most abundant species and typically produces wood with high stiffness and strength relative to its density (Zhang et al. 2002; Lei et al. 2005; Liu et al. 2007). The species is therefore highly valued for structural applications (Bustos et al. 2003; Torquato et al. 2014). For example, cross-laminated timber (CLT) is increasingly being adopted in North American construction projects, even though little is known about the effects of environmental exposure (e.g., to rain during construction) on its long-term performance (Schmidt et al. 2019). Wood being a hygroscopic biomaterial, the dimensions of any piece of lumber will be affected by variations in relative humidity of air (RH). Checking, cupping, delamination by interfacial stresses due to changes in RH usually occur in different wood products in-service. Hence, understanding how wood swells and shrinks is critical for the optimal design of structural wood products and the best possible in-service product performance.

Dimensional changes in wood are caused by variations in RH when its moisture content (MC) is below the fiber saturation point (FSP) (Skaar 1988). Shrinkage occurs when wood loses moisture, while swelling takes place when wood gains water vapor. These two properties determine the dimensional stability and shape of wood components in its different uses (Noack et al. 1973). The total shrinkage (from green to oven-dry condition) is often used to assess dimensional stability. However, dimensionally stable wood shows small changes in size within a limited range of relative humidity. Thus, wood can have a high total shrinkage and yet the dimensional change between two hygrothermal conditions may be relatively small, therefore it exhibits high dimensional stability (Noack et al. 1973; Skaar 1988; Hernández 2007a). Thereby, the differential ratio for swelling/shrinkage (G) and the R-ratio (R) are better criteria for assessing dimensional stability. Also referred to as hygroexpansion ratio, differential swelling/shrinkage ratio is a measure that considers the relationship between the equilibrium moisture content (EMC) of wood and its changes in dimensions (Hernández 2007a). The R-ratio, also known as dimensional hygroexpansion coefficient (Skaar 1988), or specific moisture expansion coefficient (Skaar 1988; Hernández 2007a), represents the change in external volume during shrinkage (or swelling) per change in the weight of an equivalent volume of water (Noack et al. 1973; Chafe 1986; 1987; Hernández 2007a). These criteria have not previously been applied to assess the dimensional stability of black spruce wood.

Tree physiological variation, which is governed by the interactions between tree genetics and environmental factors (climate, soils, nutrient availability, etc.), is the main cause of variation in wood properties within a tree, either longitudinally or in its radial axis (Zobel and Jett 1995; Koubaa et al. 2002). Thus, the dimensional stability can be affected by different growth conditions due to the ring-level variation in wood properties (Bannan 1965; Dutilleul et al. 1998; Larson et al. 2001). However, the effect of growth conditions on the shrinkage behaviour of black spruce remains largely unquantified. For other conifers, Yao (1969) stated that the effect of growth rate on shrinkage was not significant in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). Yamashita et al. (2009) found that the radial shrinkage in sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) increased from pith to bark. In black spruce wood, longitudinal shrinkage was high near the pith and then decreased rapidly to a minimum value towards the bark (Zhang and Koubaa 2009). Similar results have been reported by Keith (1986) in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb) and by Foulger (1966) in white pine (*Pinus strobus* L.). The volumetric shrinkage of tamarack wood (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) is also higher in mature than in juvenile wood (Beaudoin et al. 1989). In loblolly pine (Yao 1969) and eastern hemlock (Zhang and Koubaa 2009), shrinkage decreased with height along the stem.

Wood as a bio-resource is affected by natural disturbances (e.g., wildfire, pathogens, and insects) and climate during its formation. In the Canadian boreal forest, most of the black spruce resource is still harvested from unmanaged natural stands. The factors influencing tree growth, and in turn, wood properties can differ from those that occur in managed forests (Pamerleau-Couture et al. 2019). In the northeastern Canadian boreal forests, wildfires are the main driver of stand dynamics (Bergeron et al. 2001; Bouchard et al. 2008). In black spruce, the process of regeneration from seeds is well-adapted to wildfire (Chabot et al. 2009), so that the age structure and distribution of stands across the landscape are largely driven by the fire regime (Raulier et al. 2009). Short fire cycles prevail in the west of the region, leading to stands of a more even-aged, regular structure. However, in parts of the eastern boreal zone such as the North Shore region of Quebec, the wetter climate extends the mean fire return interval (Cyr et al. 2007; Bouchard et al. 2008), which exceeds the expected lifespan of individual trees. Thus, about 60% of this region is composed of stands of uneven-aged, irregular structure, often referred to as ‘old-growth’ due to the prolonged absence of severe disturbances (Cyr et al. 2007; Bouchard et al. 2008). Torquato et al. (2014) reported

that such uneven-aged, old-growth stands produce wood with lower mechanical properties than even-aged stands of recent fire origin. Through an extensive sampling effort, Waldron et al. (2020) confirmed this result and showed that the elapsed time since the last stand-replacing fire is an important driver of wood properties in the northeastern Canadian boreal forest; however, the potential effects of fire regime on wood dimensional properties remains unknown.

The purpose of this study was to examine the effect of fire-driven differences in stand structure on the dimensional properties of black spruce wood. More specifically, we describe the effects of stand structure on the within-tree variation in the dimensional stability (G and R ratios) of black spruce wood. To achieve this, a statistical modelling approach was applied to integrate the effects of cambial age (CA), tree growth, position along the stem and stand structural characteristics on wood dimensional stability (e.g., Leban and Haines 1999; Auty et al. 2013). Stands of even-aged, regular structure and uneven-aged, irregular structure were sampled to test the hypothesis that slower growth in irregular stands leads to greater dimensional stability.

4.4 Materials and methods

4.4.1 Sampling locations and tree selection

Black spruce trees (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) from the North Shore region of Quebec, in Canada, were sampled for this study (Torquato et al. 2014). Trees came from two separate locations, a southern region (49°42'N, 68°51'W) and a northern region (50°57'N, 68°50'W), forming postfire chronosequences representing two distinct stand structures. Based on the fire history maps made from archival data (Bouchard et al. 2008), the time since the last fire (TSF) was determined in each sampling location. To represent even-aged, regular structures and uneven-aged, irregular structures, sampling sites were stratified into two TSF classes: TSF <150 years and TSF >200 years. For the sake of simplicity, these will be referred to as ‘regular’ and ‘irregular’ stands, respectively, in the remainder of the text. Six stands from each TSF class were initially selected. However, a later study of time since disturbance

revealed that one irregular stand had been misclassified (Barrette et al. 2013). We therefore sampled a total of 5 irregular and 7 regular stands (Table 4.1).

The sampling areas within stands were selected by first locating the centre of permanent plots previously marked by Barrette et al. (2013). A new plot of 400 m² (11.28 m in radius) was established for destructive sampling, which was located 50 m from the centre of the permanent plots, in a random direction. The tree size diversity in each plot was estimated by calculating the Shannon evenness index (Lexerød and Eid 2006). This index describes how the plot basal area is distributed across the range of diameter classes. The diameter at breast height (DBH, measured 1.3 m above ground-level) was recorded on all live black spruce trees in each plot. All stems of commercial size (DBH > 9 cm) were divided into diameter quartiles. Five trees per plot were then randomly selected within the first (one tree), second (two trees) and third (two trees) quartiles. These classes were deemed to represent the dominant, co-dominant, and intermediate trees of each stand, respectively. The stratified sampling ensured a wide range of tree sizes in the sample dataset.

A total of sixty black spruce trees were thus harvested from the 12 stands - 25 and 35 trees from irregular and regular stands, respectively. Once felled, a 50-cm-long bolt was cross-cut from each tree at DBH. Bolts were also taken at 4 m, 7 m, and at the base of the live crown in two trees per plot, giving a subset of 24 trees with four sampling heights. All sampling positions were adjusted to avoid branch whorls and other defects. After sampling and harvesting, two trees from irregular stands and one tree from a regular stand were removed from the total sampling of 60 trees because the prepared specimens showed severe defects such as decay and visible (i.e., severe) compression wood.

Following the same procedure performed with the mechanical properties (Torquato et al. 2014), the modelling steps were run first on all 57 trees for the breast height level (H1) considering the subset of 24 trees for the four other height levels along the stem (H2, H3, H4). The analysis then compared the DBH position (H1) with the upper stem by combining samples from the three other heights (H2+H3+H4). As a second step, separate analyses were also run only on the data from the 24 trees with four sampling heights. The same analysis comparing DBH with the upper stem was repeated. The results of the two different analyses

showed the same behavior when comparing the two types of TSF classes. For this reason, only the results from the analysis of all 57 trees will be presented in this study.

Table 4.1 Summary statistics of stand- and tree-level characteristics for the 12 black spruce stands in this study.

Regular Stands (TSF <150 years)				Irregular Stands (TSF >200 years)			
Nº total plots				7			
Nº total trees				5			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min
Shannon evenness index	0.69	0.03	0.65	0.73	0.80	0.06	0.70
TSF (years)	106.2	24.1	67	158	667.2	169.8	464
Stem position 1.3 m							
Nº trees				34			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min
Tree age at DBH (years)	102	22	68	154	165	50	71
Tree height (m)	17.3	3.3	11.1	23.1	17.6	3.7	8.6
DBH (cm)	18.5	5.5	11.3	27.5	22.4	4.6	11.8
Combined upper stem							
Nº trees				14			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min
Tree age at DBH (years)	100	20	73	148	162	47	92
Tree height (m)	17.5	3.2	11.7	23.1	18.1	3.7	14.3
DBH (cm)	19.2	5.3	11.3	27.5	22.0	3.3	17.4
				10			

† The Shannon evenness index is a measure of tree size diversity within a stand, which indicates the proportion of total basal area in each diameter class (Lexerød and Eid, 2006). A value of zero is obtained if all trees are in the same diameter class, and the maximum value is equivalent to $\ln(S)^*$, which is the case when the basal area is evenly distributed among the diameter classes. *S represents the total number of diameter classes.

†† TSF is the Time since the last fire.

4.4.2 Preparation of small defect-free samples

Planks were cut to produce a pith to bark quarter-sawn slab along the east-west direction from each bolt. These 30-mm-thick planks were stored in a conditioning chamber at 20°C and 65% RH until they reached an equilibrium moisture content (EMC) of approximately 12%. Growth rings were numbered from the pith to the bark on each end of the planks to track the cambial age of the samples. The two-transverse section at each end of the slabs were scanned and the images analysed with the WinDendro™ LA 1600 software (Regent Instruments Inc., Quebec, Canada). The width (RW, mm) and distance from pith (RD, mm) of each annual growth ring were recorded. The slabs were then cut into defect-free specimens

measuring 10 mm (tangential) x 10 mm (radial) mm in cross section and 205 mm in length. These specimens were cut sequentially from pith to bark on the west side of the stem while carefully aligning samples with the grain in the longitudinal direction. A 160-mm-long section was then cross-cut from each specimen to measure mechanical properties (Torquato et al. 2014), leaving a sample with a nominal length of 40 mm for the physical properties' measurements. The ring number located closest to the mid-point of the cross-section was recorded as the average cambial age (CA) of each specimen.

4.4.3 Measurement of physical properties

The experiment consisted of measurements of shrinkage at EMC on the 10 mm (T) by 10 mm (R) by 40 mm (L) samples. Five moisture content conditions, from saturated (green) to the oven-dry state, were studied (steps 2 to 6, Table 4.2). Green samples had been initially conditioned at 20°C and 65% RH (step 1). Samples were then equilibrated at specific values of temperature and RH to successively achieve three nominal moisture contents of 6%, 12%, and 18% (steps 2 to 4). They were then soaked in distilled water for 24 hours and exposed to cycles of vacuum and pressure until they attained a moisture content above the fiber saturation point (FSP, step 5). Finally, the samples were oven-dried at gradually increasing temperatures up to 103±2°C. Mass and dimensions in all principal directions were taken for these five moisture content conditions (steps 2 to 6). Mass was taken using a digital balance to the nearest 0.001g and saturated volume was determined by the water displacement method (measured to 0.001g). Sample dimensions were measured with a micrometer in the tangential, radial, and longitudinal directions to the nearest 0.001 mm. The basic density (g cm^{-3}) was expressed as the ratio of oven-dry weight to green volume. The mass of the specimens at each sorption condition and their mass measured after oven-drying were used to calculate the EMC, expressed as a percentage of oven-dry mass. The partial and total shrinkages in the tangential (β_T), radial (β_R), and longitudinal (β_L) directions of wood were calculated using the dimensional differences of samples. Partial and total volumetric shrinkages (β_V) were estimated as the summation of these three directional shrinkages [$\beta_T + \beta_R + \beta_L - (\beta_T \times \beta_R)$]. The partial volumetric shrinkages were used to estimate the FSP by the intersection method (Kelsey 1956), as described later.

Table 4.2 Details of the parameters used in each moisture content condition.

Step	Nominal EMC (%)	Temp. (°C)	RH (%) ¹	Sorption condition
1	12	20	65	Initial state
2	6	30	30	Desorption
3	12	20	65	Adsorption
4	18	20	85	Adsorption
5	Saturated State	20	100	Immersion in distilled water
6	0	103	0	Oven-dried

¹ Relative humidity.

4.4.4 Hygroscopic and dimensional stability parameters

The sorption ratio (S) was used to evaluate the hygroscopic stability of wood. This ratio characterises the sensitivity of changes in EMC (Δ EMC) to changes in RH (Δ RH) and is defined as (Noack et al. 1973):

$$[4.1] \quad S = \frac{\Delta EMC}{\Delta RH} \quad (\%/\%)$$

This ratio assumes a linear relationship between EMC and RH. For this, values of S were calculated between 30% and 85% RH (steps 2 and 4 in Table 4.2). This range of RH reflects values normally occurring in current wood product applications (Noack et al. 1973).

Three parameters were used to assess the dimensional stability of the samples. The first parameter was the differential shrinkage ratio (G_U), defined as follows:

$$[4.2] \quad G_U = \frac{\Delta \beta_U}{\Delta EMC} \quad (\%/\%)$$

This ratio also assumes a linear relationship between EMC and wood shrinkage. Therefore, G_U values were also calculated between 30% and 85% RH. G_U represents the ratio of shrinkage (β_U) to EMC in the direction U. The subscript U represents the tangential (T), radial (R), and longitudinal (L) directions, and the volumetric dimension (V). As indicated previously, dimensional stable wood shows small changes in size due to changes in EMC (Skaar 1988; Hernández 2007b).

The second parameter used to determine the dimensional stability of wood was the R-ratio. This ratio represents the change in the external volume of wood relative to the volume of water corresponding to the change in moisture content (Chafe 1986; 1987). The value for this parameter was expressed as the ratio of G_V to basic density (D_b):

$$[4.3] \quad R\text{-ratio} = \frac{G_V}{D_b} = \frac{\Delta \beta_V}{\Delta EMC \times D_b} \quad (\text{cm}^3 \text{ g}^{-1})$$

The R-ratio was also calculated between 30% and 85% RH. Finally, the ratio between the tangential and radial shrinkage (T/R) was also determined. The T/R shrinkage ratio is used to evaluate the anisotropy of shrinkage of a given wood (Arévalo and Hernández 2001). Values of T/R were obtained for all moisture sorption conditions.

Specimens with defects, such as decay, visible (severe) compression wood or knots, were removed from the analysis. In total, 555 samples were tested, comprising 318 samples from regular stands and 237 samples from irregular stands.

4.4.5 Statistical analyses

Nonlinear mixed-effects models are a standard approach used for analyzing data with a hierarchical structure (Lindstrom and Bates 1990) and are widely used for tree growth predictions in forestry (Huang et al. 2009). With this approach, random effects in hierarchical data (e.g., trees nested within plots) are included in the models to allow population-level parameter estimates (fixed effects) to vary around their mean values (Lindstrom and Bates 1990). This technique allows for unbalanced or missing data and for heteroscedasticity (nonconstant variance) and autocorrelation (dependence among observations) to be accounted for in the model fitting process (Pinheiro and Bates 2000). Likelihood-ratio tests and Akaike's information criterion (AIC) were applied to assess the significance of both fixed and random effects in the models. The model parameters were estimated using the maximum likelihood method at the 0.05 probability level. Based on statistical criteria such as mean error (E), mean absolute error ($|E|$), root mean square error (RMSE) and mean percentage error ($E\%$) from the fixed part of each model, the model performance was evaluated. In addition, fit indices (R^2) were calculated from the fixed and random effects of the individual

models (Parresol 1999). To verify any possible trends, visual inspection of the data and model predictions were conducted through exploratory data analyses. All analyses were performed using functions contained in the *nlme* (Pinheiro et al. 2020) package available in R Statistical Programming environment (R Core Team 2020).

4.4.6 Model development

Based on preliminary analysis of the data, the differential shrinkage ratio (G_U) and the R-ratio (R) as a function of cambial age (CA) in black spruce wood showed a similar nonlinear trend from pith to bark to that previously observed for the mechanical properties (Torquato et al. 2014). In the latter case, the MOE and MOR in static bending increased rapidly from the pith outwards, before reaching more stable values towards the bark. Thus, the basic functional form applied in the model fitting process was the same modified 2-parameter Weibull function of cambial age presented in Torquato et al. (2014). This model was expressed as:

$$[4.4] \quad y_{ijkl} = \beta_1 \cdot (1 - e^{-\beta_2 \cdot CA_{ijkl}}) + \beta_3$$

where y_{ijkl} is either the G_U (percent/percent) or R-ratio ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$) in each sample, CA_{ijkl} is the cambial age (years) of the l th annual ring in the k th disc from the j th tree in the i th plot, and β_1 , β_2 , and β_3 are parameters to be estimated, representing the asymptote, slope, and intercept of the model, respectively. Either the β_1 or the β_3 parameter in the equation could vary randomly between trees, seeking the best option based on the AIC value. This can be expressed as follows:

$$[4.5] \quad \beta_n = \beta + b_i + b_{ij} + b_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

where β_n represents either the β_1 or β_3 parameter, β represents the mean parameter estimate, and b_i , b_{ij} and b_{ijk} represent the random effects at the plot, tree, and disc levels, respectively (where appropriate), and ε_{ijkl} is residual the error term. When random effects for both the β_1 and β_3 parameters were included, there was either a very high (>0.8) or near perfect correlation between them, which is an indication that the models were overparameterized

(Baayen et al. 2008). Finally, a single random effect was preferred because models with more than a single random effect failed to converge. Either β_1 or β_3 was selected based on which one gave the lowest AIC value (Tables 4.4 and 4.5).

To incorporate the additional influence of growth rate on shrinkage properties, mean sample ring width (RW) was included as a covariate in the model by allowing parameter β_1 to vary as a linear function of RW:

$$[4.6] \quad y_{ijkl} = (\beta_1 + \beta_4 \cdot RW_{ijkl}) \cdot (1 - e^{-\beta_2 \cdot CA_{ijkl}}) + \beta_3$$

where RW_{ijkl} is the width (mm) of the l th annual ring in the k th disc from the j th tree in the i th plot. All other parameters are as described for Eq. [4.4].

Models were fitted to data obtained at breast height for all trees (57) and at three other heights for the subset of 24 trees. In this subset of trees, there was no evidence of a linear effect of disc height on dimensional stability parameters (Table 4.3), but a difference was found between breast height and the pooled upper stem data. Hence, the latter were modelled separately. Furthermore, separate models were parameterized for regular and irregular stands to compare radial trends according to stand structure. A first-order autoregressive correlation structure $AR(1)$ was applied to account for the dependence among observations at successive cambial ages within each level of the random effects. Heteroscedasticity was modelled as a power function of cambial age. In the models fitted to breast height data, random plot and tree effects were included. For upper stem data, a random effect of disc was added to account for the hierarchical structure of the variation between sampling positions in the pooled data set.

For all main physical properties, where the comparisons were made on the mean values, the standard errors (SE) and the p-values were calculated to determine whether the two stand types were significantly different (Table 4.3). A Chi-square test was used to determine statistically significances. The p-values were obtained from a mixed-effects model fit using the glmmTMB package in R statistical programming environment for fitting generalized linear mixed models and extensions (Brooks et al. 2017; Bolker 2020; Magnusson et al. 2020).

4.4.7 Simulations incorporating annual ring width

The annual ring width (RW) was also analyzed to verify the existence of additional influence of growth rate on dimensional stability parameters studied in this work. The mean ring width of the samples decreased rapidly from the pith before reaching stable values at higher cambial ages (Figure 4.1). To incorporate this variation into the predictions calculated from Eq. [4.6], models for predicting mean ring width as a function of cambial age were separately fitted to the data from regular and irregular stands. Model predictions of mean ring width were then generated from a new sequence of cambial ages based on the range of values in the model-fitting data sets. The best model for annual ring width was a simple exponential function of the form:

$$[4.7] \quad y = ae^{-bx} + c$$

where y is mean ring width of each sample (mm) and x is cambial age (years). Fixed effects models were fitted using the *nls* function in the base R library.

Predicted ring width values were then increased and decreased by 50% from their mean values at each cambial age to assess the effect of changes in growth rate on dimensional stability properties. The new data sets were then used to generate G_V and R-ratio predictions from Eq. [4.6] in the case where ring width was statistically significant, which here only applied for G_V in regular stands at breast height, or on R-ratio in irregular stands in the combined upper stem data. For all other predictions of G_V and R-ratio, Eq. [4.4] was applied as the effect of ring width was not significant (Tables 4.4 and 4.5).

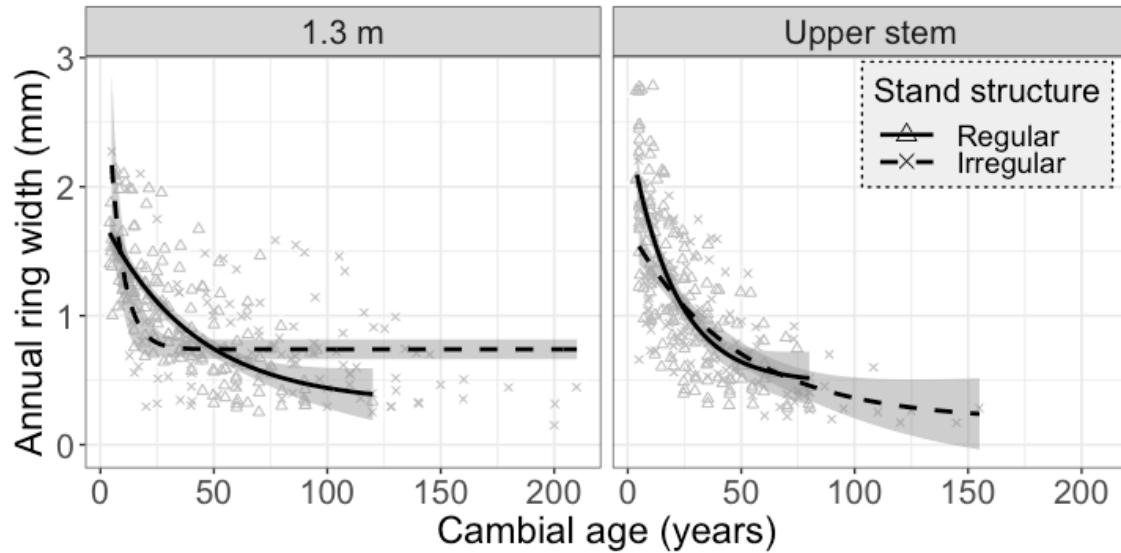


Figure 4.1 Annual ring width as a function of cambial age (points) with (lines) and standard error of predictions (shading) at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from the fixed effects of Eq. [4.7] in each case.

