



Évaluation du volume et des pertes de qualité causées par les principaux défauts des tiges d'épinette blanche et de pin gris

Thèse

Denis Belley

Doctorat en sciences du bois
Philosophiae doctor (Ph.D.)

Québec, Canada

© Denis Belley, 2014

Résumé

Les objectifs de ce travail sont donc, dans un premier temps, de mieux comprendre les effets de l'espacement initial sur les caractéristiques des arbres de pin gris et d'épinette blanche ainsi que sur les propriétés mécaniques de leur bois. Il sera également possible de développer un facteur de correction du volume des sciages obtenus en fonction des déformations naturelles présentes sur les tiges pour ces deux essences, et ce, dans le but d'estimer de manière plus précise le volume de sciage disponible à partir des données d'inventaires forestiers. Dans un deuxième temps, le travail consiste à modéliser la présence des nœuds et à percevoir leurs impacts sur le rendement en sciage à l'aide d'Optitek, un logiciel de simulation du procédé du sciage. Pour réaliser cette étape, un certain nombre de billes ont été traitées dans un CT Scanner et un nouveau logiciel a été mis au point afin d'extraire l'information désirée des images tomodensitométriques (CT) pour ensuite la rendre compatible au logiciel Optitek. Le but de cette étape est d'être en mesure d'effectuer des simulations du procédé de débitage en tenant compte de la dimension et de l'emplacement des nœuds de façon à maximiser la valeur de chaque bille. Les arbres proviennent d'une plantation d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) de type Nelder (1962). Ce type de plantation se caractérise par une forme circulaire qui fait en sorte que la densité de peuplement diminue graduellement du centre vers la périphérie du cercle. Ce site a permis l'étude de deux essences différentes ayant grandi dans des conditions de croissance similaires.

Premièrement, les résultats démontrent que les caractéristiques des arbres sont fortement influencées par la densité de peuplement. En effet, le DHP, la hauteur totale, le défilement, la longueur et la largeur de la cime vivante, le diamètre des cinq plus grosses branches mortes et vivantes ont généralement augmenté avec l'accroissement de la distance entre les arbres, autant chez le pin gris que chez l'épinette blanche.

L'optimisation du débitage primaire en fonction de l'emplacement spatial réel des nœuds internes dans les arbres a généré un volume de sciage significativement plus élevé et de plus grande valeur que les simulations du débitage uniquement basées sur la géométrie des tiges. En effet, la prise en compte de la distribution des nœuds lors des simulations du sciage a permis d'augmenter le nombre de pièces de qualité No.2 & meilleur produites de 15% pour l'épinette blanche et de 40% pour le pin gris. L'augmentation de la valeur des sciages associée à la connaissance de la distribution interne des nœuds a varié de 9,5% à 15,1% pour l'épinette blanche et de 15,2% à 23,0% pour le pin gris. Encore une fois, l'augmentation du rendement en valeur a été plus forte chez le pin gris que chez l'épinette blanche en raison de la présence de nœuds de plus fortes dimensions qui augmentent le potentiel d'optimisation.

Abstract

The first objective of this work is to characterize the properties of jack pine and white spruce and develop a lumber volume correction factor due to stem shape for both species. The purpose of this section is to more precisely predict lumber volume from forest inventory data. The second objective is to model the presence of knots and evaluate their impact on lumber yield using Optitek, a sawing simulation software. To achieve this goal, a new software had to be developed in order to extract CT image information and make it compatible with the Optitek software. Hence, the second objective is simulate lumber sawing while taking into account the knot dimension and location. The trees come from a Nelder (1962) type plantation of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). This type of plantation is characterized by a circular shape which makes the stand density vary from the center to the periphery of the circle. This site makes possible the study of two different species growing in similar conditions. Several field data were analyzed such as diameter at breast height (DBH), curvature, taper, total tree length, live crown size.

First, the results show that tree characteristics are strongly influenced by the stand density. Indeed, DBH, total height, taper, length and width of the live crown, diameter of the five largest branches dead and alive generally increased with greater distance between the trees, both for jack pine and white spruce.

The results obtained with the simulation using the knot information gave a lumber sawing volume and value significantly higher. Both jack pine and white spruce have produced more No.2 & better pieces when knots have been considered in the sawing simulations (15% for white spruce and 40% for jack pine). As for lumber value, the increase varied from 9.5% to 15.1% for white spruce and 15.2% to 23.0% for jack pine. Again, the larger jack pine knot size could explain this greater potential for improvement.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	xi
Dédicace	xiii
Remerciements	xv
Avant-Propos	xvii
Introduction	1
CHAPITRE 1 Revue de littérature	3
1.1 Survol de la situation forestière	3
1.2 Effets de la gestion de la densité du peuplement sur le volume et la qualité des produits	4
1.3 Caractéristiques de qualité du bois	10
1.4 Technologie et procédé du sciage	15
CHAPITRE 2 Matériel et méthode	23
2.1 Matériel	23
2.2 Méthode	27
CHAPITRE 3 Assessment of white spruce and jack pine stem curvature from a Nelder spacing experiment	37
3.1 Résumé	37
3.2 Abstract	38
3.3 Introduction	38
3.4 Materials and methods	40
3.5 Results	43
3.6 Conclusion	48
CHAPITRE 4 The effect of the stand density on tree and lumber characteristics of white spruce and jack pine 32 years post-establishment	49
4.1 Résumé	49
4.2 Abstract	50
4.3 Introduction	50
4.4 Materials and Methods	52
4.5 Results and Discussion	54
4.6 Conclusion	65
CHAPITRE 5 Stem deformation correction factor for accurate estimation of lumber volume recovery of white spruce and jack pine	67
5.1 Résumé	67
5.2 Abstract	68
5.3 Introduction	68
5.4 Materials and methods	70
5.5 Results	72
5.6 Conclusion	76
CHAPITRE 6 Sawing optimization based on CT-scanned knot attributes - impact on lumber volume recovery, quality and value	77
6.1 Résumé	77
6.2 Abstract	77
6.3 Introduction	78
6.4 Materials and Methods	79

6.5 Results	82
6.6 Conclusion	88
Conclusion	89

Liste des tableaux

Table 1.1. Production canadienne de bois d’œuvre résineux en 2007-2011 3

Table 2.1. Espacement des arbres de la plantation 24

Table 3.1. Layout of tree spacing in the Nelder Spacing Experiment used in this study 41

Table 3.2. Stems summary data for jack pine (JP) and white spruce (WS) 44

Table 3.3. Statistical results using an indicator variable for taper 44

Table 3.4. Regression with indicator variable (curvature calculation method) 46

Table 4.1. White spruce and jack pine tree characteristics all stand densities considered 54

Table 4.2. Statistical result of different factors using an indicator variable 55

Table 4.3. MOE as a function of stand density (Mixed regression model) 61

Table 4.4. Logarithm of MOR as a function of stand density (MIXED regression model) 62

Table 4.5. MOR as a function of MOE for a Mixed regression model 63

Table 5.1. Summary of data taken on the 96 stems 72

Table 5.2. Presents the results from the sawing simulation in Optitek software 73

Table 5.3. Total lumber value for the 96 stems sawn in Optitek 74

Table 6.1. Summary data taken on the 53 stems 83

Table 6.2. Result from simulation with and without knots 84

Table 6.3. The effect of knot optimization on sawing simulation for lumber value (\$) 84

Table 6.4. Contrast analysis the sawing optimization for lumber value (\$) 85

Table 6.5. The effect of knot optimization on sawing simulation for lumber volume 85

Table 6.6. Contrast analysis of the sawing optimization for lumber volume 86

Table 6.7. Lumber grades obtained from sawing simulation with and without knots 87