4.5 Results and Discussion

The main values of the measured physical properties are presented in Table 4.3. We found no evidence that mean basic density differed between stand types ($p = 0.701$) at breast height (overall mean of 0.426 g cm^{-3}), which is in agreement with findings in Torquato et al. (2014) on different samples from the same trees. Means are also within the range of densities (0.406 to 0.443 g cm^{-3}) reported in previous studies conducted in Quebec province (Zhang and Koubaa 2009).

Mean annual ring width was higher in regular stands than in irregular stands at both breast height and higher in the stem (Table 4.3). This result is consistent with Lemay et al. (2018) who found that an increase in the radial growth of black spruce stems did not affect wood density. Pamerleau-Couture et al. (2019) obtained similar results but observed that the decrease in earlywood density was compensated by an increase in latewood density and annual ring width. Other studies have shown that ring width had little effect on the variation in wood density for several species (Fernández Golfin and Diez 1994; Gomez Loranca et al. 1996).

4.5.1 Equilibrium moisture content and hygroscopic stability

The equilibrium moisture content for the three moisture sorption conditions studied (steps 2 to 4 in Table 4.2) are also shown in Table 4.3. The observed EMC values were higher than those usually obtained for North American wood species (Ross 2010). The black spruce wood sampled in this study therefore presented higher hygroscopicity compared to the average behavior of other North American woods. The EMC values were slightly higher for regular stands than for irregular stands (Table 4.3). However, the sorption ratio (S), an indicator of hygroscopic stability, was similar ($p=0.609$) for both types of stands, with EMC values changing on average by 0.28% per 1% of change in relative humidity.

4.5.2 Wood shrinkage and parameters of dimensional stability

Mean values of partial and total shrinkage, in the radial and tangential directions and volumetrically, were higher in regular stands than in irregular stands (Table 4.3). These differences between stands were statistically significant ($p<0.05$). The mean shrinkage values were all higher than those reported by Jessome (2000) for black spruce wood. This can partly be explained by the higher basic density in this study (0.426 g cm^{-3}) compared to that measured by Jessome (0.406 g cm^{-3}). Indeed, the amount of shrinkage in a species generally increases with wood density (Hernández 2007a) due to the increased amount of cell wall material and lower lumen volume (Skaar 1988). However, factors other than basic density contribute to variation in shrinkage, as observed in *Pinus pinaster* (Dumail and Castera 1997). This is particularly true in hardwood species that have high extractives content, where density needs to be adjusted to account for only the amount of ligno-cellulosic material (Hernández 2007a). In the present study, wood density alone cannot explain the differences in shrinkage values between the two different stand structures.

The variation in shrinkage may also be due to other anatomical features, such as microfibril angle, cell wall thickness, or cell lumen diameter (Koubaa et al. 1998; Auty et al. 2013). For instance, Kärkkäinen and Marcus (1985) compared shrinkage properties of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) wood from two regions of Finland. For a given basic density, shrinkage increased with the width of annual growth rings. These results are similar to our

results from the breast height samples in this study, where for a given mean basic density, the regular stands with larger growth rings displayed higher directional and volumetric shrinkages.

The ratio of tangential to radial shrinkage (T/R) is one of the criteria used to evaluate the anisotropy of shrinkage in wood. Wood best suited for uses requiring critical dimensional stability has low T/R ratio shrinkage (Arévalo and Hernández 2001). The average T/R ratios for black spruce in this study were similar ($p>0.05$) for both stand structures (Table 4.3). The low T/R ratios would indicate good shrinkage behavior in wood coming from the two types of stands. However, this ratio does not take into account the magnitude of the shrinkage in both directions, which is also an important factor to consider.

Wood harvested from regular stands in this study has higher volumetric shrinkage than that from irregular stands for all EMCs (Figure 4.2). According to the p -value ($p<0.05$), it is possible to confirm that the differences in shrinkage between the stands are statistically significant. In addition, curves in Figure 4.2 confirm that within the selected range of RH used in this study (30 to 85% RH), the relationship between volumetric shrinkage and EMC is linear. The relationships between tangential or radial shrinkage and EMC were also similar (results not shown). This is in agreement with several studies that have observed this behavior within similar ranges of RH (Noack et al. 1973; Skaar 1988; Hernández 2007a). The slope of the linear part of the relationship shown in Figure 4.2 represents the differential volumetric shrinkage ratio (G_v). At breast height, mean values of G_v were slightly higher (0.513 %/%) for regular stands ($p=0.01$) than irregular stands (0.489 %/%) (Table 4.3). Because we found the same result for values of G_T ($p<0.05$), and G_R ($p<0.05$), we are confident that wood from irregular stands is more dimensionally stable than wood from regular stands.

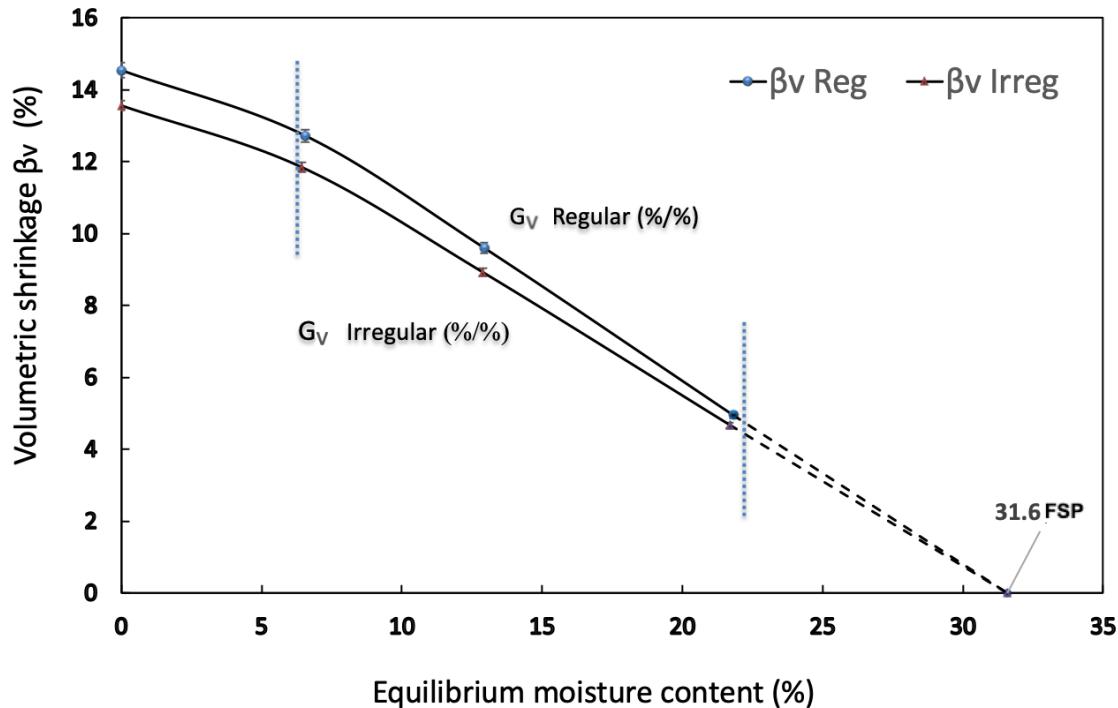


Figure 4.2 Volumetric shrinkage β_v of black spruce wood as a function of EMC for regular and irregular stands at breast height. Standard errors (SE) are shown only when it exceeds the symbol size. The slope of curves within the two bars represents the differential volumetric shrinkage ratio (G_V). Symbol on the x-axis represent the FSP estimated by the shrinkage intersection point method

The mean R-ratios were higher ($p<0.05$) for regular stands ($1.21 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$) than for irregular stands ($1.16 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$) (Table 4.3). When the dimensions of the cell cavities remain constant during shrinkage or swelling, the magnitude of the R-ratio is equal to one (Chafe 1986; 1987; Skaar 1988). Under shrinkage conditions, a value higher than one implies that cell cavities contract, while a value lower than one means they expand. The results therefore indicate that the lumina of tracheids contracted during shrinkage. Again, the lower value for irregular stands confirms that wood produced under these conditions is more dimensionally stable than the wood grown in regular stands.

The FSP was also estimated from Figure 4.2 using the intersection point method, which defines the FSP as the MC of wood where the extended straight linear portion of the shrinkage-EMC curve intersects the origin (Kelsey 1956). In this case, the mean FSP of wood from the two stand structures was similar at 31.6%. During a drying process, wood

coming from both types of stands will thus start to shrink at virtually the same moisture content.

The results of S and FSP indicate that differences in dimensional stability between stand types were exclusively due to changes in dimensions, with similar changes in EMC among samples. For a given change in EMC between 30% and 85% RH, changes in dimensions differed between the two types of stands despite similar average basic density values (Table 4.3). Possible explanations for the different behavior between stand types are presented below.

Table 4.3 Physical properties of the small clear samples for regular and irregular stands by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7 and 10 m). Values shown are the mean and standard error (in parentheses).

1.3 m †	Regular Stands (TSF <150 years)			Irregular Stands (TSF >200 years)		
	Nº trees	34	23	Nº samples	109	109
Nº samples	166	166	109	Ring width (mm)	1.03 (0.04)	0.78 (0.04)
Basic density (g cm^{-3})	0.425 (0.003)	0.425 (0.003)	0.427 (0.005)	Oven-dry density (g cm^{-3})	0.495 (0.004)	0.495 (0.005)
Sorption condition						
Temperature (°C)	30	20	20	Total	Partial 30-85	20
RH (%)	30	65	85		30	85
Nominal EMC (%)	6	12	18	6-18	6	12
Actual EMC (%)	6.59 (0.05)	12.99 (0.05)	21.91 (0.06)	-	6.59-21.91	6.41 (0.03)
β_T (%)	7.65 (0.08)	5.73 (0.06)	2.89 (0.04)	9.02 (0.10)	-	7.20 (0.08)
β_R (%)	5.04 (0.07)	3.75 (0.06)	1.86 (0.04)	5.55 (0.07)	-	4.76 (0.08)
β_L (%)	0.51 (0.01)	0.41 (0.01)	0.27 (0.01)	0.62 (0.01)	-	0.54 (0.01)
β_V (%)	12.81 (0.12)	9.66 (0.10)	4.96 (0.06)	14.67 (0.13)	-	12.15 (0.12)
TR ratio	1.56 (0.02)	1.58 (0.03)	1.62 (0.03)	1.65 (0.02)	1.53 (0.02)	1.56 (0.03)
G_T (%/%)	-	-	-	-	0.311 (0.004)	-
G_R (%/%)	-	-	-	-	0.201 (0.003)	-
G_L (%/%)	-	-	-	-	0.016 (0.001)	-
G_V (%/%)	-	-	-	-	0.513 (0.005)	-
R-ratio ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	-	-	-	-	1.21 (0.01)	-
S (%/%)	-	-	-	-	0.279 (0.001)	-

†1.3 meter above ground level. Average of the values and Standard error of the mean (in parentheses). β_T tangential shrinkage, β_R radial shrinkage, β_L longitudinal shrinkage, β_V volumetric shrinkage, G_T differential tangential shrinkage ratio, G_R differential radial shrinkage ratio, G_L differential longitudinal shrinkage ratio, G_V differential volumetric shrinkage ratio, S sorption ratio.

	Upper stem [†]	Regular Stands (TSF <150 years)			Irregular Stands (TSF >200 years)		
		30	20	Total	30	20	Total
Nº trees	14				10		
Nº samples	152				128		
Ring width (mm)	1.25 (0.05)				0.99 (0.05)		
Basic density (g cm^{-3})	0.423 (0.002)				0.414 (0.003)		
Oven-dry density (g cm^{-3})	0.496 (0.003)				0.480 (0.003)		
Sorption condition							
Temperature (°C)	30	20	Total	30	20	Total	
RH (%)	30	65	85	30-85	30	65	85
Nominal EMC (%)	6	12	18	6-18	6	12	18
Actual EMC (%)	6.44 (0.04)	12.83 (0.06)	21.89 (0.07)	-	6.44-21.89	6.72 (0.04)	13.14 (0.05)
β_T (%)	7.98 (0.09)	5.94 (0.07)	3.00 (0.05)	9.40 (0.10)	-	7.18 (0.07)	5.34 (0.06)
β_R (%)	5.38 (0.07)	3.98 (0.06)	1.96 (0.03)	5.99 (0.05)	-	4.99 (0.07)	3.69 (0.06)
β_L (%)	0.47 (0.01)	0.38 (0.01)	0.25 (0.01)	0.58 (0.01)	-	0.47 (0.02)	0.39 (0.01)
β_V (%)	13.40 (0.12)	10.06 (0.10)	5.16 (0.06)	15.40 (0.12)	-	12.28 (0.10)	9.23 (0.09)
T/R ratio	1.51 (0.02)	1.53 (0.03)	1.58 (0.04)	1.58 (0.02)	1.48 (0.02)	1.48 (0.03)	1.49 (0.03)
G_T (%/%)	-	-	-	0.323 (0.003)	-	-	-
G_R (%/%)	-	-	-	0.221 (0.003)	-	-	-
G_L (%/%)	-	-	-	0.014 (0.001)	-	-	-
G_V (%/%)	-	-	-	0.534 (0.005)	-	-	-
R-ratio ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$)	-	-	-	1.26 (0.01)	-	-	-
S (%/%)	-	-	-	0.281 (0.001)	-	-	-

[†]Upper stem is the combination of 4, 7 and 10 meters above ground level. Average of the values and Standard error of the mean (in parentheses). β_T tangential shrinkage, β_R radial shrinkage, β_L longitudinal shrinkage, β_V volumetric shrinkage, G_T differential tangential shrinkage ratio, G_R differential radial shrinkage ratio, G_L differential longitudinal shrinkage ratio, G_V differential volumetric shrinkage ratio, S sorption ratio.

4.5.3 Modelling the radial variation of the differential shrinkage ratio (G_v) and R-ratio

In both stand types, the G_v and R-ratio increased rapidly in the first 30 to 50 rings from the pith, before reaching more stable values at higher cambial ages. Differences between stand structures were also observed when the analyses were run on the subset of data for which we sampled multiple heights along the stem. The better dimensional stability of wood from irregular stands was observed along the entire radial profiles, and differences were slightly more pronounced for G_v than for the R-ratio for all sampling heights (Figure 4.3). Similar behaviour was found for mechanical properties from the same trees in a previous study (Torquato et al. 2014). These trends were also similar to those reported in other studies on mechanical properties of black spruce (Alteyrac et al. 2006) and white spruce (Kuprevicius et al. 2013). The similarity in the typical radial patterns of several wood properties means that a similar exponential function could also be fitted to data from other wood species and other wood properties.

The largest source of variation in the random effects of each model was at the level of individual trees. There was also a significant variation between plots for the breast height models from regular stands, and between discs for the upper stem models. Moreover, there were no obvious trends in the model residuals when plotted against the explanatory variables and predicted values (not shown). The fixed effects parameter estimates and standard deviation of the random effects for each model are presented in Tables 4.4 and 4.5.

In general, the G_v models were relatively unbiased, with mean error values close to zero. The RMSE was lower than 0.05 (%/%), although the errors for the models fitted to data from regular stands at breast height were slightly higher than for the other G_v models (Table 4.6). Fit indices also varied among models, with the percentage of variation in G_v explained by the fixed effects varying from 44% (60% with random effects) for irregular stands at breast height, to 60% (83% with random effects) for the upper stem data from regular stands (Table 4.6).

The R-ratio models also performed relatively well in terms of error statistics, although generally errors were larger in the breast height (1.3 m) model for regular stands. The fixed effects of the R-ratio models explained between 7% (irregular stands, breast height) and 44% (regular stands, upper stem) of the variation in R-ratio (30 and 80% with random effects, respectively). In all cases, the fit indices from the fixed effects were higher for the models for regular stands than for the corresponding models for irregular stands (Table 4.6).

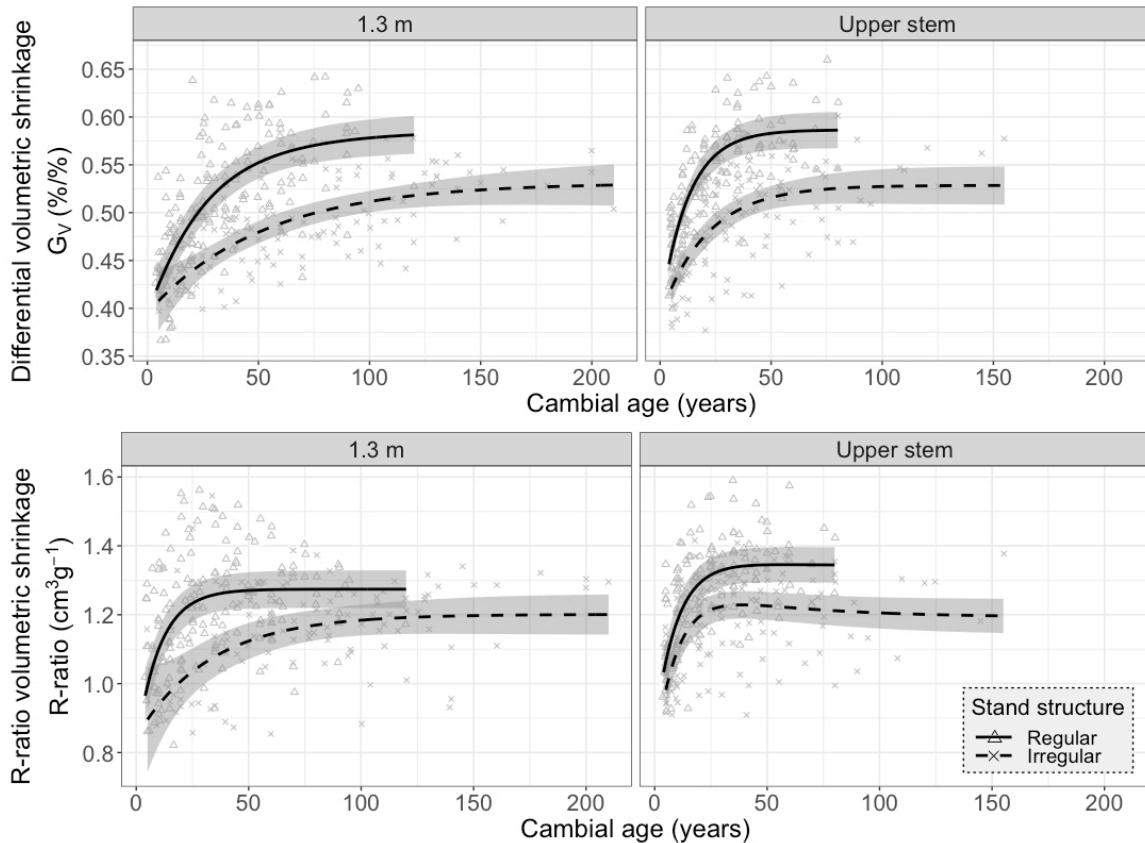


Figure 4.3 Differential volumetric shrinkage ratio G_v and R-ratio as a function of cambial age (points) with predictions (lines) and standard error of predictions (shading) at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from the fixed effects of Eqs. [4.4] and [4.6] using the predicted mean ring width values from Eq. [4.7], where appropriate.

Table 4.4 Parameter estimates associated standard errors (SE), t-values, and p-values of the fixed effects and standard deviations of the random effects estimates for Gv (%%) models given by either Eqs. [4.4] or Eq. [4.6].

Stand structure	Fixed effects					Random effects		
	Parameter	Estimate	SE	t-value	p-value	Parameter	SD	Level
Regular (1.3 m)	β_1	0.210	0.015	14.065	<0.001	$b_{3,i}$	0.015	Plot
	β_2	0.059	0.013	4.694	<0.001	$b_{3,ij}$	0.025	Tree
	β_3	0.395	0.017	23.856	<0.001	$b_{3,ijk}$	-	Disc
	β_4	-0.059	0.012	-4.751	<0.001	ϵ_{ijkl}	0.051	Residual
Irregular (1.3 m)	β_1	0.136	0.018	7.403	<0.001	$b_{1,i}$	0.001	Plot
	β_2	0.019	0.006	3.042	0.003	$b_{1,ij}$	0.001	Tree
	β_3	0.395	0.020	19.400	<0.001	$b_{1,ijk}$	-	Disc
	β_4					ϵ_{ijkl}	0.039	Residual
Regular (upper stem)	β_1	0.193	0.015	12.793	<0.001	$b_{1,i}$	0.010	Plot
	β_2	0.079	0.010	7.933	<0.001	$b_{1,ij}$	0.024	Tree
	β_3	0.393	0.014	27.784	<0.001	$b_{1,ijk}$	0.022	Disc
	β_4					ϵ_{ijkl}	0.036	Residual
Irregular (upper stem)	β_1	0.137	0.013	10.385	<0.001	$b_{3,i}$	0.001	Plot
	β_2	0.047	0.012	4.052	<0.001	$b_{3,ij}$	0.001	Tree
	β_3	0.392	0.014	29.081	<0.001	$b_{3,ijk}$	0.001	Disc
	β_4					ϵ_{ijkl}	0.029	Residual

Values of differential volumetric shrinkage ratio Gv (%%) used in these models were calculated between 30% and 85% RH.

When applying the variation in annual ring width with cambial age (see Eq. [4.7] and Figure 4.1), the effect of growth rate over and above that of stand structure was revealed to be relatively small (Figures 4.4 and 4.5). There was a significant effect of the mean ring width on Gv in regular stands at 1.3 m, but this effect was not statistically significant in the other three cases. In addition, there were no significant effects of ring width on the R-ratio in regular and irregular stands (1.3 m). The effect of annual ring width on the R-ratio was only significant in irregular stands in the upper stem. These results are consistent with those of Pamerleau-Couture et al. (2019), who reported a limited influence of ring width on wood density and cell dimensions in black spruce, and they confirm that a difference in growth rate cannot explain the observed differences in wood properties between regular and irregular stands. Results from other studies on the influence of growth rate on shrinkage of coniferous woods are variable. The response to faster growth appears to differ among species groups, possibly as a result of how the relative proportions of earlywood and latewood are affected (Zhang 1995).

Table 4.5 Parameter estimates associated standard errors (SE), t-values, and p-values of the fixed effects and standard deviations (SD) of the random effects estimates for the R-ratio (cm^3g^{-1}) models given by either Eqs. [4.4] or [4.6].

Stand structure	Parameter	Fixed effects				Random effects		
		Estimate	SE	t-value	p-value	Parameter	SD	Level
Regular (1.3 m)	β_1	0.455	0.081	5.643	<0.001	$b_{1,i}$	0.053	Plot
	β_2	0.096	0.021	4.507	<0.001	$b_{1,ij}$	0.064	Tree
	β_3	0.819	0.080	10.230	<0.001	$b_{1,ijk}$	-	Disc
	β_4					ε_{ijkl}	0.233	Residual
Irregular (1.3 m)	β_1	0.356	0.099	3.585	<0.001	$b_{1,i}$	0.001	Plot
	β_2	0.030	0.012	2.560	0.1	$b_{1,ij}$	0.069	Tree
	β_3	0.845	0.104	8.131	<0.001	$b_{1,ijk}$	-	Disc
	β_4					ε_{ijkl}	0.318	Residual
Regular (upper stem)	β_1	0.497	0.050	9.873	<0.001	$b_{3,i}$	0.049	Plot
	β_2	0.011	0.016	6.823	<0.001	$b_{3,ij}$	0.051	Tree
	β_3	0.845	0.059	14.432	<0.001	$b_{3,ijk}$	0.032	Disc
	β_4					ε_{ijkl}	0.106	Residual
Irregular (upper stem)	β_1	0.393	0.080	4.900	<0.001	$b_{3,i}$	0.028	Plot
	β_2	0.099	0.026	3.843	<0.001	$b_{3,ij}$	0.001	Tree
	β_3	0.787	0.078	10.130	<0.001	$b_{3,ijk}$	0.047	Disc
	β_4	0.069	0.040	1.719	0.1	ε_{ijkl}	0.111	Residual

Values of R-ratio (cm^3g^{-1}) used in these models were calculated between 30% and 85% RH.

Table 4.6 Error statistics calculated from the fixed effects of the Gv and R-ratio models, and fit indices (R^2) calculated from both the fixed effects and from the fixed plus random effects levels of the models. E =mean error, $|E|$ =mean absolute error, RMSE=root mean square error, $E\%$ =mean percentage error, $|E|\%$ =mean absolute percentage error (Parresol 1999).

Response	Stand structure	Model errors					Fit indices (R^2)			
		E	$ E $	RMSE	$E\%$	$ E \%$	Fixed	Plot	Tree	Disc
Gv (%)	Regular (1.3 m)	0.001	0.037	0.046	-0.644	7.234	0.48	0.56	0.75	-
	Irregular (1.3 m)	-0.001	0.028	0.034	-0.551	5.758	0.44	0.44	0.60	-
	Regular (upper)	-0.003	0.028	0.035	-0.884	5.367	0.60	0.62	0.75	0.83
	Irregular (upper)	-0.001	0.028	0.037	-0.621	5.821	0.47	0.50	0.50	0.50
R-ratio (cm^3g^{-1})	Regular (1.3 m)	0.005	0.118	0.146	-1.050	9.927	0.16	0.31	0.48	-
	Irregular (1.3 m)	0.022	0.101	0.137	0.672	9.099	0.07	0.07	0.30	-
	Regular (upper)	0.014	0.085	0.108	0.407	6.832	0.44	0.61	0.74	0.80
	Irregular (upper)	0.003	0.085	0.104	-0.592	7.269	0.35	0.42	0.42	0.58

Values of differential ratio Gv and R-ratio used in the models were calculated between 30% and 85% RH.

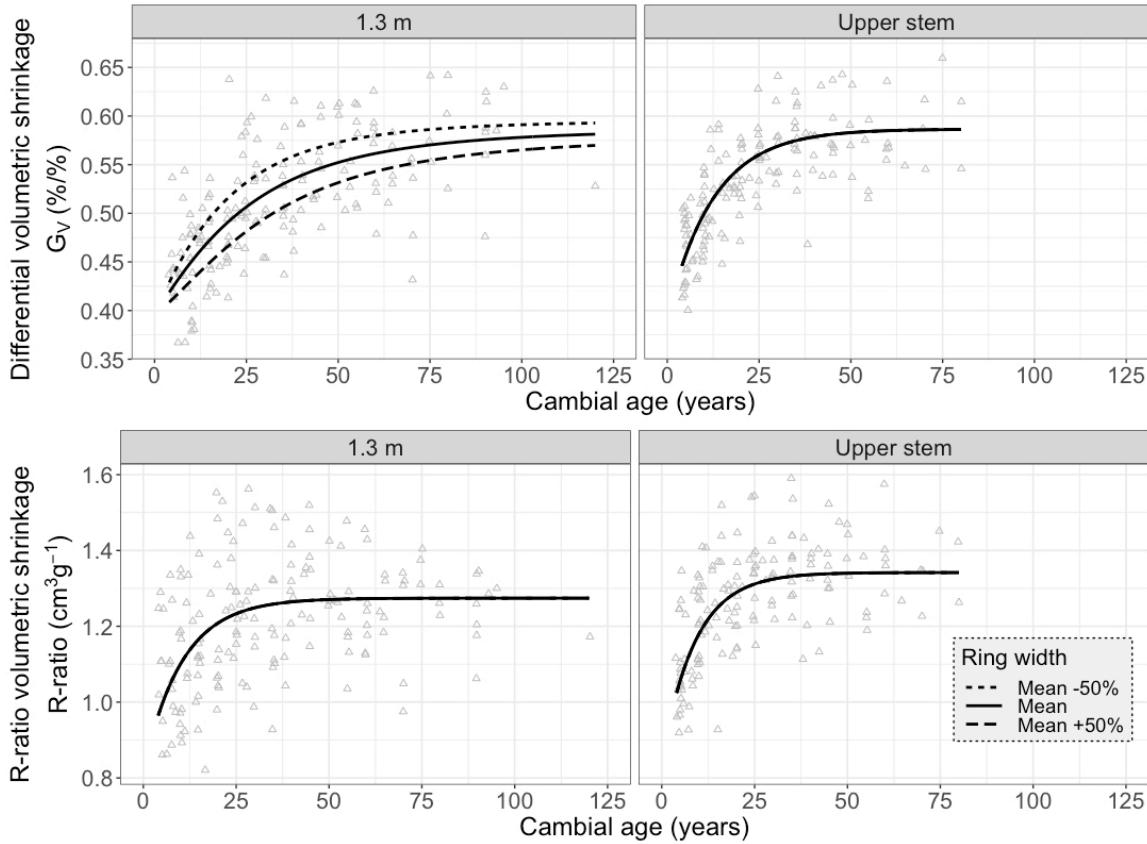


Figure 4.4 Regular stands: Differential volumetric shrinkage ratio G_v and R-ratio as a function of cambial age (points) and model predictions (lines) for regular stands at 1.3 m and the upper stem. Predictions were calculated from Eq. [4.4] and from Eq. [4.6] (at 1.3 m) using the predicted mean ring width values from Eq. [4.7] and for the mean RW values \pm 50%. Only one line appears in three of the four panels because the effect of ring width was only significant for G_v at breast height.

The analyses show that both G_v and R-ratio were higher in regular stands regardless of cambial age, and the differences between stand types were greater for G_v . No studies are available for comparing the values of G_v and R-ratio, especially on wood coming from different stand structures. However, the differences between stand structures for these physical properties were expected from previous results of Paradis et al. (2013), Torquato et al. (2014), and Waldron et al. (2020), who sampled trees from the same area that showed similar differences in MOE and MOR. Higher stiffness and strength properties of wood are known to be related to lower dimensional stability (Yamashita et al. 2009). These results could be used to optimize wood supply allocations to different mills and end-uses. Wood from regular stands could be designated to uses in which high mechanical properties are

important, such as MSR lumber in structural applications (Aubry et al. 1998; Zhang et al. 2002; Hassegawa et al. 2020), while wood from irregular stands could be prioritized for uses in light framing or lumber products which require greater dimensional stability.

The differences in dimensional stability between the two stand structures could be due to a higher microfibril angle in the S2 layer of the cell wall (MFA) of trees from irregular stands. Because dimensional changes are orthogonal to the angle of the microfibrils (Macdonald and Hubert 2002), higher microfibril angles are generally associated with an increase in longitudinal shrinkage, which is accompanied by a decrease in shrinkage in the transverse directions (i.e., radial and tangential shrinkage). However, our results did not reveal a statistically significant difference in longitudinal shrinkage between the two populations.

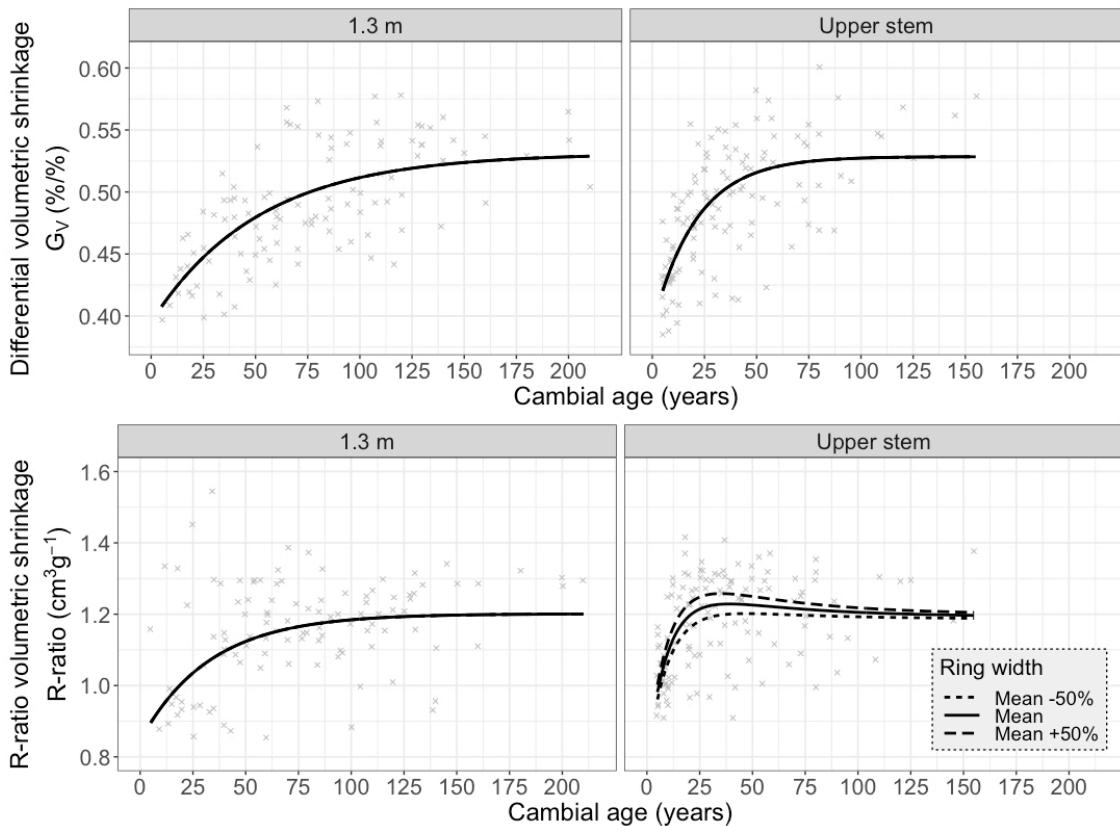


Figure 4.5 Irregular stands: Differential volumetric shrinkage ratio G_v and R-ratio as a function of cambial age (points) and model predictions (lines) for irregular stands at 1.3 m and at the upper stem. Predictions were calculated from Eq. [4.4] and from Eq. [4.6] (For R-ratio at upper stem) using the predicted mean ring width values from Eq. [4.7] and for the mean RW values $\pm 50\%$. Only one line appears in three of the four panels because the effect of ring width was only significant for the R-ratio in the upper stem.

It may also be postulated that differences in dimensional stability are due to differences in growth ring structure between the two populations. Table 4.3 indicates that the growth rings were significantly wider, on average, for wood coming from regular stands than from irregular stands ($p<0.05$). However, we found that the ring width parameter (β_4) was only significant in 2 out of the 8 fitted models (Tables 4.4 and 4.5). In addition, even though ring width was included in the G_V and R-ratio models, the differences in physical properties between stand structures remained. Therefore, the observed differences may not be entirely attributable to the variation in radial growth rate as expressed by ring width. Moreover, since mean basic density was similar for both types of stand structure, it is expected that their ring densities were also similar. However, Koubaa et al. (2002) observed that the proportion of earlywood increases while that of latewood decreases with ring width due to more favorable growing conditions. From this, in order to obtain similar ring densities from the two types of stands, earlywood density values would have to decrease and/or latewood values increase as ring width increases.

Pamerleau-Couture et al. (2019) have reported this behavior for regular and irregular stands of black spruce, with the ratio of latewood/earlywood density increasing with annual ring width. In our study, this would result in a higher intraring density variation in trees from regular stands than in those from irregular stands. Greater within-ring heterogeneity would cause the dimensional changes to be greater for fast-growing wood than for slow-growing wood, even at similar average density values. Using digital image correlations techniques, Garcia et al. (2020) observed different moisture-induced strains in latewood compared to earlywood in tamarack (*Larix laricina (Du Roi) K. Koch*). Since swelling strain depends on wood density, the denser latewood had a higher swelling strain than the earlywood. These results strongly indicate that growth ring characteristics, such as the ring width and the latewood proportion, affect the moisture-induced dimensional changes. Similar results have been reported by Krzemién et al. (2015) for Scots pine. In our study, wider rings exhibiting the highest latewood proportion would therefore also show highest swelling strains.

Torquato et al. (2014) hypothesized that the lower mechanical properties of wood from irregular stands could be due to a higher prevalence of mild compression wood. They related this possibility to the more frequent reproduction through vegetative layering in the absence

of fire (Stanek 1961; 1968) and to the more complex biomechanical stimuli in the canopy gaps of irregular stands (Stacey et al. 1994; Gardiner et al. 2005). Using a larger number of sampling sites in the North Shore region of Quebec, Waldron et al. (2020) confirmed the tendency towards lower mechanical properties of wood from irregular stands. Through carbon dating of char pieces found at the interface between the organic and mineral soils, they found that the discrepancy in mechanical properties between regular and irregular stands tended to increase with time since fire for a period spanning several centuries i.e., well beyond the breakout point of regular stands estimated to occur 150 to 200 years after the stand-initiating fire. Over this time span, contrary to other site-level variables (Ward et al. 2014), the proportion of seed-origin trees in the stands is likely to keep declining because of the increasing presence of ericaceous species and increasing moss layer thickness that prevent seed establishment. Therefore, the layer origin of trees appears to offer a plausible explanation for the decline in mechanical properties observed with increasing time since fire.

Layers are formed when live branches close to the stem base make contact with the forest floor and take root in the surface soil. Wood physical and mechanical properties may be affected by the layering process because the shorter tracheids of branches (Bannan 1965) are perpetuated in the stem of layer-origin trees and the vertical growth of layers is achieved through the production of compression wood (Timell 1986). On *Picea abies* (L.) Karst., Gryc et al. (2007) reported that the differential radial and tangential swelling ratios decreased proportionally to the increasing proportion of compression wood. However, severe compression wood is characterized by higher density and longitudinal shrinkage than normal wood, which was not observed in this study. In fact, samples with visible (i.e., severe) compression wood were removed from the analysis. Instead, it is possible that mild compression wood, which can be produced in non-leaning stems (Warensjö and Rune 2004) and has a more pervasive distribution (Donaldson et al. 2004), may be responsible for the differences in dimensional stability properties found in this study.

Trees can reach large sizes through biomass allocation to wood tissues that provide (*i*) mechanical support, (*ii*) water, carbon and nutrient transport, and (*iii*) storage (Mencuccini et al. 1997). Through growth mechanisms that remain poorly understood, trees appear able to change their anatomical characteristics to maintain vital functions such as conducting fluid

in sapwood, in a given environment (Pothier et al. 1989; Mencuccini et al. 1997). In this study, additional physiological processes related to the slower growth of trees, and possibly to their layer origin in irregular stands may have influenced cell wall biosynthesis and reduced the differences between earlywood and latewood cell dimensions, creating a more stable wood compared to trees from the regular stands. The suggested hypotheses show that more research on the ultrastructural and chemical composition of the wood cell wall in relation to growth environment is needed to elucidate these complex interactions.

4.6 Conclusions

This study evaluated the radial variation in black spruce G_V and R-ratio of clear wood samples from regular and irregular stands in northern Quebec, Canada. Cambial age accounted for most of the variation in dimensional stability properties, with a limited influence of annual ring width. Based on the results of the current study and of Torquato et al. (2014), the modelling of the wood properties of black spruce wood as a function of cambial age has been shown to follow a typical radial pattern that can be described using a modified 2-parameter Weibull function. However, after accounting for cambial age, the observed differences in dimensional stability remained between stands of recent fire origin and those that had been undisturbed for more than 200 years. Despite having the same hygroscopic stability and similar basic density, wood coming from irregular stands was more dimensionally stable than wood from regular stands. Shrinkage properties may be affected by the patterns of intra-ring variation in wood density. Slow-growing trees from uneven-aged, irregular stands may produce less dense latewood, which would tend to increase the dimensional stability of the material. Differences in wood physico-mechanical properties between stand types may also be attributable to the presence of mild reaction wood, which can occur in trees of layer origin or in trees subjected to greater or more complex mechanical stimuli. These results could have practical implications for decision-making in forest management and wood resource allocation. The selection of forest stands to produce black spruce wood for either high dimensional stability or high mechanical properties may be an interesting option that emerges from our results.

Chapitre 5 Black spruce trees from regular and irregular stands: relationships between cambial age, mechanical properties, and dimensional stability

5.1 Résumé

Les relations entre les propriétés physiques et mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) ont été étudiées pour deux types de structures de peuplement. Un total de 60 arbres a été échantillonné de manière destructive dans des peuplements de structure équiennes et inéquiennes de la forêt boréale du Québec, au Canada. Des corrélations et des analyses de régression multiple linéaire ont été effectuées pour chaque type de peuplement afin de décrire les relations entre le module d'élasticité (MOE), le module de rupture (MOR) et les rapports différentiels pour les retraits radial, tangentiel et volumétrique (G_R , G_T , G_V) de petites éprouvettes dépourvues de défauts en fonction de l'âge cambial et de la masse volumique du bois. Le but d'analyser cette relation était de créer un modèle potentiel pour prédire la stabilité dimensionnelle à partir de l'âge cambial et de propriétés mécaniques ou un modèle potentiel pour prédire le MOE or MOR à partir de la stabilité dimensionnelle. Les résultats ont révélé que la variation de la masse volumique du bois chez cette espèce n'est pas un bon indicateur des propriétés de retrait et du MOE. La masse volumique basale était seulement importante pour prédire le MOR du bois d'épinette noire. Chacune des propriétés mécaniques et physiques augmentaient avec l'âge cambial. La rigidité du bois avait un effet direct sur les propriétés de retrait: les échantillons plus rigides avaient tendance à avoir des changements plus importants de retrait, ce qui conduisait à une stabilité dimensionnelle inférieure dans les directions tangentielle et radiale, ainsi qu'en volume. Ainsi, la stabilité dimensionnelle diminuait à mesure que le MOE et le MOR augmentaient avec l'âge cambial. Enfin, la stabilité dimensionnelle était mieux prédictive à partir des mesures du MOE et de l'âge cambial: les coefficients de variation obtenus des modèles G_T et G_V étaient les plus petits, ce qui se traduirait par des intervalles de confiance plus petits des estimations.

5.2 Abstract

The relationships between physical and mechanical properties of black spruce wood (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) were studied for two types of stand structures. A total of 60 trees

were destructively sampled from even-aged and uneven-aged stands from the boreal forest in Quebec, Canada. Correlations and linear multiple regression analyses were performed for each stand type to describe the relationships between the modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR), and differential ratios for radial, tangential, and volumetric shrinkages (G_R , G_T , G_V) in small defect-free samples as a function of cambial age and wood density. The purpose of analyzing this relationship was to create a potential model to predict dimensional stability from cambial age and mechanical properties or a potential model to predict the MOE or MOR from dimensional stability. Results showed that variation in wood density within this species is not a good predictor of shrinkage properties and MOE. Density was only important to predict the MOR of black spruce wood. Mechanical and physical properties increased with cambial age. Wood stiffness had a direct effect on the shrinkage properties: stiffer samples tended to have higher changes in shrinkage, which led to lower dimensional stability in tangential and radial directions, and in volume. Thus, dimensional stability decreased as MOE and MOR increased with cambial age. Finally, dimensional stability was best predicted from measurements of MOE and cambial age: the obtained coefficients of variation of G_T and G_V models were the smallest, which will result in smaller confidence intervals of the estimates.

5.3 Introduction

Extensively managed Canadian boreal forests provide an important economic benefit to the forest value chain dedicated to commodity products such as visually graded lumber and pulp and paper (Antal and Micko 1994; Liu et al. 2007). Among Canadian boreal forest species, black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) is the most abundant and typically produces wood with high stiffness and strength considering its wood density (Zhang et al. 2002; Lei et al. 2005; Liu et al. 2007). Because of its commercial value and to maintain high quality timber production for value-added uses, it is important to understand the sources of variation in these properties.