Table 6.8. Pearson Chi-Square Test for No.2&better grade 87

Liste des figures

Figure 1.1. Production canadienne de bois d'œuvre résineux en 2011	4
Figure 1.2. Effet de la densité de peuplement sur le développement du houppier	6
Figure 1.3. Taux de survie estimé à 50 ans pour les plantations d'épinette blanche selon la densité de reboisement et la qualité de station	7
Figure 1.4. Diamètre à hauteur de poitrine (DHP) estimé à 50 ans pour les plantations d'épinette blanche selon la densité de reboisement et la qualité de station	8
Figure 1.5. Fréquence des classe de DHP sur une éclaircie versus le témoin	9
Figure 1.6. Illustration du diamètre des différents types de nœuds.....	10
Figure 1.7. Diamètre moyen des nœuds pour un site de qualité élevée S_h (a) et un site pauvre S_m (b)	11
Figure 1.8. Diamètre moyen en fonction des classes de diamètre (I, II, III) et de l'indice de qualité de station..... (élevé et modéré).	12
Figure 1.9. Diamètre moyen en fonction de l'azimut (N, E, S, W) et de l'indice de qualité de station	12
Figure 1.10. Rendement matière en volume des sciages de tige réelle en relation avec des tiges	14
virtuelles pour deux types d'usine, de dimension et colombage.....	14
Figure 1.11. Principe technique du scanneur à rayons X	19
Figure 2.1. Configuration du site d'échantillonnage (Nelder Plot, spacing trial)	24
Figure 2.2. Densité de peuplement approximatif en fonction de la position des arbres	25
Figure 2.3. Site vu du ciel.....	25
Figure 2.4. Photo du site avant coupe (épinette blanche).....	26
Figure 2.5. Photo au centre du site avant coupe (pin gris).....	26
Figure 2.6. Photo d'un pin gris (périphérie du cercle)	27
Figure 2.7. Photo du site pendant la coupe, épinette blanche (Source : Edwin Swift)	27
Figure 2.8. Numérotation des tiges	28
Figure 2.9. Prise de données sur les tiges	28
Figure 2.10. Scan tridimensionnel de la forme externe des tiges.....	29
Figure 2.11. Exemple de coordonnées en X, Y et Z d'une épinette blanche	30
Figure 2.12. Tige récoltée sur le site versus une tige virtuelle comparable.....	31
Figure 2.13. Caractéristiques externes et internes des billes à l'aide du CT-Scan	32
Figure 2.14. Image d'une coupe transversale de pin gris provenant d'un CT-scan	32
Figure 2.15. Image d'une coupe longitudinale de pin gris provenant d'un CT-scan.....	33
Figure 2.16. Image d'une coupe transversale de deux billes d'épinette blanche	34
Figure 2.17. Exemple d'extraction des nœuds provenant d'images CT.....	34
Figure 3.1. General method of determining maximum sweep.....	38
Figure 3.2. A) Curvature measurement with the true shape scanner, B) True shape scan of a jack pine	40
stem with multiple deviations	40
Figure 3.3. Experimental design of the initial spacing at the Nelder plot used in this study	41
Figure 3.4. Example of coordinates X, Y and Z of a log section.....	43
Figure 3.5. Natural logarithm of taper as a function of natural logarithm of stand density for jack pine	45
(black x) and white spruce (red dots).....	45
Figure 3.6. Natural logarithm of curvature as a function of natural logarithm of stand density	46
(maximum deflection method) for jack pine (black x) and white spruce (red dots)	46
Figure 3.7. Natural logarithm of the curve against natural logarithm of stand density calculated with	47
piecewise test (using vector method) for jack pine (black x) and white spruce (red dots).....	47
Figure 4.1. A) Plan of the Nelder plantation. B) Stand density as a function of tree position in the	52
plantation, from centre to outside of the circle.	52

Figure 4.2. Logarithm of stem taper as a function of logarithm of stand density	56
Figure 4.3. Logarithm of DBH as a function of logarithm of stand density	57
Figure 4.4. Logarithm of stem volume as a function of logarithm of stand density.....	57
Figure 4.5. Logarithm of total tree height as a function of logarithm of stand density	58
Figure 4.6. Logarithm of live crown length as a function of logarithm of stand density	58
Figure 4.7. Logarithm of live crown width as a function of logarithm of stand density.....	59
Figure 4.8. Logarithm of live branch diameter as a function of logarithm of stand density.....	60
Figure 4.9. Logarithm of dead branch diameter as a function of logarithm of stand density	60
Figure 4.10. Lumber MOE (MPa) as a function of stand density (trees/ha)	62
Figure 4.11. Logarithm of MOR (MPa) as a function of stand density (trees/ha)	63
Figure 4.12. Lumber MOR (MPa) as a function of MOE (MPa).....	64
Figure 5.1. Experimental design of the initial spacing at the Nelder plot used in this study.	70
Figure 5.2. A) Real laser-scanned stem with natural deformations. B) Virtual defect-free stem.	71
Figure 5.3. Lumber volume per tree based on real-shape stems with deformations (Y), in relation to	
the lumber volume per tree, based on virtual stems without deformations (X), for 32-yr-old	
jack pine and white spruce stems grown in plantation.	75
Figure 5.4. Lumber volume of real stems with deformations (dm ³ /tree) in relation to stand density	
for 32-yr-old white spruce and jack pine and stems grown in plantation.....	76
Figure 6.1. Example of knot extraction from CT images created with the CT2Opti software	81