The physico-mechanical properties of wood produced in the Canadian boreal zone are among the most important for structural applications compared to those of wood from other jurisdictions, where forest management is more intensive, and growth is faster (Jessome

2000; Bustos et al. 2003; Torquato et al. 2014). These properties are essential elements that must be evaluated in wood for its use as a structural material. According to Derome et al. (2013), the correct prediction of the behavior of wood components undergoing environmental loadings requires that the moisture behavior and mechanical performance of wood to be considered in a coupled manner. There are thus close relationships between the tangential and radial shrinkages and modulus of elasticity of wood pieces (Ivković et al. 2009; Yamashita et al. 2009). In general, the shrinkage and mechanical properties of wood tend to increase with basic density, which varies within the stem, mainly in its radial axis. In juvenile wood, the strength and rigidity of wood is affected by a combination of low density and pronounced microfibrillar angle that confers inferior mechanical and shrinkage properties compared to mature wood (Kennedy 1995; Alteyrac et al. 2006; Mansfield et al. 2009; Auty et al. 2016). In conifers, juvenile wood and compression wood have short cells with higher microfibrillar angle (Zobel and Sprague 1998). In wood with these characteristics, it can be expected that the normally observed relationship between density and mechanical properties is no longer valid. As the density of wood is related to its shrinkage properties (Beaudoin et al. 1989; Cáceres et al. 2018), wood dimensional stability can be affected by different growth conditions that influence wood formation and growth ring characteristics (Bannan 1965; Dutilleul et al. 1998; Larson et al. 2001). Variations in wood properties, nonetheless, have been studied for a long time and physiological variation is the main cause of variation in wood properties within a tree (Panshin and De Zeeuw 1980; Koubaa et al. 2002).

The modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) are important properties determining the quality of wood as a structural material. The former is a measure of stiffness, or resistance to bending of the material, while the latter is an indicator of its maximum load at failure or bending strength. Although few studies have examined the within-tree variation of mechanical properties in black spruce, they are known to be related to wood density, microfibril angle (MFA) and tree growth parameters (Larson et al. 2001; Alteyrac et al. 2006; Liu et al. 2007). Wood density in black spruce is generally higher near the pith, declines to a minimum value at a cambial age of around 20 years, before slowly increasing to an intermediate value (Panshin and De Zeeuw 1980; Kennedy 1995; Giroud et al. 2016). Despite a generally positive correlation between density and mechanical properties, the high-density wood near the pith has lower stiffness and strength (Alteyrac et al. 2006; Giroud et al. 2016).

This is attributed to the higher MFA in the S2 layer of cell walls located near the pith (Zobel and Sprague 1998; Alteyrac et al. 2006).

The dimensional changes in wood considerably affect its performance both at processing the processing stage as well as in service as an end-product (Zhang et al. 1994). The differential ratio for shrinkage (G) is generally used for characterizing dimensional stability. The differential ratio (G) is a measure that considers the relationship between the equilibrium moisture content (EMC) of wood and its changes in dimensions (Hernández 2007a). Several studies have shown a close correlation between wood density and its shrinkage properties (Hock and Mariaux 1984; Singh 1984; Hernández 2007a; Cáceres et al. 2018) with dimensional variations being generally more pronounced with increasing wood density (Yao 1969; Hernández 2007a). However, these relationships appear to be species-specific (Noack et al. 1973).

In addition to the above sources of property variations, wood is a resource exposed to natural disturbances (i.e., fires and pests). In the Canadian boreal forests, most of the black spruce resource is still harvested from natural stands without silvicultural practices. In unmanaged natural forests, the effect of growth rate on wood properties is more likely to be the result of natural variations in stand structure (Torquato et al. 2014). In the northeastern Canadian boreal forests, wildfires are the main driver of stand dynamics (Bergeron et al. 2001; Bouchard et al. 2008). In black spruce, regeneration from seeds is well adapted to wildfire (Chabot et al. 2009), so that the age structure and distribution of stands in the landscape are affected by the fire regime (Raulier et al. 2009). Short fire cycles prevail in the west of the boreal forest zone, leading to stands of a more even-aged, regular structure. However, in parts of the eastern boreal zone such as the North Shore region of Quebec, the wetter climate extends the mean fire return interval (Cyr et al. 2007; Bouchard et al. 2008), which exceeds the expected lifespan of individual trees. Thus, about 60% of this region is composed of stands of uneven-aged structure, irregular structure (Cyr et al. 2007; Bouchard et al. 2008). Hence, the heterogeneity in stand structure due to differences in tree age can affect tree growth and resulting wood properties.

Usually, an efficient way to integrate the effects of tree growth, position along the stem, stand structural characteristics, and their variations in the physical and mechanical properties, is

through a statistical analysis and evaluation of the correlations between the variables. Considering that the dimensional variations and the mechanical properties in bending will be the determining factors of wood quality, the aim of this study was to describe the within-tree variation in differential ratio for shrinkage (G) related to the MOE and MOR as influenced by cambial age (CA) and basic or oven-dry wood density (D_b or D_o). In addition to the analysis of correlations between the physical and mechanical properties, we used a statistical approach to model the radial variation of those properties. The purpose was to create a potential model to predict either dimensional stability from cambial age and mechanical properties or the MOE or MOR from dimensional stability.

5.4 Materials and methods

5.4.1 Sampling locations and tree selection

Black spruce wood (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) from the North Shore region of Quebec, in Canada, was selected for this study (Torquato et al. 2014). Trees were sampled from two separate locations i.e., in a southern region ($49^{\circ}42'N$, $68^{\circ}51'W$) and a northern region ($50^{\circ}57'N$, $68^{\circ}50'W$), forming postfire chronosequences representing two distinct stand structures. Based on the fire history maps made from archival data (Bouchard et al. 2008), the time since the last fire (TSF) was determined in each plot located in these locations. To represent a regular structure and an irregular structure, sampling sites were stratified into two TSF classes: TSF <150 years (regular or even-aged stands) and TSF >200 years (irregular or uneven-aged stands). Six stands from each TSF class were initially selected. However, a later study revealed that one irregular stand had been misclassified (Barrette et al. 2013). We therefore sampled at total of 5 irregular and 7 regular stands at this location for a total of 12 plots of sampling per stand (Table 5.1).

The sampling areas within stands were selected by first locating the centre of permanent plots previously marked by Barrette et al. (2013). A new plot of 400 m^2 (11.28 m in radius) was established for destructive sampling, which was located 50 m from the centre of the permanent plots, in a randomly selected direction. The tree size diversity for the plots was estimated by calculating the Shannon evenness index according to Lexerød and Eid (2006).

This index describes how the plot basal area is distributed across the range of diameter classes. The diameter at breast height (DBH, measured 1.3 m above ground level) was recorded on all live black spruce trees in each plot. All stems of commercial size (DBH > 9 cm) were divided into diameter quartiles. Five trees per plot were then randomly selected within the first (one tree), second (two trees) and third (two trees) quartiles. These classes were deemed to represent the dominant, co-dominant and intermediate trees of each stand, respectively. This ensured a wide range of tree sizes in the sample dataset.

Table 5.1 Details of the sampling areas and sample tree characteristics. Values shown are the mean, standard deviation () and range [] of the selected variables

	Regular Stands (TSF <150 years)				Irregular Stands (TSF >200 years)			
Nº total plots	7				5			
Nº total trees	34				23			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
Shannon evenness index	0.69	0.03	0.65	0.73	0.80	0.06	0.70	0.87
TSF (years)	106.2	24.1	67	158	667.2	169.8	464	993
Stem position 1.3 m								
Nº trees	34				23			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
Tree age at DBH (years)	102	22	68	154	165	50	71	251
Tree height (m)	17.3	3.3	11.1	23.1	17.6	3.7	8.6	24.2
DBH (cm)	18.5	5.5	11.3	27.5	22.4	4.6	11.8	30
Combined upper stem								
Nº trees	14				10			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
Tree age at DBH (years)	100	20	73	148	162	47	92	251
Tree height (m)	17.5	3.2	11.7	23.1	18.1	3.7	14.3	24.2
DBH (cm)	19.2	5.3	11.3	27.5	22.0	3.3	17.4	28.1

† The Shannon evenness index is a measure of tree size diversity within a stand, which indicates the proportion of total basal area in each diameter class (Lexerød and Eid, 2006).

†† TSF is the Time since the last fire.

A total of sixty black spruce trees were thus harvested in the summer of 2009. Once felled, a 50-cm-long bolt was cross-cut from each tree at 1.3 m (DBH) above ground level. Bolts were also taken at 4 m, 7 m, and at the base of the live crown in two trees per plot, giving a subset of 24 trees with 4 heights of the 60 trees selected. All sampling positions were adjusted to avoid branch whorls and other defects. After sampling and harvesting, two trees from irregular stands and one tree from regular stands were removed from the total sampling of 60

trees because the specimens prepared showed defects such as decay and visible (i.e. severe) compression wood.

5.4.2 Measurement of mechanical properties

Planks of 30 mm thickness were cut through the pith-to-bark radial axis for each bolt along the East-West direction. These planks were stored in a conditioning chamber at 20°C and 65% relative humidity until they reached the equilibrium moisture content (EMC) of about 12%. Growth rings were numbered from the bark to the pith on each end of the planks to follow the cambial age of the samples. The two cross-sections of planks were scanned to analyse the images with a dendrochronology software (WinDendro™ LA 1600 software) and the ring width (RW) was recorded (Regent Instruments Inc., Quebec, Canada). Planks were then cut into defect-free specimens measuring 10 mm (tangential) x 10 mm (radial) mm in cross section and 205 mm in length. These sticks were cut sequentially from pith to bark, from the west side of the trunk. A 160-mm section was then cross-cut from each specimen to measure mechanical properties measurements (Torquato et al. 2014). Therefore, the nominal length of samples for the physical properties was 40 mm. The ring number located closest to the mid-point of the cross-section was recorded as the average cambial age (CA) of each specimen. In total, 541 samples were analyzed from trees in the North Shore, comprising 313 samples from regular stands and 228 samples from irregular stands.

5.4.3 Determination of mechanical properties

Static MOE ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$) and MOR ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$) were determined in three-point bending in accordance with ASTM D143-94 (ASTM International 2007), using an MTS-QTEST/5 universal testing machine (MTS Systems Corporation, Eden Prairie, Minnesota, USA). Mechanical tests were performed at nominal 12% MC.

5.4.4 Measurement of physical properties

Shrinkage measurements were performed at EMC on the 10 mm (T) by 10 mm (R) by 40 mm (L) samples. Five moisture content conditions, from saturated to the oven-dry state, were studied (steps 2 to 6, Table 5.2). Green samples had been initially conditioned at 20°C and

65% RH (step 1). Samples were then equilibrated at specific values of temperature and RH to achieve three nominal moisture content of 6%, 12%, and 18%, successively (steps 2 to 4). They were then soaked in distilled water for 24 hours and exposed to cycles of vacuum and pressure to obtain a moisture content above the fiber saturation point (FSP, step 5). Finally, the samples were oven-dried at gradually increasing temperatures up to $103\pm2^{\circ}\text{C}$. Mass and dimensions in all principal directions were taken for these five moisture content conditions (steps 2 to 6).

Table 5.2 Details of the parameters used in each moisture content condition.

Step	Nominal EMC (%)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	RH (%) ¹	Sorption condition
1	12	20	65	Initial state
2	6	30	30	Desorption
3	12	20	65	Adsorption
4	18	20	85	Adsorption
5	Saturated State	20	100	Immersion in distilled water
6	0	103	0	Oven-dried

¹ Relative humidity.

Mass was taken using a digital balance to the nearest 0.001g and saturated volume was determined by the water displacement method (measured to 0.001g). Sample dimensions were measured with a micrometer in the tangential, radial, and longitudinal directions to the nearest 0.001 mm. The basic density (g cm^{-3}) was calculated on the 40 mm samples and expressed as the ratio of oven-dry weight to saturated volume. The mass of the specimens after each sorption condition and their mass measured after oven-drying were used to calculate the EMC, expressed as a percentage of oven-dry mass. The partial and total shrinkages in the tangential (β_{TH}), radial (β_{RH}), and longitudinal (β_{LH}) directions of wood were calculated using the dimensional differences of samples. Partial and total volumetric shrinkage values (β_{VH}) were estimated as the summation of these three directional shrinkages [$\beta_{\text{TH}} + \beta_{\text{RH}} + \beta_{\text{LH}} - (\beta_{\text{TH}} \times \beta_{\text{RH}})$]. The partial volumetric shrinkages were used to estimate the FSP by the intersection method (Kelsey 1956) as described later.

5.4.5 Dimensional stability parameters

The main parameter used to assess the dimensional stability of wood was the differential shrinkage ratio (G_U), defined as follows:

$$[5.1] \quad G_U = \frac{\Delta\beta_U}{\Delta EMC} \quad (\%/\%)$$

This ratio also assumes that there is a linear relationship between EMC and wood shrinkage. Therefore, G_U values were calculated between 30% and 85% RH. G_U represents the ratio of shrinkage (β_U) to the change of EMC in the direction U. The subscript U represents the tangential (T), radial (R), and longitudinal (L) directions, and the volumetric dimension (V). Dimensionally stable wood is one that shows small changes in size for a given change in EMC. Thus, a given wood sample can have a high total shrinkage (from green to oven-dry conditions), and yet the dimensional change between two hygrothermal conditions may be relatively small and therefore exhibit high dimensional stability. For this reason, several authors have applied this index for evaluating the hygroexpansion properties of wood (Noack et al. 1973; Skaar 1988; Hernández 2007b).

The R-ratio, another important parameter to determine the dimensional stability of wood, was also calculated. This ratio represents the change in the external volume of wood relative to the volume of water corresponding to the change in moisture content (Chafe 1986; 1987). When the dimensions of the cell cavities remain constant during shrinkage or swelling, the magnitude of the R-ratio is equal to one (Chafe 1986; 1987; Skaar 1988). Finally, the ratios between the tangential and radial shrinkage (T/R) were also determined. The T/R ratio is also used to evaluate the anisotropy of shrinkage of a given wood (Arévalo and Hernández 2001). Values of T/R were obtained for all moisture sorption conditions.

The sorption ratio (S) was used to evaluate the hygroscopic stability of wood. This ratio characterises the sensitivity of changes in EMC (ΔEMC) to changes in RH (ΔRH) and is defined as (Noack et al. 1973):

$$[5.2] \quad S = \frac{\Delta EMC}{\Delta RH} \quad (\%/\%)$$

This ratio assumes a linear relationship between EMC and RH. For this, values of S were calculated between 30% and 85% RH (steps 2 and 4 in Table 5.2). This range of RH reflects that normally occurring in current wood product applications (Noack et al. 1973).

5.4.6 Statistical analysis

The analyses were performed using the R Statistical Programming environment (R Core Team 2020). Matrices of simple correlations were first calculated among the selected explanatory variables to identify sources of multicollinearity. This established which variables remained sufficiently independent to be considered together in further analyses. Multiple regression models were developed to evaluate the variation in differential ratio for shrinkage (G_U) related to the MOE or MOR as influenced or not by each independent variable (CA and D_b or D_o) in black spruce (Tables 5.4, 5.5 and 5.6). Also, models were run to verify the variation in MOE or MOR in relation to the differential ratio for shrinkage (G_U) as influenced or not by the same independent variables cited above (Tables 5.7 and 5.8). The ring width (RW) was also analyzed to verify the existence of additional influence of growth rate on dimensional stability and the results were also significant. However, the resulting indices using the cambial age (CA) were better and more statistically significant. As these two variables are correlated, it was decided to use the latter. Likewise, despite being included in preliminary analyzes, the R-ratio was not considered in this study of relationships with mechanical properties because of its high correlation with wood density (this parameter is in fact the ratio of G_V to basic density (D_b)).

In general, the relationship between variables could be described by a linear relationship. The relationship between the main variables was present through simple regression plots at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands and the values of coefficient of determination (R^2) were calculated from these models (Figures 5.1 to 5.7). In the case of nonlinear relationships, such as cambial age (CA) in relation to mechanical properties (MOE and MOR) and the dimensional stability (G_U), a logarithmic transformation was applied to linearize the relationship. In contrast to nonlinear approaches, the application of linear regression often requires a transformation of the dependent (response) variable to meet model assumptions, as homoscedasticity and a normal distribution of the residuals (Fischer 2016).

Using the logarithm of one or more variables instead of the un-logged form makes the effective relationship non-linear, while still preserving the linear model (Benoit 2011).

The multiple regression models were applied separately for the regular and irregular stands and for two levels of height along the stem (1.3 m and upper stem). The forward stepwise method was used to select the descriptor variables of dimensional stability parameters and mechanical properties. The inclusion or exclusion of independent variables in the models was set at the 0.10 probability level. The autonomy criteria were met for all the models used. In general, the coefficients of variation (CV) and the Mallows coefficients were the lowest, as observed by Draper and Smith (1981). The individual model with the lowest Akaike's information criterion (AIC) value and the highest coefficient of determination (R^2) was chosen as the final model. Further tests of normality and residual analysis were performed to verify the assumptions required for regression. To evaluate the relative importance of each independent variable on the dependent variable, the regression coefficients were standardized by calculating the beta coefficients. These coefficients were calculated for each individual regression, and therefore, they are not comparable from one stand structure or height position to another. To verify any possible trends, visual inspection of model residuals was carried out through graphic analysis of the plotted relationships.

5.5 Results and Discussion

A summary of the measured physical and mechanical properties of black spruce trees grown in regular and irregular stands are presented in Table 5.3 by stem position. Means at 1.3 m above ground level were obtained from measurement on 57 trees while those at higher heights were obtained from 24 trees. The mean basic densities were statistically similar for the two types of stands at 1.3 m above ground level (0.425 g cm⁻³ for regular stands and 0.423 g cm⁻³ for irregular stands). These means were within the range of densities (0.406 to 0.443 g cm⁻³) reported in previous studies conducted in the Quebec province (Zhang and Koubaa 2009). Briefly, there was little variation in the mean density of the samples between stand structures or between the lower and upper stems.

The equilibrium moisture contents (EMC) for the three moisture sorption conditions (steps 2 to 4 in Table 5.2) are shown in Table 5.3. As reported by Torquato et al. (Submitted 2020),

the S parameter was similar for the two stand structures, showing that EMC changed on average by 0.28% per 1% of change in relative humidity. The hygroscopic stability of wood coming from the regular and irregular stands was hence similar.

As shown in Torquato et al. (Submitted 2020), the means of partial and total shrinkages, in radial and tangential directions, and in volume, were higher in regular stands than in irregular stands (Table 5.3). It is known that changes in dimensions generally increase with increasing wood density (Hernández 2007a). Denser wood has proportionately more cell wall material and less lumen volume, resulting in more shrinkage (Skaar 1988). However, wood density alone is often not a good predictor of shrinkage (Hernández 2007a). In the present work, wood density did not explain the difference in shrinkage observed between the two stand types. The variation in shrinkage may also be due to other anatomical features such as microfibril angle, cell wall thickness, or lumen diameter of cells (Koubaa et al. 1998; Cave and Walker 1994).

Results of Table 5.3 also show that wood coming from regular stands exhibited lower dimensional stability (higher values of G_R , G_T , and G_V) than wood from irregular stands even though having similar hygroscopic stability. This behavior may be associated with the higher stiffness of wood grown in the regular stands. Hypotheses to explain this behavior have been formulated in Torquato et al. (Submitted 2020). The relationships among these properties, together with wood density and cambial age are analyzed in this paper.

Table 5.3 Physical and mechanical properties of small clear samples for regular and irregular stands by stem position (at 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m) (Torquato et al. 2020).

1.3 m †		Regular Stands (TSF <150 years)				Irregular Stands (TSF >200 years)			
Nº trees	Nº samples	34		23		101		101	
Ring width (mm)	1.03 (0.04)					0.80 (0.04)			
Basic density (g cm^{-3})	0.425 (0.003)					0.423 (0.004)			
Oven-dry density (g cm^{-3})	0.495 (0.004)					0.488 (0.005)			
MOE (kN mm^{-2})	9.73 (0.18)					9.37 (0.18)			
MOR (N mm^{-2})	87.5 (1.3)					85.8 (1.3)			
Sorption condition									
Temperature (°C)	30	20	20	Total	Partial	30	20	20	Total
RH (%)	30	65	85		30-85	30	65	85	
Nominal EMC (%)	6	12	18		6-18	6	12	18	
Actual EMC (%)	6.59 (0.05)	12.99 (0.05)	21.92 (0.06)	-	6.59-21.92	6.38 (0.03)	12.82 (0.03)	21.57 (0.04)	-
β_T (%)	7.65 (0.08)	5.73 (0.06)	2.90 (0.04)	9.02 (0.09)	-	7.20 (0.09)	5.35 (0.07)	2.70 (0.05)	8.50 (0.10)
β_R (%)	5.05 (0.07)	3.75 (0.06)	1.86 (0.04)	5.55 (0.07)	-	4.75 (0.09)	3.53 (0.07)	1.76 (0.05)	5.36 (0.08)
β_L (%)	0.51 (0.01)	0.41 (0.01)	0.27 (0.01)	0.62 (0.01)	-	0.53 (0.01)	0.42 (0.01)	0.29 (0.01)	0.63 (0.01)
β_V (%)	12.82 (0.11)	9.67 (0.09)	4.98 (0.06)	14.68 (0.13)	-	12.13 (0.12)	9.10 (0.11)	4.71 (0.07)	14.03 (0.13)
T/R ratio	1.56 (0.02)	1.58 (0.03)	1.62 (0.03)	1.65 (0.02)	1.53 (0.02)	1.56 (0.03)	1.57 (0.03)	1.62 (0.05)	1.61 (0.02)
G_T (%/%)	-	-	-	-	0.311 (0.004)	-	-	-	0.296 (0.004)
G_R (%/%)	-	-	-	-	0.207 (0.003)	-	-	-	0.197 (0.003)
G_L (%/%)	-	-	-	-	0.016 (0.001)	-	-	-	0.016 (0.001)
G_V (%/%)	-	-	-	-	0.512 (0.005)	-	-	-	0.489 (0.005)
R-ratio ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	-	-	-	-	1.21 (0.01)	-	-	-	1.17 (0.01)
S (%/%)	-	-	-	-	0.279 (0.001)	-	-	-	0.276 (0.001)

†1.3 meter above ground level. Average of the values and Standard error of the mean (in parentheses). β_T tangential shrinkage, β_R radial shrinkage, β_L longitudinal shrinkage, β_V volumetric shrinkage, G_T differential tangential shrinkage ratio, G_R differential radial shrinkage ratio, G_L differential longitudinal shrinkage ratio, G_V differential volumetric shrinkage ratio, S sorption ratio.

Upper stem [†]	Regular Stands (TSF <150 years)			Irregular Stands (TSF >200 years)		
	Nº trees	14	10	Nº samples	149	127
Ring width (mm)		1.25 (0.05)		0.99 (0.05)		
Basic density (g cm^{-3})		0.423 (0.003)		0.414 (0.003)		
Oven-dry density (g cm^{-3})		0.496 (0.003)		0.479 (0.003)		
MOE (kN mm^{-2})		10.31 (0.15)		9.43 (0.16)		
MOR (N mm^{-2})		88.4 (1.0)		83.7 (1.0)		

Temperature (°C)	Sorption condition			Partial 30-85 6-18	Total 20 18	Partial 30-85 6-18	Total 20 18	Partial 30-85 6-18					
	30												
	30	65	85										
Nominal EMC (%)	6	12	18										
Actual EMC (%)	6.43 (0.05)	12.82 (0.06)	21.89 (0.07)	-	6.43-21.89	6.72 (0.05)	13.14 (0.05)	22.23 (0.07)					
β_T (%)	7.99 (0.09)	5.95 (0.07)	3.01 (0.05)	9.42 (0.10)	-	7.20 (0.07)	5.35 (0.06)	2.72 (0.04)					
β_R (%)	5.37 (0.07)	3.97 (0.06)	1.96 (0.03)	5.99 (0.05)	-	4.99 (0.07)	3.70 (0.06)	1.85 (0.04)					
β_L (%)	0.47 (0.01)	0.37 (0.01)	0.25 (0.01)	0.57 (0.01)	-	0.47 (0.02)	0.39 (0.01)	0.26 (0.01)					
β_V (%)	13.40 (0.12)	10.06 (0.09)	5.16 (0.06)	15.41 (0.12)	-	12.29 (0.10)	9.24 (0.09)	4.78 (0.07)					
T/R ratio	1.52 (0.02)	1.54 (0.03)	1.59 (0.04)	1.58 (0.02)	1.48 (0.02)	1.48 (0.02)	1.49 (0.03)	1.54 (0.03)					
G_T (%/%)	-	-	-	-	0.323 (0.003)	-	-	-					
G_R (%/%)	-	-	-	-	0.221 (0.003)	-	-	0.289 (0.003)					
G_L (%/%)	-	-	-	-	0.014 (0.001)	-	-	0.202 (0.003)					
G_V (%/%)	-	-	-	-	0.533 (0.005)	-	-	0.014 (0.001)					
R-ratio ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	-	-	-	-	1.26 (0.01)	-	-	0.485 (0.005)					
S (%/%)	-	-	-	-	0.281 (0.001)	-	-	1.18 (0.01)					

[†]Upper stem is the combination of 4, 7 and 10 meters above ground level. Average of the values and Standard error of the mean (in parentheses). β_T tangential shrinkage, β_R radial shrinkage, β_L longitudinal shrinkage, ρ_V volumetric shrinkage, G_T differential tangential shrinkage ratio, G_R differential radial shrinkage ratio, G_L differential longitudinal shrinkage ratio, G_V differential volumetric shrinkage ratio, S sorption ratio.

5.5.1 Exploratory analysis

Simple linear correlation analyses were conducted among parameters of dimensional stability (G_U), MOE, MOR, CA, D_b , and D_o separately for both stand structures (regular and irregular) and for two levels of height along the stem (1.3 m and upper stem). These revealed general trends in the data that helped detect relationships among variables as a first approach (results not shown). These analyses were made with three different groups of data, one considering data of all cambial ages, a second group considering cambial age until 20 years (juvenile wood) and another group for cambial age over 30 years (mature wood). In general, the simple correlation coefficients (r) between properties were higher for the first group (all data). This occurred because the range of values of wood properties were reduced when the total data set was divided into juvenile and mature woods. As a result, the subsequent analyses were performed considering the entire data set.

In most cases, the relationships between two individual variables were linear. However, it is known that the relationship between either physical (Dumail and Castera 1997; Peng et al. 2013; Torquato et al. Submitted 2020) or mechanical properties (Torquato et al. 2014; Auty et al. 2016) and cambial age (CA) tends to level-off at high values of CA. Thus, values of CA were transformed by applying a natural or neperian logarithm (Log) function in the multiple regression analysis. Logarithmically transformed variables in a regression model is a common way to handle situations where a non-linear relationship exists between the independent and dependent variables (Benoit 2011). As a result, Log CA produced normally distributed residuals and better model statistics (higher coefficients of determination (R^2) and lower coefficient of variation (CV)).

The regression models of the exploratory analysis were evaluated in terms of R^2 , AIC, and CV. Higher R^2 and lower AIC and CV indicated better predictive models. All models that explain G_U , MOE and MOR variations were statistically significant at the 0.01 probability level. The multiple regression equations of differential shrinkage ratios (G_U), MOE, and MOR for the two stand structures (regular and irregular) and two levels of height along the stem (1.3 m and upper stem) are given in Tables 5.4 to 5.8.

To avoid collinearity issues, regression models of G_U were developed including separately MOE or MOR as well as CA and D_b or D_o . The various tested regressions for G_U (G_V , G_T , G_R) showed that those containing MOE instead of MOR were better, having higher values of R^2 . Therefore, only equations including MOE presented in Tables 5.4 to 5.6 were considered in the following discussion. Regression models of MOE and MOR were developed considering the effect of G_V , CA, and wood density. The correlations between all variables and preliminary regression analyses showed that the contribution of oven-dry density (D_o) as explanatory variable was greater than that of basic density (D_b) in all models. Thus, the oven-dry density was preferred to basic density as a predictive variable for all models.

5.5.2 Multiple regression equations for differential shrinkage ratios (G_U)

Multiple regression equations of the differential radial shrinkage ratio (G_R) are shown in Table 5.4. The retained models explained from 30% to 44% of the total variation in G_R for regular stands and from 21% to 31% for irregular stands. G_R models for regular stands were slightly better than G_R models for irregular stands. The coefficients of variation (from 11% to 16%) suggest that, in general, these equations may be used for predictive purposes. A CV lower than 15% is desirable to use a model for prediction (Hernández et al. 2014). For both stand types, the cambial age was generally the most important variable of G_R , positively affecting it. The beta coefficients show that CA accounted for about 55% in regular stands, and 51% in irregular stands, of the variation explained by the multiple regressions (two regressions pooled: i.e., 44% of contribution from CA at 1.3 m and 66% of contribution from CA at upper stem). The wood density (D_o) was the second variable affecting G_R positively, and it explained 24% of the variation in regular stands and 50% in irregular stands (two multiple regressions pooled). MOE played a less important role in regular stands, explaining 21% of G_R variation (two G_R multiple regressions pooled). Therefore, the dimensional stability of black spruce wood in the radial direction principally improves (G_R decreases) as CA and D_o decrease.

Table 5.4 Regression equations of the differential radial shrinkage G_R (%%) of black spruce wood as a function of cambial age (CA), oven-dry density (D_o), and modulus of elasticity (MOE) for regular and irregular stands, by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m).

Stand structure	Equations	R^2 (%)	CV (%)
Regular (1.3 m)	$G_R = 0.07 + 0.014 \log CA + 0.14 D_o + 0.003 MOE$ (0.29) (0.19) (0.18) [44%] [29%] [27%]	30.0	15.7
Irregular (1.3 m)	$G_R = 0.06 + 0.013 \log CA + 0.16 D_o$ (0.32) (0.26) [55%] [45%]	20.8	14.0
Regular (Upper stem)	$G_R = 0.08 + 0.027 \log CA + 0.18 D_o - 0.003 MOE$ (0.70) (0.20) (-0.16) [66%] [19%] [15%]	43.6	10.8
Irregular (Upper stem)	$G_R = 0.01 + 0.34 D_o + 0.011 \log CA$ (0.37) (0.31) [54%] [46%]	31.3	13.1

Numbers in parentheses corresponds to the beta coefficients of the regression. Numbers in square brackets refer to the relative contribution of each explanatory variable to the explained G_R variation.

Multiple regression models of the differential tangential shrinkage G_T are shown in Table 5.5. The retained models explained from 59% to 60% of the total variation in G_T for regular stands and from 49% to 61% for irregular stands. Higher R^2 and lower CV statistics indicated better predictive models for G_T than for G_R . Considering these same statistics, regressions for regular stands were also slightly better than those for irregular stands. The low coefficients of variation (from 7% to 9%) suggest that all equations may be used for prediction. For both stand structures, the MOE was the most important variable for G_T , positively affecting it. The beta coefficients showed that MOE accounted for about 61% of the variation of G_T in regular stands, and 62% in irregular stands (two multiple regressions pooled). The cambial age was the second variable affecting positively G_T . For both stand types, the CA variable accounted for 32% of the variation explained by the multiple regressions (two regressions pooled). A less important role was played by D_o in regular stands, with a contribution of 13% of the variation explained by the multiple regressions (two regressions pooled). Therefore, the dimensional stability of black spruce wood in the tangential direction principally improves (G_T decreases) as MOE and CA decrease.

Table 5.5 Regression equations of the differential tangential shrinkage G_T (%/%) of black spruce wood as a function of modulus of elasticity (MOE), cambial age (CA), and oven-dry density (D_o), for regular and irregular stands, by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m).

Stand structure	Equations			R^2 (%)	CV (%)	
Regular (1.3 m)	$G_T = 0.20 + 0.012 \text{ MOE} + 0.014 \log \text{CA} - 0.11 D_o$	(0.64) [62%]	(0.25) [24%]	(-0.14) [14%]	58.5	9.2
Irregular (1.3 m)	$G_T = 0.15 + 0.013 \text{ MOE} + 0.007 \log \text{CA}$	(0.66) [80%]		(0.16) [20%]	61.3	7.4
Regular (Upper stem)	$G_T = 0.16 + 0.011 \text{ MOE} + 0.017 \log \text{CA}$	(0.50) [60%]		(0.34) [40%]	59.7	8.0
Irregular (Upper stem)	$G_T = 0.22 + 0.009 \text{ MOE} + 0.018 \log \text{CA} - 0.14 D_o$	(0.44) [44%]	(0.43) [43%]	(-0.13) [13%]	49.3	8.1

Numbers in parentheses correspond to the beta coefficients of the regression. Numbers in square brackets refer to the relative contribution of each independent variable to the explained G_T variation.

Multiple regressions of the differential volumetric shrinkage G_v are shown in Table 5.6. Changes in volume normally reflect the combined effects of radial and tangential directions of wood. Thus, the retained models explained from 59% to 66% of the total variation in G_v for regular stands and from 55% to 56% for irregular stands. Higher R^2 and lower CV statistics indicated that volumetric stability (G_v) was better described than directional stability (G_R and G_T). The low coefficients of variation (from 6% to 8%) suggest that all equations may be used for predictive purposes. The two most important explanatory variables in the models were the MOE and cambial age, which both positively affected G_v . MOE was the main factor for regular and irregular stands at breast height, while cambial age had more effect than MOE at upper stem positions for both stand structures. The beta coefficients showed that in both stand structures, MOE accounted for about 42%, in both stand structures, of the variation explained by the multiple regressions (two regressions pooled). Simple linear regressions showed that MOE alone explained 44–54% of the variation in G_v (Figure 5.1). The cambial age was the second variable affecting positively G_v . The CA variable accounted for 52%, in regular stands, and 42%, in irregular stands, of the variation explained by the

multiple regressions (two regressions pooled). CA explained 45–60% of the variation in Gv (Figure 5.2).

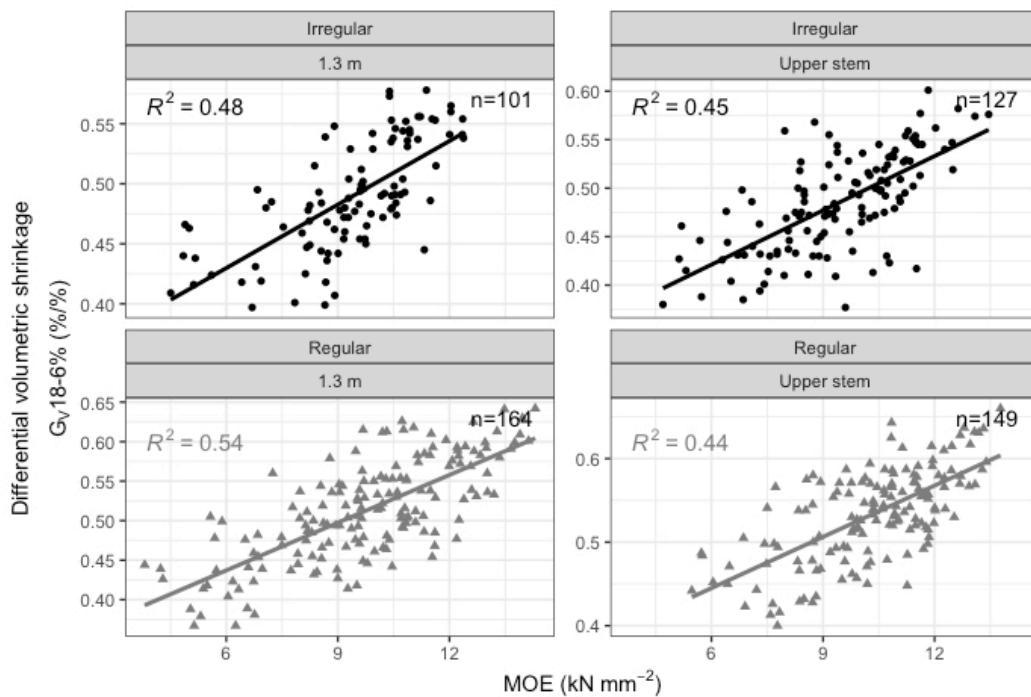


Figure 5.1 Relationship between differential volumetric shrinkage (Gv) and modulus of elasticity (MOE) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R² values were calculated from simple regression models.

The equations show that black spruce wood with lower MOE is more stable than wood with higher MOE in terms of changes in volume. In fact, higher stiffness is related to lower dimensional stability of wood, since, normally, radial and tangential shrinkage have a positive and linear relationship with MOE (Ivković et al. 2009; Shmulsky and Jones 2011). Wood oven-dry density (D_o) was also present in three of the four regressions, positively affecting Gv. Denser wood showed lower dimensional stability, even though the effect of density on Gv was low (Figure 5.3). To sum up, the retained multiple regression models explained from 21% to 66% of the total variation in the differential G_U. The coefficients of variation (from 6% to 16%) suggest that practically all fitted models may be used for prediction.

Table 5.6 Regression equations of the differential volumetric shrinkage G_v (%/%) of black spruce wood as a function of modulus of elasticity (MOE), cambial age (CA), and oven-dry density (D_o), for regular and irregular stands, by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m).

Stand structure	Equations			R^2 (%)	CV (%)
Regular (1.3 m)	$G_v = 0.29 + 0.013 \text{ MOE} + 0.027 \log \text{CA}$ (0.49) (0.34) [59%] [41%]			59.4	7.9
Irregular (1.3 m)	$G_v = 0.22 + 0.001 \text{ MOE} + 0.020 \log \text{CA} + 0.18 D_o$ (0.41) (0.31) (0.20) [45%] [34%] [21%]			56.3	6.3
Regular (Upper stem)	$G_v = 0.24 + 0.040 \log \text{CA} + 0.007 \text{ MOE} + 0.21 D_o$ (0.60) (0.23) (0.14) [62%] [24%] [14%]			66.2	6.0
Irregular (Upper stem)	$G_v = 0.25 + 0.025 \log \text{CA} + 0.009 \text{ MOE} + 0.14 D_o$ (0.42) (0.33) (0.10) [49%] [39%] [12%]			55.1	7.1

Numbers in parentheses correspond to the beta coefficients of the regression. Numbers in square brackets refer to the relative contribution of each independent variable to the explained G_v variation.

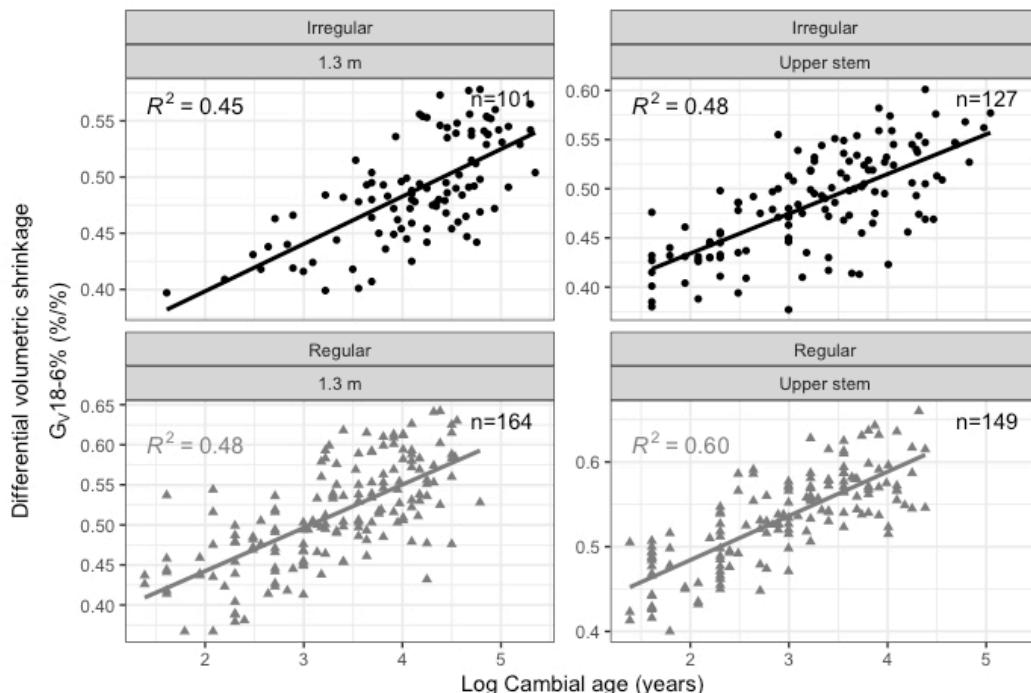


Figure 5.2 Relationship between differential volumetric shrinkage (G_v) and cambial age (CA) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R^2 values were calculated from simple regression models.

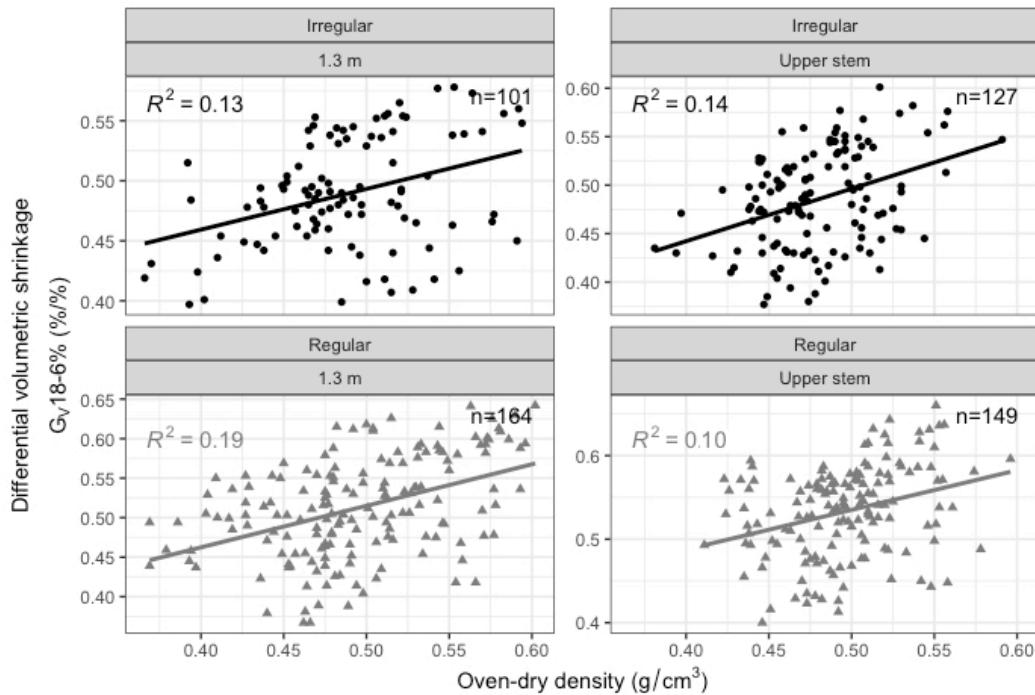


Figure 5.3 Relationship between differential volumetric shrinkage (G_v) and oven-dry density (D_o) at 1.3 m and at the upper stem for regular and irregular stands. R² values were calculated from simple regression models.

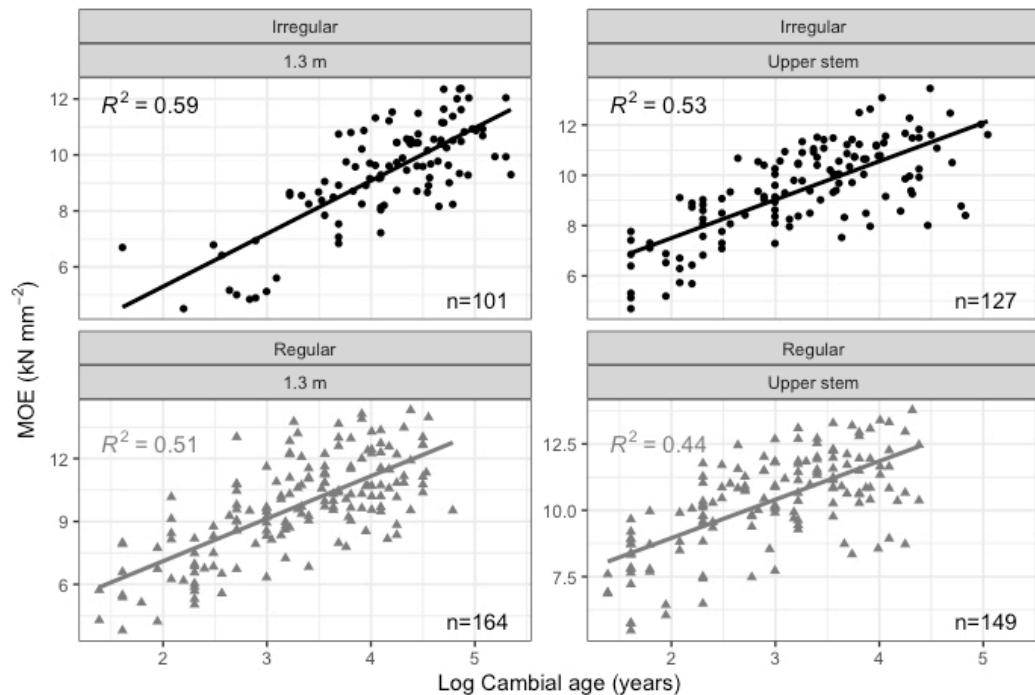


Figure 5.4 Relationship between modulus of elasticity (MOE) and cambial age (CA) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R² values were calculated from simple regression models.