Dédicace

Chaque jour passe, mais pas un seul sans que je ne pense à vous

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Michel Beaudoin, mon directeur de thèse, qui malgré une retraite hâtive, a accepté de poursuivre à mes côtés. Il a été présent tout au long de ce parcours, pour m'apporter son soutien, et me prodiguer de bons conseils. Un gros merci également à Isabelle Duchesne, ma co-directrice de thèse, pour son écoute, ses encouragements, sa rigueur, et ses conseils toujours justes et pertinents. Je remercie également Steve Vallerand pour son implication dans plusieurs étapes de ce travail mais particulièrement au niveau du développement du logiciel. Un merci particulier à Alain Cloutier, qui m'a donné la possibilité d'effectuer un retour aux études à la maîtrise et ainsi, parvenir à cette thèse de doctorat. Je voudrais également exprimer ma gratitude au Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick pour m'avoir permis de récolter des arbres sur ce dispositif expérimental ainsi qu'à Edwin Swift et Tessie Tong pour leur aide lors de la récolte. Finalement, mes remerciements au personnel du Centre de recherche sur le bois (CRB) de l'Université Laval et FPInnovations pour leur assistance: Guylaine Bélanger, Colette Bourcier, Jenny McKenzie, Daniel Bourgeault, Luc Germain, David Lagueux, Luc Bédard, Pierre Bédard et Francis Fournier. Cette étude a été soutenue par le Réseau stratégique du CRSNG ForêtValeur et FPInnovations.

Je tiens également à remercier mes parents pour m'avoir soutenu tout au long de mes projets personnels et académiques. Sans vous, je n'aurais pas accompli tout ce que j'ai accompli à ce jour. Merci à toi Karine, pour tes encouragements, ton soutien, ton aide et ton écoute durant ce retour aux études. Sans toi, ceci n'aurait pas pu être possible. Merci à Elliot, Laurie et Clara, mes enfants, qui avec leurs beaux sourires, ont ensoleillé tous mes matins depuis 5 ans.

Avant-Propos

Cette thèse est le fruit du travail de plusieurs intervenants tel que FPInnovations, le Centre de recherche sur le bois et 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 3 « Modélisation du rendement en produits de débitage primaire ». Les travaux de recherche ont été supervisés par Michel Beaudoin (directeur) et Isabelle Duchesne (co-directrice). Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme de doctorat en science du bois et les résultats qui suivent vous sont présentés sous la forme d'une thèse de publications, dont en voici la liste :

Article 1

Belley D. Duchesne I. Beaudoin M. Vallerand S. Tong Q.J Swift D.E. 2013 Assessment of white spruce and jack pine stem curvature from a Nelder spacing experiment. Wood Fiber Sci. 45:237-249.

Article 2

Belley D. Duchesne I. Beaudoin M. Swift D.E (submitted, 2014). The effect of stand density on tree and lumber characteristics of white spruce and jack pine 32 years post-establishment.

Article 3

Belley D. Duchesne I. Beaudoin M. Stem deformation correction factor for accurate estimation of lumber volume recovery of white spruce and jack pine.

Article 4

Belley D. Vallerand S. Duchesne I. Beaudoin M. Sawing optimization based on CT-scanned knot attributes - impact on lumber volume recovery, quality and value.

Un 5e article a été fait en collaboration durant le doctorat :

Tong, Q.J. Duchesne I. Belley, D. Beaudoin, M. Swift, D.E. 2013. Characterization of knots in white spruce plantation. Wood and Fiber Sci 45(1): 1-14

Introduction

Le sciage du bois est une activité pratiquée depuis fort longtemps que ce soit en Amérique du Nord ou ailleurs dans le monde. Au Canada, dès le début de la colonisation, la coupe des arbres ainsi que leur équarrissage étaient faits à la hache. Par la suite, godendard, sciottes et autres outils de coupe arrivèrent afin de simplifier la tâche et d'augmenter la productivité. Au fil des ans, les technologies ont permis de mécaniser et d'améliorer les méthodes de sciage afin d'optimiser les procédés. C'est ainsi que plusieurs avancées technologiques ont conduit les industries des pays producteurs comme le Canada à une automatisation de plus en plus poussée de l'ensemble des opérations.