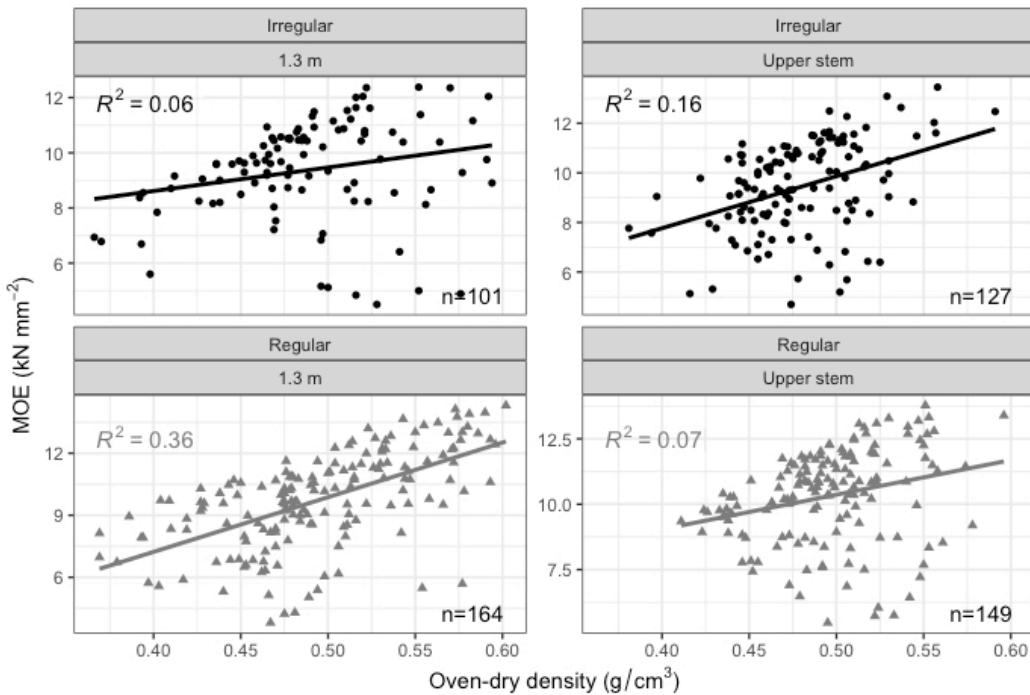


Figure 5.5 Relationship between modulus of elasticity (MOE) and oven-dry density (D_o) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R^2 values were calculated from simple regression models.

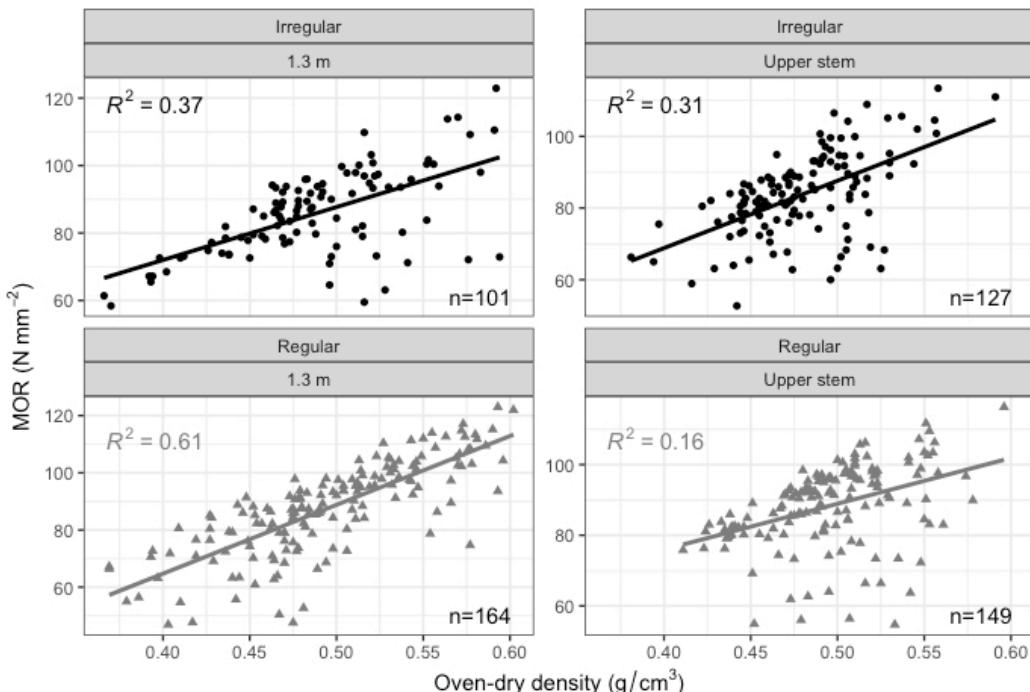


Figure 5.6 Relationship between modulus of rupture (MOR) and oven-dry density (D_o) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R^2 values were calculated from simple regression models.

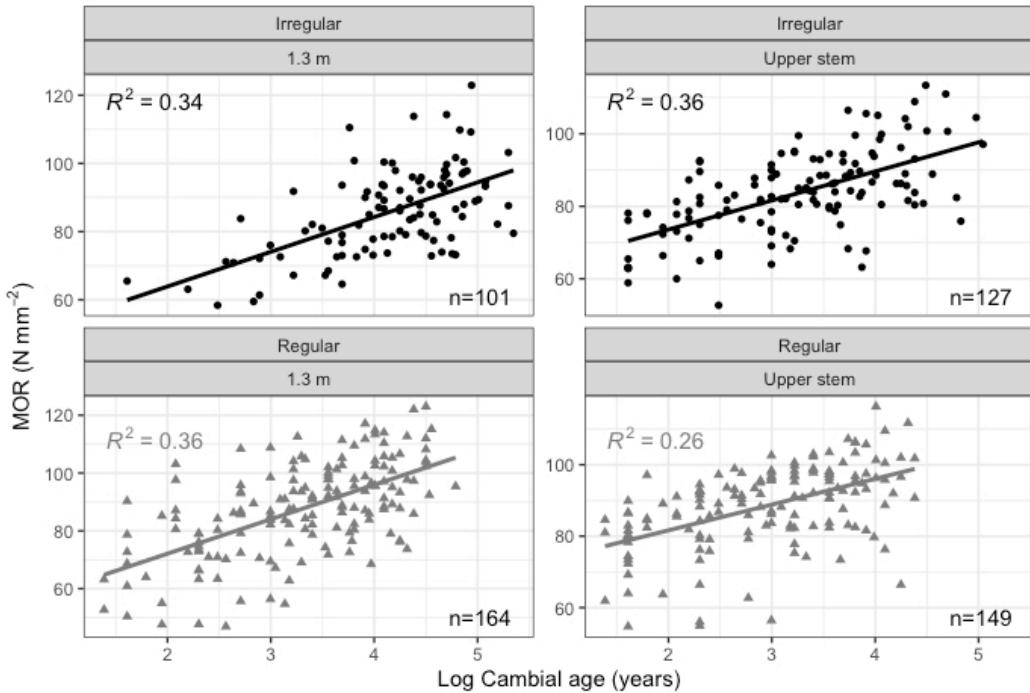


Figure 5.7 Relationship between modulus of rupture (MOR) and cambial age (CA) at 1.3 m and the upper stem for regular and irregular stands. R^2 values were calculated from simple regression models.

5.5.3 Multiple regression equations for MOE and MOR

Differences between stand structures were observed for MOE and MOR mean values and are presented in Table 5.3. As already shown in a previous work (Torquato et al. 2014), both MOE and MOR were higher in regular than irregular stands for a given cambial age, showing a tendency to increase rapidly in the first 30 to 50 annual rings before stabilising. Generally, the observed radial trends in mechanical properties were similar to those reported in other spruce species (Wollcott et al. 1987; Alteyrac et al. 2006; Kuprevicius et al. 2013). The multiple regression models of the MOE are shown in Table 5.7. The retained models explained from 50% to 70% of the total variation in MOE for regular stands and from 60% to 65% for irregular stands. Higher R^2 and lower CV statistics indicated better predictive models for irregular stands. Regression analyses using the R-ratio instead of Gv as independent variable produced similar results (not shown). The low coefficients of variation (from 12% to 13%) suggest that all fitted models may be used for predictive purposes. For both stand types, cambial age was the most important variable explaining the variation in MOE, positively affecting it. This confirms the results of previous studies reporting the high

relationships between stiffness and cambial age in black spruce wood (Alteyrac et al. 2006; Torquato et al. 2014). The beta coefficients showed that CA variation accounted for about 42% in regular stands, and 59% in irregular stands, of the variation explained by the multiple regressions (two regressions pooled). Simple linear regressions showed that CA alone explains from 44% to 59% of the variation in MOE (Figure 5.4). The differential volumetric shrinkage G_v was the second variable affecting positively MOE (Figure 5.1). The beta coefficients showed that G_v variation accounted for 38% in regular stands, and 35% in irregular stands, of the variation explained by the multiple regressions (two regressions pooled). As indicated before, wood samples with higher stiffness will show higher changes in dimensions with changes in moisture content. A less important role was played by D_o in both stands, with an average contribution of 14% of the explained variation by the multiple regressions (all regressions pooled) (Table 5.7). Simple linear regressions confirm that D_o alone only explains between 6% and 36% of the variation in MOE (Figure 5.5). Therefore, the axial stiffness of wood will increase as wood density and cambial age increase, which will reduce dimensional stability of wood. The minor contribution of wood density to the regression model confirms that this property is not a good predictor of MOE in black spruce.

The multiple regression models for MOR in static bending are presented in Table 5.8. The retained models explained from 37% to 73% of the total variation in MOR for regular stands and from 53% to 59% for irregular stands. Higher R^2 and lower CV statistics indicated better predictive models for irregular stands. Regression analyses using the R-ratio instead of G_v as independent variable produced similar results (not shown). The low coefficients of variation (between 10% and 11%) demonstrate that the retained models can be useful for predictive purposes. For both stand types, and in contrast with G models, the wood density was in this case generally the most important variable explaining the variation in MOR, positively affecting it (Table 5.8). This confirms the results of previous studies reporting the strong relationships between strength and wood density, even between wood samples of a single species. For instance, wood density was a better descriptor for MOR than for MOE of black spruce wood tested at 10°C and 20°C at the green state (Hernández et al. 2014). The beta coefficients showed that oven-dry density (D_o) variation accounted for about 51% in regular stands, and 44% in irregular stands, of the variation explained by the multiple regressions (two regressions pooled). Simple linear regressions show that D_o alone explains

between 16% and 36% of the variation in MOR (Figure 5.6). The cambial age was the second variable affecting positively MOR (Table 5.8). Alteyrac et al. (2006) and Torquato et al. (2014) have reported strong relationships between wood strength and cambial age in black spruce wood. The beta coefficients showed that CA accounted for 38% in regular stands, and 35% in irregular stands, of the variation explained by the multiple regressions (two regressions pooled). Simple linear regressions indicate that CA alone explains between 26% and 36% of the variation in MOR (Figure 5.7). A lower effect of G_v on MOR was observed for both stands, with an average contribution of 16% of the explained variation by the multiple regressions (all regressions pooled). Therefore, MOR will increase as oven-dry density increases and as samples come closer to the bark. MOR will also increase as dimensional stability of wood decreases.

Table 5.7 Regression equations of the modulus of elasticity (MOE) of black spruce wood as a function of cambial age (CA), differential volumetric shrinkage G_v (%/%), and oven-dry density (D_o), for regular and irregular stands by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7, and 10 m).

Stand structure	Equations	R^2 (%)	CV (%)
Regular (1.3 m)	$MOE = -7.0 + 1.0 \log CA + 13 G_v + 14 D_o$ (0.36) (0.34) (0.32) [36%] [33%] [31%]	70.0	13.1
Irregular (1.3 m)	$MOE = -2.5 + 1.4 \log CA + 13 G_v$ (0.55) (0.32) [63%] [37%]	64.5	11.6
Regular (Upper stem)	$MOE = -0.2 + 0.8 \log CA + 11 G_v + 4 D_o$ (0.38) (0.34) (0.09) [47%] [42%] [11%]	50.4	12.3
Irregular (Upper stem)	$MOE = -2.1 + 1.0 \log CA + 11 G_v + 6 D_o$ (0.48) (0.30) (0.12) [54%] [33%] [13%]	59.7	12.5

Numbers in parentheses correspond to the beta coefficients of the regression. Numbers in square brackets refer to the relative contribution of each independent variable to the explained MOE variation.

The results of the multiple regression analyses have shown the strong relationships among the physical properties and cambial age. The cambial age confirmed its important influence on the dimensional stability and on MOE and MOR in static bending. Wood stiffness had a direct effect on the shrinkage values of wood. Thus, stiffer samples were associated with higher changes in shrinkage coefficients, which led to lower dimensional stability in

tangential and radial directions, and in volume. Dimensional stability decreased because MOE and MOR increased as cambial age increased. Results also showed that the intraspecific variation in wood density was not large enough to make it a good predictor of shrinkage properties and MOE. Density was only important for analyzing the strength properties (MOR) of black spruce wood.

Table 5.8 Regression equations of the modulus of rupture (MOR) of black spruce wood as a function of oven-dry density (D_o), cambial age (CA), and differential volumetric shrinkage G_v (%/%) for regular and irregular stands by stem position (at breast height, 1.3 m, and combined upper stem at 4, 7 and 10 m).

Stand structure	Equations	R^2 (%)	CV (%)
Regular (1.3 m)	MOR = - 35 + 200 D_o + 7 log CA (0.65) (0.36) [64%] [36%]	72.7	9.6
Irregular (1.3 m)	MOR = - 20 + 120 D_o + 6 log CA + 43 G_v (0.47) (0.37) (0.15) [48%] [37%] [15%]	59.1	9.6
Regular (Upper stem)	MOR = 10 + 5 log CA + 94 D_o + 34 G_v (0.33) (0.29) (0.16) [42%] [37%] [21%]	36.9	10.5
Irregular (Upper stem)	MOR = - 16 + 121 D_o + 4 log CA + 60 G_v (0.36) (0.29) (0.26) [40%] [32%] [28%]	53.2	9.7

Numbers in parentheses correspond to the beta coefficients of the regression. Numbers in square brackets refer to the relative contribution of each independent variable to the explained MOR variation.

Estimation of mechanical properties from shrinkage, or the inverse estimation, is quite statistically possible, provided a good correlation. The shrinkage or change in dimension is actually a response to internal mechanical stress caused by the change in moisture content in the wood. There is indeed a direct physical link that the wood shrinkage is affected by the MOE. But the MOE is not physically affected by the shrinkage, but rather by the anatomical structure of the wood. On the other hand, because destructive methods for the estimation of wood quality properties of standing trees such as wood density, dimensional stability, MOE, and MOR are time-consuming and expensive, it might be possible to reduce the number of measured properties by making use of the relationships between them. However, the estimates in this study do not consider cause-effect relationships but instead identify which

is better from a statistical point of view (better CV and R^2) and also from a practical point of view (which is easier to do). The results of the R^2 coefficients, and mainly the CV values of Tables 5.4 to 5.8, indicate that it is preferable to predict the dimensional stability from measurements of MOE and cambial age. The coefficients of variation of G_T and G_v models were the smallest, which will result in smaller confidence intervals of the estimates, and as such more accurate predictions.

5.6 Conclusion

Despite the influence of the age on wood properties of the tree, no studies were previously available on the relationships between cambial age, dimensional stability and mechanical properties, especially on wood coming from different stand structures. The trends in this study showed that black spruce wood from irregular stands is slightly more stable than wood from regular stands. These trends remained along the entire radial profiles and for all positions along the stem. This study shows that it is possible to estimate the dimensional stability and mechanical properties from the measurements of cambial age and wood density. The analysis was performed by integrating the effects of tree growth, position along the stem, and stand structures on the physical and mechanical properties, through correlation, and simple and multiple regression analyses. Cambial age was the dominant predictive factor among those studied. The mechanical properties of MOE and MOR can be estimated from the cambial age, wood density, and the differential volumetric shrinkage (G_v). The models for estimating MOE were better than those for MOR. Moreover, the variation in MOE was greatly explained by the G_v variation. The coefficients of variation (CV) were even smaller for the equations to estimate the dimensional stability parameters (G_T , G_v), using cambial age, wood density, and MOE as predictive variables, than the equations estimating mechanical properties. The lower CVs ensure the models best quality since the confidence intervals are smaller. It is therefore preferable to estimate dimensional stability from MOE measurements than the opposite.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de thèse était de modéliser les patrons de variation des propriétés de flexion et de stabilité dimensionnelle du bois à l'intérieur de l'arbre en fonction de différents paramètres, soit principalement l'âge cambial, la hauteur dans la tige et la largeur des cernes. L'effet de la structure de peuplement sur les propriétés physico-mécaniques du bois, d'origine naturelle, régénéré par influence du feu, a été également considéré pour examiner les différences entre les types de structures équienne (régulier) et inéquienne (irrégulier). L'étude a porté sur l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P) provenant de peuplements réguliers et irréguliers localisés à la Côte-Nord, dans la région de L'Abitibi-Témiscamingue et dans la région du Lac-Saint-Jean au Québec, Canada. Cette étude a utilisé une approche de modélisation statistique pour rapporter les mesures de résistance à la flexion, de rigidité et de stabilité dimensionnelle à des variables telles que l'âge cambial et le taux de croissance annuel. Les peuplements ont été échantillonnés en tenant compte du temps depuis le dernier feu qui a régénéré le peuplement, car cet évènement naturel est connu pour influencer la structure du peuplement et la croissance des arbres.

Les principales conclusions seront présentées selon les trois volets principaux de cette étude, soit:

- Le développement des modèles à effets mixtes non linéaires pour décrire la variation intra-arbre du MOE et du MOR du bois d'épinette noire, influencée par l'âge cambial (CA) et la largeur des cernes de croissance (RW).
- Le développement des modèles à effets mixtes non linéaires pour décrire la variation intra-arbre pour deux critères de stabilité dimensionnelle, soit les coefficients G_U et m (R-ratio), influencés par l'âge cambial (CA).
- L'analyse de la relation entre les propriétés de stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques en flexion en tenant compte des deux types de structure de peuplement, de l'âge cambial et de la masse volumique du bois.

Pour le premier volet :

Cette étude a quantifié la variation radiale du MOE et du MOR des échantillons de bois sans défauts de l'épinette noire provenant de peuplements réguliers et irréguliers. L'âge cambial explique une grande partie de la variation des propriétés mécaniques en direction radiale, avec une influence additionnelle de la largeur des cernes. Cependant, après la prise en compte de ces variables, des différences subsistaient entre les deux peuplements, c'est-à-dire que le MOE et le MOR étaient plus élevés dans le bois provenant des peuplements de structure régulière. Les différences furent moins prononcées dans le haut de la tige qu'à hauteur de poitrine. Une possible explication est que les propriétés mécaniques dans des peuplements irréguliers peuvent être affectées par un faible volume de bois de compression, qui peut être présent dans les arbres issus de marcottes ou dans des arbres soumis à des stimuli mécaniques (flexion, générée par le vent, par exemple) plus importants et plus complexes.

Pour le deuxième volet :

En suivant des procédures de modélisation similaires à l'étude précédente (volet 1), cette étude portait sur l'évaluation de la variation radiale de Gv et le facteur m (R-ratio). La variation des propriétés de stabilité dimensionnelle a aussi été expliquée en grande partie par l'âge cambial, avec une influence encore limitée de la largeur des cernes annuels. Des différences significatives de stabilité dimensionnelle ont été perçues entre les peuplements d'origine récente et ceux qui n'avaient pas été perturbés par un feu depuis plus de 200 ans. Ce résultat a été similaire à celui obtenu dans le volet 1 pour les propriétés mécaniques. Avec une stabilité hygroscopique et une masse volumique similaires, le bois provenant des peuplements irréguliers était plus stable dimensionnellement que le bois provenant des peuplements réguliers. Certaines hypothèses ont été proposées pour expliquer ces différences de stabilité dimensionnelle entre les deux structures de peuplements. Les propriétés de retrait peuvent être affectées par les patrons de variation intra-cernes de la masse volumique du bois. Les arbres à croissance lente issus de peuplements irréguliers peuvent produire du bois final moins dense, ce qui tendrait à augmenter la stabilité dimensionnelle du matériau et, par le fait même, diminuer la rigidité et comportement à la rupture du bois. Ces résultats pourraient avoir des implications pratiques pour la prise de décision en matière de gestion forestière et d'allocation du bois. La sélection de peuplements forestiers pour produire du bois d'épinette

noire ayant une stabilité dimensionnelle élevée ou des propriétés mécaniques élevées émerge comme une option intéressante à considérer par les aménagistes forestiers.

Pour le troisième volet :

Les relations entre les propriétés physiques et mécaniques du bois d'épinette noire pour les deux types de peuplement ont été étudiées dans le troisième volet du projet. Malgré l'influence de l'âge cambial sur les propriétés du bois de l'arbre, aucune étude n'avait été consacrée aux relations entre l'âge cambial, la stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques, en particulier sur le bois provenant de différents types de peuplement. L'analyse a été réalisée en intégrant les effets de la croissance des arbres, la position le long de la tige, les caractéristiques structurelles du peuplement et leurs variations dans les propriétés physiques et mécaniques, à travers une analyse statistique et une évaluation des corrélations entre les diverses variables. Les résultats de ce volet montrent qu'il est possible d'estimer les paramètres de stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques à partir des mesures de la masse volumique du bois et de l'âge cambial. Les analyses de régression effectuées pour ces propriétés ont montré que l'âge cambial est un facteur dominant parmi ceux étudiés pour expliquer les variations. Les propriétés mécaniques du MOE et du MOR peuvent être estimées à partir de l'âge cambial, de la masse volumique du bois et du retrait volumétrique différentiel (G_v). Les modèles d'estimation du MOE étaient meilleurs que ceux du MOR. De plus, la variation du MOE était largement expliquée par la variation de G_v . Les coefficients de variation (Cv) étaient encore plus petits pour les équations permettant d'estimer les paramètres de stabilité dimensionnelle (G_T , G_v), en utilisant l'âge cambial, la masse volumique du bois et le MOE comme variables prédictives, que les équations estimant les propriétés mécaniques. Les faibles CV garantissent la meilleure qualité des modèles puisque les intervalles de confiance sont plus étroits. Ainsi, la prédiction des paramètres de stabilité dimensionnelle à partir des mesures de MOE et de l'âge cambial doit être privilégiée plutôt que l'inverse.