L'automatisation des opérations de sciage et l'optimisation des procédés se poursuivent encore de nos jours pour assurer la rentabilité des industries et la qualité de leurs produits. Les changements environnementaux, la demande grandissante en produits provenant de forêts certifiées ou encore la diminution constante du diamètre des arbres tronçonnés, sont des facteurs qui forcent les industries canadiennes à innover pour maintenir leurs parts de marché et augmenter la valeur de leurs produits. Pour ce faire, la recherche et le développement sont plus nécessaires que jamais. Le bois est un matériau biologique et donc variable, ce qui rend ses caractéristiques relativement complexes. Les caractéristiques que les arbres obtiendront dans le futur dépendent non seulement de la génétique et de l'espèce, mais aussi de plusieurs autres facteurs dont la compétition pour les nutriments, la densité de peuplement, l'environnement, le type de sol, la luminosité, l'altitude ou encore le climat.

Le rendement en volume et le grade visuel des sciages produits dépendent de la qualité de la ressource utilisée et de plusieurs autres éléments tels que la méthode de débitage utilisée, les essences, des caractéristiques de l'arbre, des travaux sylvicoles, la durée d'entreposage, etc. Bien que beaucoup d'informations soient disponibles et que les connaissances aient grandement évoluées avec le temps, il demeure néanmoins difficile de déterminer avec exactitude l'impact de chacun des facteurs énumérés sur les rendements et la qualité des sciages.

Jusqu'à présent, plusieurs avancées en optimisation et en automatisation ont été réalisées autant sur les opérations de sciage en usine que sur la coupe en forêt. Grâce à ces efforts, les scieries ont réussi à augmenter leur production et assurer une certaine rentabilité. Il reste par contre un secteur où il pourrait y avoir d'énormes retombés économiques. Il s'agit de la détection des défauts internes dans la tige avant le sciage. En effet, beaucoup de pertes pourraient être évitées avec une

détection adéquate des défauts internes des tiges avant de procéder au sciage. Si le débitage primaire tenait compte de ces défauts, il serait possible de maximiser le volume extrait mais surtout la qualité des sciages produits.

La forme des tiges est une caractéristique à considérer du fait qu'elle influence le rendement matière et la qualité des sciages. Nous savons pertinemment qu'une tige sinueuse ou ayant un fort défilement aura un rendement moindre qu'une tige droite possédant un diamètre constant. Il est difficile cependant de quantifier cette perte et peu d'études ont été réalisées sur le sujet (Tong et Zhang (2008)). Les facteurs de correction disponibles ne peuvent pas s'appliquer de façon générale à toutes les régions, essences et conditions de croissance présentes au Canada. De plus, les forêts dites vierges se font de plus en plus rares au Canada, ce qui fait en sorte que les transformateurs du bois devront composer avec des arbres de seconde venue qui auront des caractéristiques différentes de celles des forêts naturelles. Ces arbres auront possiblement une présence plus élevée de nœuds, des nœuds de plus grande taille et une masse volumique plus faible résultant d'une croissance plus rapide et de leur récolte plus hâtive. Il est donc important de se préparer et de bien caractériser ce type de ressource qui constituera une proportion de plus en plus importante de l'approvisionnement des usines de transformation dans un avenir plus ou moins rapproché.

Les objectifs de cette thèse sont :

- Étudier l'effet de l'espacement initial sur les caractéristiques des arbres de pin gris et d'épinette blanche issus d'une plantation de type Nelder. Plus spécifiquement, plusieurs caractéristiques seront étudiées tel que l'effet de l'espacement initial sur les propriétés des sciages, le développement d'un facteur de correction du volume de sciage en fonction de la forme des tiges et du calcul de la courbure d'une nouvelle façon,
- Modéliser la présence des nœuds dans les billes avant sciage. Plus spécifiquement, il faudra être en mesure de lire l'information des nœuds dans les billes d'épinettes blanche et de pin gris, d'évaluer leurs impacts sur les rendements du sciage en volume, en qualité et en valeur à l'aide d'Optitek, un logiciel de simulation du procédé du sciage.

CHAPITRE 1 Revue de littérature

1.1 Survol de la situation forestière

L'industrie forestière est un secteur économique très important pour le Québec. Le total des emplois directs et indirects dépendant de la forêt se chiffrait à plus ou moins 210 000 postes pour l'année 2005 mais il a chuté à environ 62 777 en 2011 étant donnée la conjoncture économique. En 2010, le chiffre d'affaires de l'exploitation forestière totalisait 1,9 milliard de dollars alors que celui pour la fabrication de produits en bois était de 5,1 milliard de dollars en 2011. Le nombre d'usines de sciage au Québec en 2011 se chiffrait à environ 134 usines (CIFQ).