En résumé, le travail de modélisation a permis de tirer les principales conclusions suivantes:

- L'âge cambial est clairement la source la plus importante de la variation en direction radiale des propriétés du bois, lequel pourrait être utilisé comme variable prédictive.

À cet égard, il s'agit du facteur le plus important à prendre en compte lorsqu'il s'agit de caractériser les propriétés physiques et mécaniques de différentes structures de peuplements d'épinette noire.

- La largeur des cernes annuels a eu une influence additionnelle faible pour expliquer les variations des propriétés mécaniques et des propriétés de stabilité dimensionnelle.
- Normalement, les propriétés mécaniques sont plus élevées lors d'une croissance lente en raison de la largeur du bois final qui demeure plus ou moins constante dans le cerne annuel. Au contraire, les résultats ont montré que les arbres à croissance plus rapide des peuplements réguliers avaient des propriétés mécaniques supérieures, et étaient moins stables du point de vue dimensionnel. Ces différences étaient plus importantes à hauteur de poitrine. Donc, l'hypothèse initialement présentée que les propriétés du bois sont meilleures dans les peuplements irréguliers a été rejetée.
- Les différences de propriétés physico-mécaniques du bois entre les types de peuplements peuvent également être attribuables à la présence de bois de compression modéré. Ce bois de réaction peut être présent dans les arbres issus de marcottes ou dans des arbres soumis à des stimuli mécaniques (flexion, générée par le vent, par exemple) plus importants et plus complexes.
- Les mesures de la masse volumique du bois et de l'âge cambial peuvent être utilisées pour estimer les paramètres de stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques.
- La prédiction des paramètres de stabilité dimensionnelle à partir des mesures du MOE et l'âge cambial est préférable par rapport à la prédiction du MOE à partir des mesures de stabilité dimensionnelle.
- Afin d'obtenir un outil complet de simulation de la qualité du bois pour l'épinette noire, des recherches plus poussées seront nécessaires pour caractériser les cernes de croissance à l'échelle cellulaire afin de mieux comprendre les mécanismes de formation du bois préconisés par l'arbre pour optimiser son allocation de carbone afin de s'adapter à son environnement. Notamment, les hypothèses suggérées pour expliquer les résultats montrent que davantage de recherches sur la composition

ultrastructurale et chimique de la paroi cellulaire du bois en relation avec l'environnement de croissance de l'arbre sont nécessaires pour élucider ces interactions complexes.

- La sélection de peuplements forestiers produisant du bois d'épinette noire pour une stabilité dimensionnelle élevée ou des propriétés mécaniques élevées est également une option intéressante qui découle des résultats de ce travail.
- Enfin, basée sur les résultats de la présente étude, la modélisation des propriétés du bois d'épinette noire en fonction de l'âge cambial s'est avérée suivre un modèle radial typique qui peut être décrit à l'aide d'une fonction Weibull à 2 paramètres modifiée.

Finalement, des connaissances approfondies sur l'influence de la structure du bois sur ces propriétés physico-mécaniques sont fondamentales pour une utilisation adéquate du bois comme matériau de structure qui se veut renouvelable. Cette étude souligne le fait que la modélisation de propriétés physiques et mécaniques peut être appliquée à des peuplements naturels, et pourrait être utilisée pour optimiser non seulement la croissance des arbres par la sylviculture, mais aussi les propriétés du bois sans défauts. Ces résultats pourraient avoir des implications pratiques pour la prise de décision en matière de gestion forestière et d'allocation du bois.

Recommandations

L’industrie forestière est un moteur économique du Québec et l’épinette noire représente la première essence en importance en ce qui a trait aux possibilités forestières et commerciales dans la province. Cette affirmation justifie la recherche pour maximiser la valeur de la ressource forestière, de développer de nouveaux produits à valeur ajoutée et d’optimiser par le fait même l’utilisation des ressources forestières. En plus, des améliorations sont indispensables pour renforcer la compétitivité de l’industrie sur le marché et propulser son expansion.

Les études avec des modèles prédictifs pour relier les influences des traitements sylvicoles ou l’intégration des conditions de croissance sur les propriétés du bois avec la valeur finale des produits sont d’excellents exemples de stratégies à cet effet. À cet égard, la modélisation des propriétés physiques et mécaniques du bois dans l’arbre montre également son potentiel pour l’innovation et sa contribution afin de favoriser le développement d’une industrie concurrentielle, diversifiée et axée sur la valeur ajoutée.

Dans le contexte de cette étude, certains aspects ont été identifiés comme très pertinents tels que ceux présentés ci-dessous:

- Malgré l’interrelation entre les propriétés physiques et mécaniques du bois et des effets connus de variables telles que l’âge cambial sur celles-ci, il n’y a pas d’étude disponible comparant les résultats pour les coefficients de Gv et du facteur m (R-ratio), ou ces relations avec les propriétés mécaniques, en particulier sur le bois provenant de différentes localisations. Des études comparant les relations entre ces propriétés, y compris les différents types de peuplements, seraient intéressantes.
- Les efforts de recherche dans le futur doivent non seulement se concentrer sur d’autres propriétés du bois telles que la longueur des trachéides et l’angle des microfibrilles qui peut indiquer la présence de bois de compression, mais aussi sur la physiologie et la génétique globale de l’arbre afin de mieux comprendre la réponse photosynthétique et l’allocation du carbone dans la tige en relation avec l’environnement de croissance et l’âge de l’arbre. Une meilleure connaissance fondamentale des processus qui

gouvernent la composition ultrastructurale et chimique des parois cellulaires et la variation des cellules du bois à l'intérieur des cernes annuels permettra de raffiner les modèles de prédiction des propriétés du bois dans le futur.

- Ce projet permet de mieux comprendre la distribution des propriétés du bois à l'intérieur des tiges afin d'optimiser le sciage, afin d'évaluer son potentiel pour la fabrication de produits d'ingénierie, c'est-à-dire d'optimiser les pratiques sylvicoles en vue de la production de produits appliquée dans la construction.
- Finalement, il fournira un outil pratique et facile d'utilisation pour les gestionnaires forestiers.

En bref, il s'agit de la modernisation de la gestion forestière qui cherche à intégrer des modèles et des connaissances déjà existants. Le modèle développé dans ce travail devrait encourager l'utilisation du bois qui correspond le mieux aux caractéristiques de la transformation de l'entreprise et aux besoins des clients à travers des simulations et optimisation des propriétés du bois. Celui-ci devra être un outil facilitateur d'intégration et de prédiction des propriétés du bois pour application directe. D'une manière plus importante, il doit être accessible aux gestionnaires forestiers de façon à optimiser les décisions sylvicoles en fonction des produits finaux de haute qualité.

Bibliographie

- Achim, A., Paradis, N., Carter, P. and Hernández, R.E. 2011. Using acoustic sensors to improve the efficiency of the forest value chain in Canada: a case study with laminated veneer lumber. *Sensors* 11(6):5716-5728.
- Alteyrac, J., Zhan, S.Y., Cloutier, A. and Ruel, J-C. 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.
- Alteyrac, J., Cloutier, A., Ung, C.-H. and Zhang, S.Y. 2006. Mechanical properties in relation to selected wood characteristics of black spruce. *Wood Fiber Sci.* 38(2):229-237.
- Antal, M. and Micko, M.M. 1994. Variation and field estimation of wood quality parameters for black spruce. *Holzforsch. Holzverw.* 46(4):70-72.
- ASTM. 2007. ASTM D143-94. Standard test methods for small clear specimens of timber. ASTM international, Baltimore, USA. 31p.
- Arévalo, R. and Hernández, R.E. 2001. Influence of moisture sorption on swelling of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) wood. *Holzforschung* 55(6):590-594.
- Aubry, C.A., Adams, W.T. and Thomas, D.F. 1998. Determination of relative economic weights for multtrait selection in coastal Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 28:1164-1170.
- Auty, D. and Achim, A. 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(4):475-487.
- Auty, D., Gardiner, B.A., Achim, A., Moore, J.R. and Cameron, A.D. 2013. Models for predicting microfibril angle variation in Scots pine. *Ann. For. Sci.* 70(2):209-218.
- Auty, D., Achim, A., Macdonald, E., Cameron, A.D. and Gardiner, B.A. 2016. Models for predicting clearwood mechanical properties of Scots pine. *For. Sci.* 62:403-413.
- Auty, D., John Moore J., Achim, A., Lyon A., Mochan S. and Gardiner, B.A. 2018. Effects of early respacing on the density and microfibril angle of Sitka spruce wood. *Forestry* 91:307-319.
- Baayen, R.H., Davidson, D.J. and Bates, D.M. 2008. Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items. *J. Mem. Lang.* 59(4):390-412.
- Bannan, M.W. 1965. The length, tangential diameter, and length/width ratio of conifer tracheids. *Can. J. Bot.* 43(8):967-984.
- Barbour, R.J. and Kellogg, R.M. 1990. Forest management and end-product quality: a Canadian perspective. *Can. J. For. Res.* 20(4):405-414.

- Barrette, J., Pothier, D. and Ward, C. 2013. Temporal changes in stem decay and dead and sound wood volumes in the northeastern Canadian boreal forest. *Can. J. For. Res.* 43(3):234-244.
- Beaudoin, M., Benabdallah, B. et Stevanovic, T. 2009. Propriétés fondamentales du bois. Ch. 29 dans Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. *Manuel de Foresterie*, 2eéd. Ouvrage collectif, Éditions MultiMondes, Québec, pp.1325-1364.
- Beaudoin M., Masanga B.O., Poliquin, J. and Beauregard, R.L. 1989. Physical and mechanical properties of plantation grown tamarack. *Forest Prod. J.* 39(6):5-10.
- Bégin, C. and Filion, L. 1999. Black spruce (*Picea mariana*) architecture. *Can. J. Bot.* 77(5):664-672.
- Belleau, A. et Légaré, S. 2008. Projet Tembec: vers la mise en œuvre d'une stratégie d'aménagement forestier s'inspirant de la dynamique des perturbations naturelles pour la région nord de l'Abitibi. Ch. 19. Dans : Aménagement écosystémique en forêt boréale. (Gauthier, S. et Vaillancourt, M.-A. et Leduc, A. et De Grandpre, L. and Kneeshaw, D.D. et Morin, H. et Drapeau, P. and Bergeron, Y., Eds.) Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy. pp.507-528.
- Benjamin, J.G., Kershaw, J.A., Weiskittel, A.R., Chui, Y.H. and Zhang, S.Y. 2009. External knot size and frequency in black spruce trees from an initial spacing trial in Thunder Bay, Ontario. *For. Chron.* 85(4):618-624.
- Benoit, K. 2011. Linear regression models with logarithmic transformations. Methodology Institute, London School of Economics, March 17, 2011. [Online]. <http://www.kenbenoit.net/courses/ME104/logmodels2.pdf>. (Accessed March 15, 2020).
- Bergeron, Y., Gauthier, S., Kafka, V., Lefort, P. and Lesieur, D. 2001. Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Can. J. For. Res.* 31(3):384-391.
- Bolker, B. 2020. Getting started with the glmmTMB package. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/glmmTMB/vignettes/glmmTMB.pdf>. R version 3.6.3 (2020-02-29) and package versions: 1.0.23.1 (bbmle); 1.0.1 (glmmTMB).
- Bonan, G.B. and Shugart, H.S. 1989. Environmental factors and ecological processes in boreal forests. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 20(1):1-28.
- Bouchard, M. 2008. La sylviculture dans un contexte d'aménagement écosystémique en forêt boréale et en forêt mixte. Ch. 13. Dans : Aménagement écosystémique en forêt boréale. (Gauthier, S. et Vaillancourt, M.-A. et Leduc, A. et De Grandpre, L. and Kneeshaw, D.D. et Morin, H. et Drapeau, P. and Bergeron, Y., Eds.) Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy. pp. 335-359.

- Bouchard, M., Pothier, D. and Gauthier, S. 2008. Fire return intervals and tree species succession in the North Shore region of Eastern Quebec. *Can. J. For. Res.* 38(6):1621-1633.
- Bowyer, J.L., Shmulsky, R. and Haygreen, J.G. 2007. Forest products and wood science, an introduction. Fifth edition. Blackwell Publishing, Ames, IA. 558p.
- Brooks, M.E., Kristensen, K., van Benthem, K.J., Magnusson, A., Berg, C.W., Nielsen, A., Skaug, H.J., Maechler, M. and Bolker, B.M. 2017. GlmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R Journal* 9(2):378-400.
- Burdon, R., Britton, R. and Walford, G. 2001. Wood stiffness and bending strength in relation to density in four native provenances of *Pinus radiata*. *N.Z. J. For. Sci.* 31(1):130-146.
- Burdon, R.D., Kibblewhite, R.P., Walker, J.C.F., Megraw, R.A., Evans, R. and Cown, D.J. 2004. Juvenile versus mature wood: A new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. *For. Sci.* 50(4):399-415.
- Burns, R.M. and Honkala, B.H. 1990. Silvics of North America: 1. Conifers, 2. Hardwoods. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Washington, DC. vol.2, 877p.
- Bustos, C., Beauregard, R., Mohammad, M. and Hernández, R.E. 2003. Structural performance of finger-jointed black spruce lumber with different joint configuration. *Forest Prod. J.* 53(9):72-76.
- Cáceres, C.B., Hernández, R.E. and Fortin, Y. 2018. Shrinkage variation in Japanese larch (*Larix kaempferi*, [Lamb.] Carr.) progenies/provenances trials in Eastern Canada. *Wood Mater. Sci. Eng.* 13(2):97-103.
- Calil Jr., C., Lahr, F.A.R. and Dias, A.A. 2003. Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Barueri, SP. Manole. 160p.
- Cave I.D. and Walker J.C.F. 1994. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. *Forest Prod. J.* 44(5):43-48.
- Chabot, M., Blanchet, P., Drapeau, P., Fortin, J., Gauthier, S., Imbeau, L., Lacasse, G., Lemaire, G., Nappi, A., Quenneville, R. and Thiffault, É. 2009. Ch. 27. Le feu en milieu forestier. Dans : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Manuel de Foresterie, 2eéd. Ouvrage collectif. Éditions MultiMondes. Québec. pp. 1037-1090.
- Chafe, S.C. 1986. Collapse, volumetric shrinkage, specific gravity and extractives in eucalyptus and other species. Part 1: The shrinkage/specific gravity ratio. *Wood Sci. Technol.* 20(4):293-307.

- Chafe, S.C. 1987. Collapse, volumetric shrinkage, specific gravity and extractives in eucalyptus and other species. Part 2: The influence of wood extractives. *Wood Sci. Technol.* 21(1):27-41.
- Cyr, D., Gauthier, S., and Bergeron, Y. 2007. Scale-dependent determinants of heterogeneity in fire frequency in a coniferous boreal forest of eastern Canada. *Landscape Ecol.* 22(9):1325-1339.
- De Grandpré, L., Gauthier, S., Allain, C., Cyr, D., Pérignon, S., Pham, A.T., Boucher, D., Morissette, J., Reyes, G., Aakala, T. et Kuuluvainen, T. 2008. Vers un aménagement écosystémique de la forêt boréale de la Côte-Nord : régime des perturbations et dynamique naturelle. Ch. 10. Dans : Aménagement écosystémique en forêt boréal. Presses de l'Université du Québec. Sainte-Foy. pp. 241-268.
- Desch, H.E. and Dinwoodie, J.M. 1996. Timber: structure, properties, conversion, and use. Food Products Press. New York. 306p.
- Derome, D., Rafsanjani A., Hering S., Dressler M., Patera A., Lanvermann C., Sedighi Gilani M., Wittel F., Niemz P. and Carmeliet J. 2013. The role of water in the behavior of wood. *J. Build. Phys.* 36(4):398-421.
- Donaldson, L.A., Grace, J. and Downes, G.M. 2004. Within-tree variation in anatomical properties of compression wood in radiate pine. *IAWA J.* 25(3):253-271.
- Doucet, R., Ruel, J.-C., Jutras, S., Lessard, G., Pineau, M., Pregent, G. et Thiffault, N. 2009. Sylviculture appliquée. Ch. 29. Dans : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Manuel de Foresterie, 2eéd. Ouvrage collectif, Éditions MultiMondes, Québec, p. 1147-1186.
- Draper, N.R. and Smith, H 1981. Applied regression analysis. John Wiley and Sons, New York. 709p.
- Duchateau, E., Longuetaud, F., Mothe, F., Ung, C., Auty, D. and Achim, A. 2013. Modelling knot morphology as a function of external tree and branch attributes. *Can. J. For. Res.* 43(3):266-277.
- Duchesne, I. 2006. Effect of rotation age on lumber grade yield, bending strength and stiffness in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) natural stands. *Wood Fiber Sci.* 38(1):84-94.
- Dufour, B. and Morin, H. 2013. Climatic control of tracheid production of black spruce in dense mesic stands of eastern Canada. *Tree Physiol.* 33:175-186.
- Dumail, J.F. and Castera, P. 1997. Transverse shrinkage in maritime pine juvenile wood. *Wood Sci. Technol.* 31:251-264.

- Dutilleul, P., Herman, M. and Avella-Shaw, T. 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). Can. J. For. Res. 28(1):56-68.
- Fernández Golfin, J.I. and Diez M.R. 1994. Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies. Investigación Agraria 3(2):211-219.
- Fischer, C. 2016. Comparing the logarithmic transformation and the box-cox transformation for individual tree basal area increment models. For. Sci. 62(3):297-306.
- Forintek Canada Corp. 2006. Black spruce. Facts on wood series. 4p.
- Foulger, A.N. 1966. Longitudinal shrinkage pattern in eastern white pine stems. Forest Prod. J. 16(12):45-47.
- Franceschini, T., Gauthray-Guyénet, V., Schneider, R., Ruel, J-C., Pothier, D. and Achim A. 2018. Effect of thinning on the relationship between mean ring density and climate in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Forestry 91:366-381.
- Gagnon, R. et Morin, H. 2001. Les forêts d'épinette noire du Québec : dynamique, perturbations et biodiversité. Nat. Can. 125:26-35.
- Gagnon, R., Morin, H., Lord, D. et Krause, C. 2004. L'aménagement durable des forêts d'épinette noire du centre du Québec, un défi que les chercheurs. Laboratoire d'écologie et de physiologie végétale. Université du Québec à Chicoutimi.
- Garcia, R.A., Rosero-Alvarado, J. and Hernández, R.E. 2020. Full-field moisture-induced strains of the different tissues of tamarack and red oak woods assessed by 3D digital image correlation. Wood Sci. Technol. 54:139-159.
- Gardiner, B.A., Marshall, B., Achim, A., Belcher, R. and Wood, C. 2005. The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation. Forestry 78(5):471-484.
- Gardiner, B.A., Leban, J-M., Auty, D. and Simpson, H. 2011. Models for predicting wood density of British-grown Sitka spruce. Forestry 84(2):119-132.
- Garet, J., Pothier, D. and Bouchard, M. 2009. Predicting the long-term yield trajectory of black spruce stands using time since fire. For. Ecol. Manag. 257(10):2189-2197.
- Gauthier, S., Leduc, A., Bergeron, Y. et Le Goff, H. 2008. La fréquence des feux et l'aménagement forestier inspiré des perturbations naturelles. Ch. 3. Dans : Aménagement écosystémique en forêt boréale. (Gauthier, S. et Vaillancourt, M.-A. et Leduc, A. et De Grandpre, L. and Kneeshaw, D.D. et Morin, H. et Drapeau, P. and Bergeron, Y., Eds.) Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy. pp. 61-78.

- Giroud, G., Bégin, M., Défo, M. and Ung, C.-H. 2016. Ecogeographic variation in black spruce wood properties across Quebec's boreal forest. *For. Ecol. Manag.* 378:131-143.
- Gomez Loranca, J.A., Gutierrez Oliva, A. and Baonza Merino, M.V. 1996. Influencia de la intensidad de clara en el crecimiento, la producción y las características de la madera en una masa artificial de *Pinus sylvestris* L. *Investigación Agraria* 5(2):257-273.
- Goreaud, F., de Coligny, F., Courbaud, B., Dhôte, JF., Dreyfus, Ph. et Pérot, T. 2005. La modélisation: un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. *Vertigo* 6(2):1-12.
- Goulet, M. 1968. Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Seconde partie: Essais du bois d'érable à sucre en compression radiale. Note de recherches n° 3. Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval. 29 p.
- Gryc, V., Vavřčík, H. and Horáček P. 2007. Variability in swelling of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) wood with the presence of compression wood. *J. For. Sci.* 53(6):243-252.
- Guitard, D. et Gachet, C. 2004. Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l'anisotropie élastique du bois. *Ann. For. Sci.* 61:129-139.
- Harris, M. 1970. Amélioration de la qualité du bois. *Revue internationale des forêts et des industries forestiers. Unasylva* 24:97-98.
- Harvey, B.D., Nguyen-Xuan, T., Bergeron, Y., Gauthier, S. and Leduc, A. 2003. Forest management planning based on natural disturbance and forest dynamics. Chap.11. In: Towards sustainable management of the boreal forest (Burton, P.J., Messier, C., Smith, D.W., Adamowicz, W.L., Editors). NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. pp. 395-432.
- Hassegawa, M., Savard, M., Lenz, P.R.N., Duchateau, E., Gélinas, N., Bousquet, J. and Achim, A. 2020. White spruce wood quality for lumber products: priority traits and their enhancement through tree improvement. *Forestry* 93(1):16-37.
- Heger, L. 1974. Longitudinal variation of specific gravity in stems of black spruce, balsam fir, and lodgepole pine. *Can. J. For. Res.* 4:321-326.
- Henin, J-M., Pollet, C., Jourez, B. and Hébert, J. 2018. Impact of tree growth rate on the mechanical properties of Douglas Fir lumber in Belgium. *Forests* 9:342.
- Hernández, R.E. 2007a. Swelling properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density, and interlocked grain. *Wood Fiber Sci.* 39(1):146-158.
- Hernández, R.E. 2007b. Moisture sorption properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density, and interlocked grain. *Wood Fiber Sci.* 39(1):132-145.