Au Canada, le Québec se classe deuxième derrière la Colombie-Britannique pour la production de bois d'œuvre résineux comme le montre le tableau 1 qui présente les statistiques des années 2007 à 2011. La figure 1.1 présente la répartition de la production de bois de résineux entre les différentes provinces canadiennes en 2011.

Table 1.1. Production canadienne de bois d'œuvre résineux en 2007-2011
(Source : CIFQ)

(En milliers de m³)

Province	2007	2008	2009	2010	2011
Colombie-Britannique	15 543	11 947	9 736	11 482	12 348
Québec	5 847	4 970	3 781	4 660	4 196
Ontario	3 094	2 198	1 413	1 424	1 248
Alberta	3 208	3 112	2 810	3 191	3 119
Nouveau-Brunswick	1 359	977	785	967	963
Nouvelle-Écosse	518	346	228	382	362
Saskatchewan	120	-	-	-	-
Manitoba	247	-	-	-	-
Canada	29 937	23 791	18 831	22 188	22 352

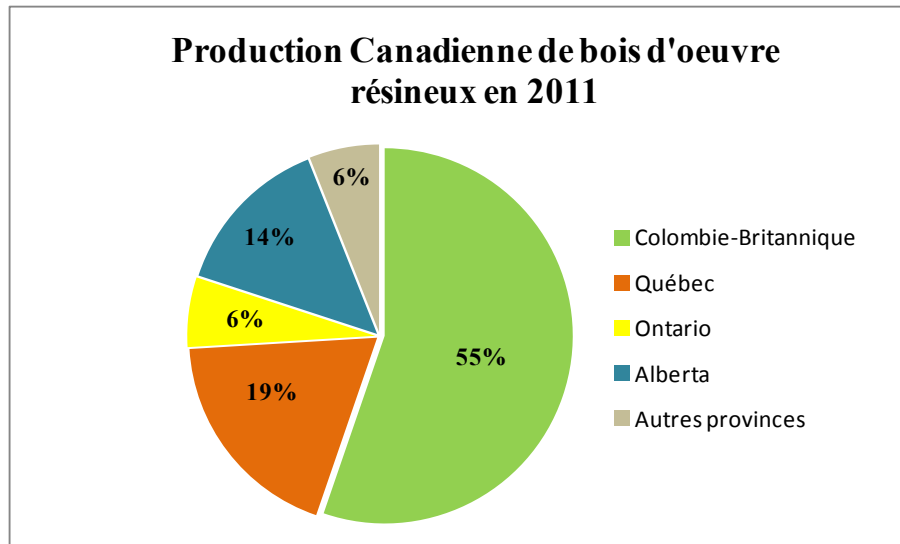


Figure 1.1 Production canadienne de bois d'oeuvre résineux en 2011 (Source : CIFQ)

Au Québec, la superficie forestière productive accessible du domaine public représente 276 968 km² alors que celle du secteur privé s'élève à 66 246 km². En 2011, la récolte de résineux s'est chiffrée à 15,4 million de m³ dans les forêts publiques et de 2,2 millions de m³ pour le secteur privé. (CIFQ)

1.2 Effets de la gestion de la densité du peuplement sur le volume et la qualité des produits

1.2.1 Le volume et la qualité

La croissance des arbres est tributaire de plusieurs facteurs qui affectent le développement du feuillage, la taille et le diamètre des arbres, la quantité de branches et le diamètre des nœuds, la qualité du bois, sa résistance, etc. En fait, les caractéristiques d'un arbre sont déterminées dès le début de sa croissance. Il faut prendre en considération tous ces éléments pour comprendre les attributs des arbres qui nous intéressent.

La croissance des arbres de la forêt boréale québécoise est lente, voire beaucoup plus lente que celle de plusieurs de pays compétiteurs. Les rendements en volume des plantations sont généralement plus élevés que ceux des forêts naturelles, grâce à l'utilisation de semences améliorées et au recours à des espèces à croissance rapide (Thiffault *et al.* 2003). De

façon générale, les propriétaires ou intervenants forestiers cherchent toujours à maximiser le volume du bois à l'hectare sans trop prendre en considération l'effet sur la qualité des produits du bois. Aussi plusieurs actions peuvent être réalisées sur un boisé. Par exemple, une éclaircie effectuée dans un peuplement résineux de quinze ans n'aura pas le même effet que s'il était effectué à l'âge de trente ans. La séquence et l'âge d'un peuplement, où sont effectués des travaux sylvicoles, influencent la qualité finale du bois comme par exemple les propriétés mécaniques.