- Hernández, R.E., Passarini, L. and Koubaa, A. 2014. Effects of temperature and moisture content on selected wood mechanical properties involved in the chipping process. *Wood Sci. Technol.* 48(6):1281-1301.
- Houllier, F., Leban, J.M. and Colin, F. 1995. Linking growth modeling to timber quality assessment for Norway spruce. *For. Ecol. Manag.* 74:91-102.
- Hock, R. and Mariaux, A. 1984. Vitesse de croissance et retrait du bois: relation entre la largeur des cernes d'accroissement et le retrait au séchage dans quelques arbres tropicaux. *Bois For. Trop.* 203:79-90.
- Huang, S., Meng, S.X. and Yang, Y. 2009. Assessing the goodness-of-fit of forest models estimated by nonlinear mixed model methods. *Can. J. For. Res.* 39(12):2418-2436.
- Ishii, H.T., Ford, E.D. and Kennedy, M.C. 2007. Physiological and ecological implications of adaptive reiteration as a mechanism for crown maintenance and longevity. *Tree Physiol.* 27(3):455-462.
- Ivković, M., Gapare, W.J., Abarquez, A., Ilic, J., Powell, M.B. and Wu, H.X. 2009. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. *Wood Sci. Technol.* 43(3-4):237-257.
- Jankowsky, I.P. 1979. Madeira Juvenil: formação e aproveitamento industrial. ESALQ/USP. Circular Técnica do IPEF 81p.
- Jessome, A.P. 2000. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada. SP 514-F, Forintek Canada Corp. 27p.
- Jozsa, L.A. and Middleton, G.R. 1994. A Discussion of wood quality attributes and their practical implications. Special publication. Forintek Canada Corp. 42p.
- Kärkkäinen, M. and Marcus, M. 1985. Shrinkage properties of Norway spruce wood. *Silva Fenn.* 19(1):67-72.
- Keith, C.T. 1986. An exploratory study of the properties of fast-grown jack pine and European larch in eastern Canada. Internal report. Wood Sci. Department. Forintek Canada Corp.
- Kelsey, K.E. 1956. The shrinkage intersection point: its significance and the method of its determination. *Forest Prod. J.* 6:411-416.
- Kellison, R.C. 1983. Cultural practices for optimizing productivity of eucalypts for fiber and energy. *Silvicultura* 8(31):593-595.
- Kennedy, R.W. 1995. Coniferous wood quality in the future: concerns and strategies. *Wood Sci. Technol.* 29(5):321-338.

- Koubaa, A., Hernández, R.E. and Beaudoin, M. 1998. Shrinkage of fast-growing poplar hybrid clones. *Forest Prod. J.* 48(4):82-87.
- Koubaa, A., Zhang, S.Y., Isabel, N. and Beaulieu, J. 2000. Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce. *Wood Fiber Sci.* 32(1):61-71.
- Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S.Y., Beaulieu, J. and Bousquet, J. 2005. Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP). *Wood Fiber Sci.* 37(3):445-455.
- Koubaa A., Zhang S.Y.T. and Makni S. 2002. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Ann. For. Sci.* 59(5-6):519-524.
- Krause, C., Rossi, S., Thibeault-Martel, M. and Plourde, P.-Y. 2010. Relationships of climate and cell features in stems and roots of black spruce and balsam fir. *Ann. For. Sci.* 67(4):402.
- Krzemién, L., Strojecki, M., Wroński S., Tarasiuk. J. and Łukomski, M. 2015. Dynamic response of earlywood and latewood within annual growth ring structure of Scots pine subjected to changing relative humidity. *Holzforschung* 69(5):555-56.
- Kuprevicius, A., Auty, D., Achim, A. and Caspersen, J.P. 2013. Quantifying the influence of live crown ratio on the mechanical properties of clear wood. *Forestry* 86(3):361-369.
- Lachenbruch, B., Moore, J.R. and Evans, R. 2011. Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence. In: Meinzer, F.C., Lachenbruch, B., Dawson, T.E. (eds) Size- and age-related changes in tree structure and function. *Tree Physiology*. Vol. 4. Springer, London.
- Ladell, J.L., Carmichael, A.J. and Thomas, G.H.S. 1968. Current work in Ontario on compression wood in black spruce in relation to pulp yield and quality. In: Proceedings of the eighth lake states forest tree improvement conference, Res. Pap. NC-23. St. Paul, MN: U.S. Forest Service, North Central Forest Experiment Station, p. 52-60.
- Larson, P.R., Kretschmann, D.E., Clark, A.I. and Isebrands, J.G. 2001. Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-129. USDA. Forest Products Laboratory. Madison, WI. 42p.
- Le Moguédec, G. and Nepveu, G. 2004. Using a chain of models to simulate the distribution between quality clusters of a set of boards coming from a sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) resource. Validation of the simulations. *Wood Sci. Technol.* 38:451-463.
- Leban, J.-M. and Haines, D.W. 1999. The modulus of elasticity of hybrid larch predicted by density, rings per centimetre and age. *Wood Fiber Sci.* 31(4):394-402.

- Lei, Y.C., Zhang, S.Y. and Jiang, Z. 2005. Models for predicting lumber bending MOR and MOE based on tree and stand characteristics in black spruce. *Wood Sci. Technol.* 39(1):37-47.
- Lemay, A., Krause, C., Achim, A. and Bégin, J. 2018. Growth and wood quality of black spruce and balsam fir following careful logging around small merchantable stems (CLASS) in the boreal forest of Quebec, Canada. *Forestry* 91(3):271-282.
- Lemieux, L., Beaudoin, M. and Zhang, S.Y. 2001. Characterization and modeling of knots in black spruce logs. *Wood Fiber Sci.* 33(3):465-475.
- Leonardon, M., Altaner, C.M., Vihermaa, L. and Jarvis, M.C. 2010. Wood shrinkage: influence of anatomy, cell wall architecture, chemical composition and cambial age. *Eur. J. Wood Prod.* 68:87-94.
- Lexerød, N.L. and Eid, T. 2006. An evaluation of different diameter diversity indices based on criteria related to forest management planning. *For. Ecol. Manag.* 222(1):17-28.
- Lieffers, V.J., Messier, C., Burton, P.J., Ruel, J.-C. and Grover, B.E. 2003. Nature-based silviculture for sustaining a variety of boreal forest values. Chap. 13. In: *Towards Sustainable management of the boreal forest*. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. pp. 481-530.
- Lindstrom, M.J. and Bates, D.M. 1990. Nonlinear mixed effects models for repeated measures data. *Biometrics* 46(3):673-687.
- Liu, C., Zhang, S.Y., Cloutier, A. and Rycabel, T. 2007. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *For. Ecol. Manag.* 242(2-3):648-655.
- Liu, C. and Zhang, S.Y. 2005. Models for predicting product recovery using selected tree characteristics of black spruce. *Can. J. For. Res.* 35(4):930-937.
- Lobry, J.R. 2008. Le modèle de Michaelis-Menten. Ajustement par régression non-linéaire du modèle de Michaelis-Menten aux données de Michaelis et Menten. Fiche TD avec le logiciel : tdr47.
- Lussier, J.-M. 1991. Comparaison de la croissance de marcottes d'épinette noire adultes à celle d'individus issus de graines après feu. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, Chicoutimi.
- Lussier, J.-M., Morin, H. and Gagnon, R. 2002. Evolution of diameter structure and wood production of black spruce stands originating from clear-cuts and fires. *Can. J. For. Res.* 32(3):526-538.
- Macdonald, E. and Hubert, J. 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75:107-138.

- Magnusson, A., Skaug, H., Nielsen, A., Berg, C., Kristensen, K., Maechler, M., van Bentham, K., Sadat, N., Bolker, B. and Brooks, M. 2020. Package glmmTMB: Generalized linear mixed models using template model builder. R Package Version 1.0.1.
- Mailly, D. and Gaudreault, M. 2005. Growth intercept models for black spruce, jack pine and balsam fir in Quebec. *For. Chron.* 81(1):104-113.
- Mansfield, S.D., Parish, R., Di Lucca, C., Goudie, J., Kang, K. and Ott, P. 2009. Revisiting the transition between juvenile and mature wood: a comparison of fibre length, microfibril angle and relative wood density in lodgepole pine. *Holzforschung*, 63(4):449-456.
- Mencuccini, M., Grace, J. and Fioravanti, M. 1997. Biomechanical and hydraulic determinants of tree structure in Scots Pine: anatomical characteristics. *Tree Physiol.* 17(2):105-13.
- Messier, C., Fortin, M.-J., Schmiegelow, F., Doyon, F., Cumming, S.G., Kimmins, J.P., Seely, B., Welhan, C. and Nelson, J. 2003. Modelling tools to assess the sustainability of forest management scenarios. Chap. 14. In: *Towards sustainable management of the boreal forest* (Burton, P.J., Messier, C., Smith, D.W., Adamowicz, W.L., Editors). NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. p. 531-580.
- MFFP - Ministère de forêts, faune et parcs. 2017. Chiffres-clés du Québec forestier. Gouvernement du Québec, Québec. 7p.
- MRNF - Ministère de ressources naturelles et de la faune. 2008. La forêt québécoise : source d'histoire, porteuse d'avenir. Québec, Canada. Gouvernement du Québec, Québec. 20p.
- MRNF - Ministère des ressources naturelles et de la faune. 2010. Ressources et industries forestières. Portrait statistique - éd. 2010. Québec, Canada. Gouvernement du Québec, Québec. 498p.
- MRNFP - Ministère des ressources naturelles, de la faune et des parcs 2003. La valorisation des sciages résineux de la Côte-Nord. Québec, Canada. Gouvernement du Québec, Québec. 27p.
- Nepveu, G. 1996. To model or not to model? The advantages and present limits of the modelling approach to predict wood quality from tree growth: the French experience. Workshop IUFRO S5.01-04 - Topic 5.
- NLGA – National lumber grades authority. 2003. SPS 2: Special products standard for machine graded lumber. National Lumber Grades Authority (NLGA), Surrey, B.C., Canada.
- Noack, D., Schwab, E. and Bartz, A. 1973. Characteristics for a judgment of the sorption and swelling behavior of wood. *Wood Sci. Technol.* 7(3):218-236.

NRCAN - Ressources naturelles Canada. 2010. Perturbations naturelles. [En ligne]. <http://foretscanada.rncan.gc.ca/article/perturbationsnaturellesforetboreale>. (Page consultée le 20 juin 2010).

NRCAN - Natural resources Canada. 2012. The forest bioeconomy: balancing economic opportunity with ecological sustainability. Canadian Forest Service Publications. Frontline Policy Perspective. Note 5. 8p.

NRCAN - Natural resources Canada 2018. The state of Canada's forests: annual report 2018. Canadian forest service publications. 81p.

NRCAN - Ressources naturelles Canada. 2019. Cahier d'information sur la forêt 2018-2019. Gouvernement du Canada. 56p.

Pamerleau-Couture, É., Rossi, S., Pothier, D. and Krause, C. 2019. Wood properties of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) in relation to ring width and tree height in even- and uneven-aged boreal stands. Ann. For. Sci. 76:43.

Panshin, A.J., and de Zeeuw, C. 1980. Textbook of wood technology. 4th ed. McGraw-Hill, New York. 772p.

Paradis, N., Auty, D., Carter, P. and Achim, A. 2013. Using a standing-tree acoustic tool to identify forest stands for the production of mechanically graded lumber. Sensors 13(3):3394-3408.

Park, Y.I.D., Koubaa, A., Brais, S. and Mazerolle, M.J. 2009. Effects of cambial age and stem height on wood density and growth of jack pine grown in boreal stands. Wood Fiber Sci. 41:346-358.

Parresol, B.R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. For. Sci. 45(4):573-593.

Peng M., Kershaw, J.A. Jr, Chui, Y.H. and Gong, M. 2013. Modelling of tangential, radial, and longitudinal shrinkage after drying in jack pine and white spruce. Can. J. For. Res. 43(8):742-749.

Philip, M.S. 1994. Measuring trees and forests, 2nd edn. Wallingford, Oxon, U.K.: CAB International. 310p.

Pinheiro, J.C. and Bates, D.M. 2000. Mixed-effects models in S and S-PLUS. Statistics and computing series. Springer-Verlag. New York. 528p.

Pinheiro J., Bates D., DebRoy S., Sarkar D. and R Core Team (2020). nlme: linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-148. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.

- Pokharel, B. and Dech, J.P. 2012. Mixed-effects basal area increment models for tree species in the boreal forest of Ontario, Canada, using an ecological land classification approach to incorporate site effects. *Forestry* 85(2):255-270.
- Pokharel, B., Dech, J.P., Groot, A. and Pitt, D. 2014. Ecosite-based predictive modeling of black spruce (*Picea mariana*) wood quality attributes in boreal Ontario. *Can. J. For. Res.* 44:465-475.
- Pothier, D., Margolis, H.A., Poliquin, J. and Waring, R.H. 1989. Relation between the permeability and the anatomy of jack pine sapwood with stand development. *Can. J. For. Res.* 19(12): 1564-1570.
- Power, H., Lemay, V., Berninger, F., Sattler, D. and Kneeshaw, D. 2012. Differences in crown characteristics between black (*Picea mariana*) and white spruce (*Picea glauca*). *Can. J. For. Res.* 42(9):1733-174.
- R Development Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- R Development Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Raulier, F., Leduc, A., Roy, R. et Vaillancourt, M.-A 2009. Aménagement de la forêt. Ch. 15, dans Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Manuel de Foresterie, 2eéd. Ouvrage collectif, Éditions MultiMondes, Québec, pp.649-676.
- Rezende, M.A., Saglietti, J.R.C. and Guerrini, I.A. 1995. Estudo das interrelações entre massa específica, retratibilidade e umidade da madeira do *Pinus caribea* var. *hondurensis* aos 8 anos de idade. ESALQ/USP, IPEF. 48/49:133-141.
- Ross, R.J. 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. Centennial ed. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of agriculture, forest service. Forest products laboratory. 508p.
- Ruel, J.-C., Roy, V., Lussier, J.-M., Pothier, D., Meek, P. et Fortin, D. 2007. Mise au point d'une sylviculture adaptée à la forêt boréale irrégulière. *For. Chron.* 83(3):367-374.
- Rycabel, T. 2007. Qualité et rendement en sciages selon les conditions de croissance des tiges d'épinette noire (*Picea mariana* mill.). Thèse de doctorat d'université. Québec : Université Laval. 83p.
- Saucier, J.-P., Bergeron, J.-F., Grondin, P. et Robitaille, A. 1998. Les régions écologiques du Québec méridional (3e version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec. *L'Aubelle* 124:S1-S12.
- Saucier, J.-P. et Groot, A. 2008. Modélisation des peuplements complexes et de l'effet des traitements sylvicoles. Ch. 16. Dans: Aménagement écosystémique en forêt boréale.

(Gauthier, S. et Vaillancourt, M.-A. et Leduc, A. et De Grandpre, L. and Kneeshaw, D.D. et Morin, H. et Drapeau, P. and Bergeron, Y., Eds.) Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy. p. 417-443.

Saucier, J.-P., Grondin, P., Robitaille, A., Gosselin, J., Morneau, C., Richard, P.J.H., Brisson, J., Sirois, L., Leduc, A., Morin, H., Thiffault, É., Gauthier, S., Lavoie, C. et Payette, S. 2009. Écologie forestière – Ch. 4. Dans : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (éd.). Manuel de foresterie - Nouvelle édition entièrement revue et augmentée. Editions MultiMondes. Québec, Canada. p.167-315.

Scanavaca, L. Jr. e Garcia, J.N. 2004. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. Scientia Forestalis 65:120-129.

Schmidt, E.L., Riggio, M., Barbosa, A.R. and Mugabo, I. 2019. Environmental response of a CLT floor panel: Lessons for moisture management and monitoring of mass timber buildings. Build. Environ. 148:609-622.

Schneider, R., Zhang, S.Y., Swift, D.E., Bégin, J. and Lussier, J.-M. 2008. Predicting selected wood properties of jack pine following commercial thinning. Can. J. For. Res. 38(7):2030-2043.

Shepard, R.K. and Shottaffer, J.E. 1992. Specific gravity and mechanical property - age relationships in red pine. Forest Prod. J.42(7/8):60-66.

Shmulsky, R. and Jones, P.D. 2011. Forest products and wood science. An introduction. 6th ed., JohnWiley and Sons, Inc.

Singh, T. 1984. Variation in the oven-dry wood density of ten prairie tree species. For. Chron. 60(4):217-221.

Singh, T. 1986. Wood density variation of six major tree species of the Northwest Territories. Can. J. For. Res. 16(1):127-129.

Skaar, C. 1988. Wood-water relations. Springer-Verlag, New York. 283p.

St-Germain, J.L. and Krause, C. 2008. Latitudinal variation in tree-ring and wood cell characteristics of *Picea mariana* across the continuous boreal forest in Quebec. Can. J. For. Res. 38(6):1397-1405.

Stacey, G.R., Belcher, R.E., Wood, C.J. and Gardiner, B.A. 1994. Wind and wind forces in a model spruce forest. Bound. Layer Meteorol. 69:311-334.

Stanek, W. 1961. Natural layering of black spruce in northern Ontario. For. Chron. 37(3):245-258.

Stanek, W. 1968. Development of black spruce layers in Quebec and Ontario. For. Chron. 44(2):25-28.

- Thomson, A.M., Riddell, C.L. and Parker, W.H. 2009. Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change: 2. Black spruce. *Can. J. of For. Res.* 39(1):143-153.
- Thrower, J.S. 1987. Growth intercepts for estimating site quality of young white spruce plantations in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 17:1385-1389.
- Timell, T.E. 1986. Compression wood in gymnosperms. *Technology & Engineering*. Springer Berlin Heidelberg Germany 625p.
- Torquato, L.P., Auty, D., Hernández, R.E., Duchesne, I., Pothier, D. and Achim, A. 2014. Black spruce trees from fire-origin stands have higher wood mechanical properties than those from older, irregular stands. *Can. J. For. Res.* 44(2):118-127.
- Torquato, L.P., Hernández, R.E., Duchesne, I., Auty, D. and Achim, A. 2020. Black spruce trees from uneven-aged, old-growth stands produce more dimensionally stable wood than trees from fire-origin, even-aged stands. *Wood Sci. Technol.* (Submitted).
- USDA - Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. U.S., General Technical Report FPL-GTR-113, Washington, DC. 463p.
- Verkasalo, E. and Leban, J. 2002. MOE and MOR in static bending of small clear specimens of Scots pine, Norway spruce and European fir from Finland and France and their prediction for the comparison of wood quality. *Pap. Puu-Pap Tim.* 84(5):332-340.
- Villeneuve, M., Morgenstern, E.K. and Sebastian, L.P. 1987. Variation patterns and age relationships of wood density in families of jack pine and black spruce. *Can. J. For. Res.* 17:1219-1222.
- Waldron, K., Auty, D., Tong, T., Ward, C., Pothier, D., Torquato, L.P. and Achim, A. 2020. Fire as a driver of wood mechanical traits in the boreal forest. *For. Ecol. Manag.* 476. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118460>.
- Ward, C., Pothier, D. and Paré, D. 2014. Do boreal forests need fire disturbance to maintain productivity? *Ecosystems* 17:1053-1067.
- Warensjö, M. and Rune, G. 2004. Stem straightness and compression wood in a 22-year-old stand on container-grown Scots pine trees. *Silva Fenn.* 38(2):143-153.
- West, P.W. 2014. Growth rates and rood quality. In: *Growing Plantation Forests*. Springer, Cham. Chapter 3: p. 25-44.
- Wilhelmsen, L., Arlinger, J., Spangberg, K., Lundqvist, S., Grahn, T., Hedenberg, O. and Olsson, L. 2002. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scand. J. For. Res.* 17(4):330-350.

- Williamson, T.B., Colombo, S.J., Duinker, P.N., Gray, P.A., Hennessey, R.J., Houle, D., Johnston, M.H., Ogden, A.E. et Spittlehouse, D.L. 2009. Les changements climatiques et les forêts du Canada : des impacts à l'adaptation. Réseau de gestion durable des forêts et Service canadien des forêts. Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). 112p.
- Wollcott, M.P., Shepard, R.K. and Shottafer, J.E. 1987. Age and thinning effects on wood properties of red spruce (*Picea rubens* Sarg.). Technical Bulletin 127, Maine Agricultural Experiment Station, University of Maine, Orono, Maine 04469. 17p.
- Xiang, W., Auty, D., Franceschini, T., Leitch, M. and Achim, A. 2014. Wood density-climate relationships are mediated by dominance class in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). *Forests* 5:1163-1184.
- Yamashita, K., Hirakawa Y., Nakatani, H. and Ikeda, M. 2009. Tangential and radial shrinkage variation within trees in sugi (*Cryptomeria japonica*) cultivars. *J. Wood. Sci.* 55:161-168.
- Yao, J. 1969. Shrinkage properties of second-growth southern yellow pine. *Wood Sci. Technol.* 3:25-39.
- Zhang, S.Y. 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Sci. Technol.* 29(6):451-465.
- Zhang, S.Y. 1998. Effect of age on the variation, correlations and inheritance of selected wood characteristics in black spruce (*Picea mariana*). *Wood Sci. Technol.* 32:197-204.
- Zhang, S.Y., Chauret, G., Ren, H. and Desjardins, R. 2002. Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and MSR yield. *Wood Fiber Sci.* 34(3):460-475.
- Zhang, S.Y. and Jiang, Z.H. 1998. Variability of selected wood characteristics in 40 half-sib families of black spruce (*Picea mariana*). *Wood Sci. Technol.* 32:71-82.
- Zhang, S.Y. and Koubaa, A. 2009. Les résineux de l'est du Canada: écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. Forintek Canada Corp., Quebec. 400p.
- Zhang, S.Y., Nepveu, G. and Mothe, F. 1994. Modeling intratree wood shrinkage in European oak by measuring wood density. *Forest Prod. J.* 44(10):42-46.
- Zhang, S.Y., Owoundi, R.E., Nepveu, G. and Mothe, F. 1995. Modeling wood shrinkage and simulating the silvicultural influence in European Oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*). *Holzforschung* 49(1):35-44.

- Zhang, S.Y., Owoundi, R.E., Nepveu, G., Mothe, F. and Dhôte, J.-F. 1993. Modeling wood density in European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) and simulating the silvicultural influence. Can. J. For. Res. 23:2587-2593.
- Zobel, B.J. and Jett, J.B. 1995. Genetics of wood production. Springer series in wood science. Ed. Timmel, T. E. Springer-Verlag, Berlin. 337p.
- Zobel, B.J., and Sprague, J.R. 1998. Juvenile wood in forest trees. Springer series in wood science. Springer, New York. 300p.
- Zobel, B.J. and Van Buijtenen, J.P. 1989. Wood variations - its causes and control. Springer, Berlin. 300p.
- Zobel, B.J., Webb, C. and Henson, F. 1959. Core or juvenile wood of loblolly and slash pine trees. Tappi J. 42(5):345-355.