D'autres facteurs sont également à considérer. Il est difficile de déterminer comment le développement des branches s'effectue au sein d'un peuplement d'arbres, d'identifier comment le couvert forestier évoluera de façon dynamique au fil des ans. Les effets de la densité des peuplements et de l'indice de qualité de station sur le développement des arbres et de leurs branches sont partiellement connus. Par contre, lorsqu'on veut prévoir la croissance et les caractéristiques des arbres à moyen et long terme, il faut prendre en considération la structure totale du couvert forestier. Kellomäki and Tuimala (1981) ont démontré que dans les jeunes plantations de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), le taux de naissance et de mortalité des branches est relié à la densité de plantation.

La croissance plus rapide d'un arbre a une incidence sur les propriétés des bois résineux tel que démontré par Briggs et Smith (1986), Fahey *et al.* (1991), Jozsa et Middleton (1997). L'augmentation de la production de matière ligneuse à l'hectare est souhaitable et recherchée par l'industrie mais il faut également prendre en compte les caractéristiques recherchées pour le produit final. Si la résistance mécanique est recherchée prioritairement, l'augmentation du volume à l'hectare, c'est-à-dire du taux de croissance, n'aidera pas nécessairement à atteindre cet objectif de qualité.

La production de matière ligneuse est relativement faible dans l'est du Canada avec un taux de croissance d'environ 1,5 m³ ha⁻¹an⁻¹ (MRNFP 2003). Plusieurs études ont été réalisées sur le terrain afin de trouver des façons d'augmenter la production de matière ligneuse. Ces études portaient sur l'accroissement en volume de chacune des tiges afin d'être en mesure de produire plus de sciages. Il a été possible, grâce à divers dispositifs, de produire effectivement plus de volume en modifiant par exemple la densité de peuplement. La manipulation de la densité consiste à réguler le nombre et l'arrangement des tiges par unité de surface par l'espacement initial ou encore, par une séquence temporelle d'éclaircies. Johansson (1992) a déterminé, dans son étude sur l'épinette de Norvège, qu'un plus grand espacement initial résultait en un DHP moyen plus grand ainsi qu'à un diamètre de branches moyen plus élevé. En contrepartie, les sciages provenant de ces tiges se sont avérés de plus faible résistance. Ainsi, la production en volume ne va pas nécessairement de paire avec la qualité. L'effet négatif d'un fort taux de croissance sur les propriétés mécaniques des bois résineux a été démontré (Biblis *et al.* 1995, Kang *et al.* 2004a, Tong and Zhang 2005). Le degré de perte de qualité dépendra de la densité de peuplement. Par

exemple, un arbre poussant seul dans un champ aura tout le loisir de pousser librement (figure 1.2). Les branches seront présentes sur la totalité de la tige d'où une présence élevée de nœuds. La proportion de bois juvénile est également beaucoup plus élevée lorsque les arbres poussent dans une faible densité de peuplement car le houppier vivant y est très développé et que le bois formé sous l'influence des hormones (auxines) est de type juvénile (Larson 1963). On remarque également le fort défilement des arbres poussant sans compétition.

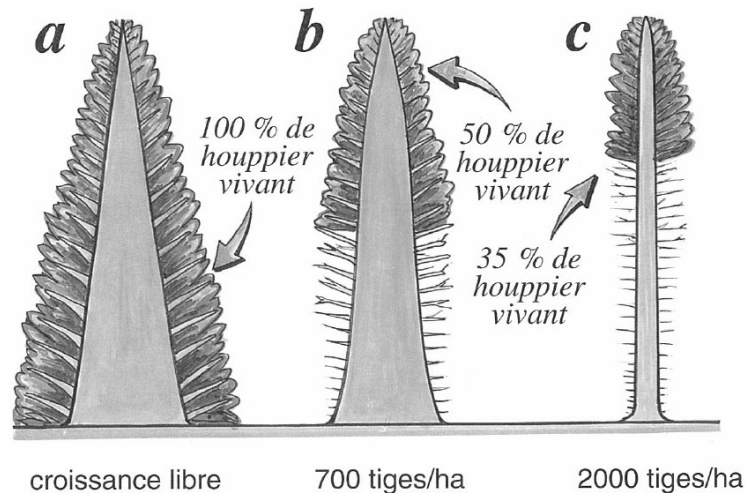
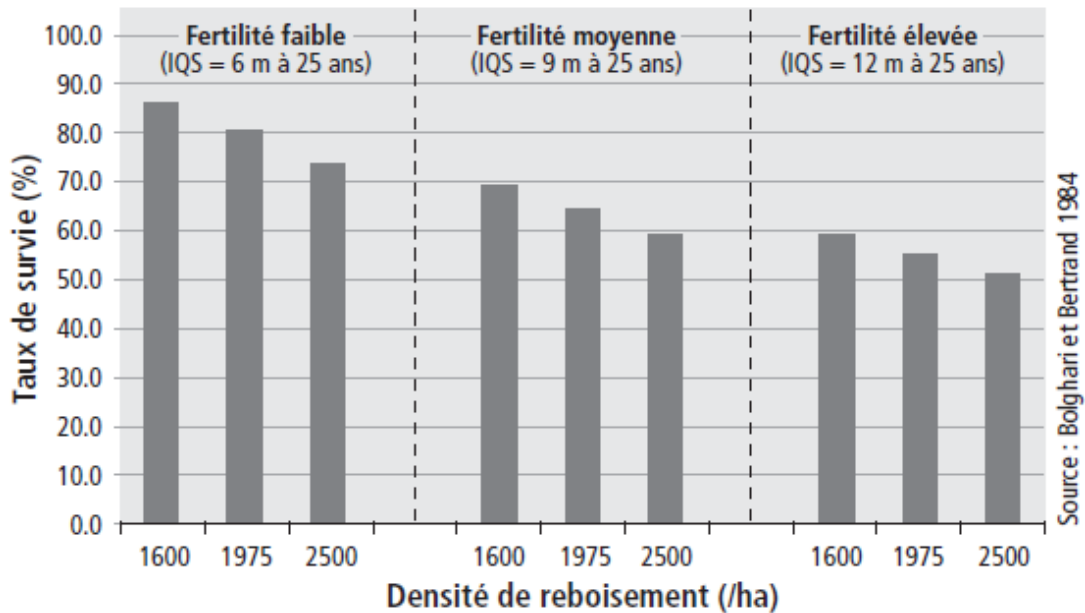


Figure 1.2. Effet de la densité de peuplement sur le développement du houppier (Source : Jozsa et Middleton, 1997.)

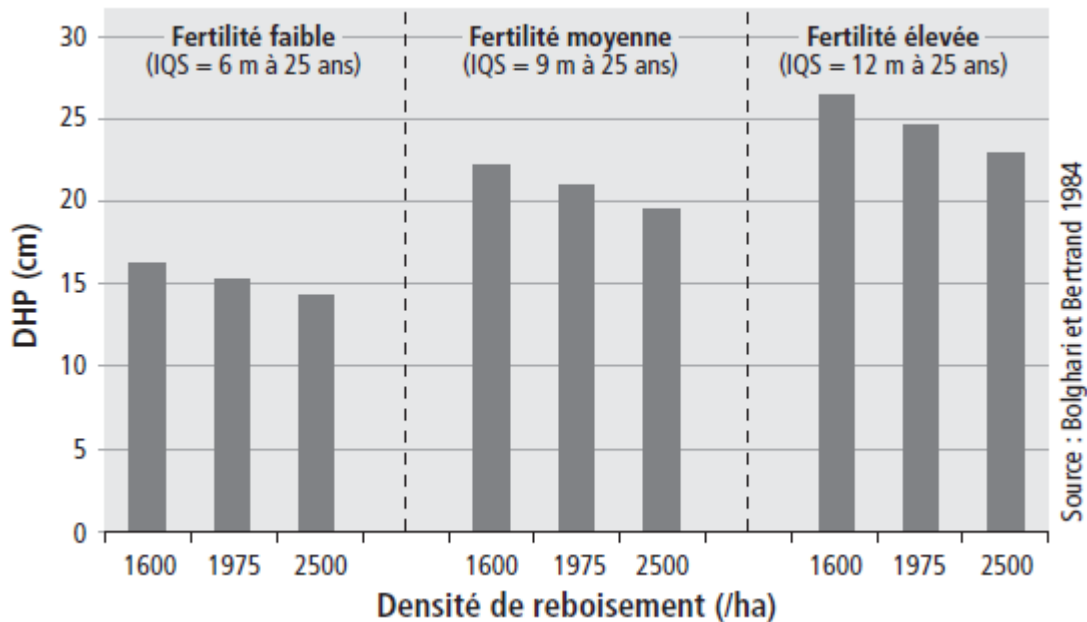
L'indice de la qualité de station, souvent utilisée pour évaluer le potentiel de croissance d'un peuplement forestier (Alemdag 1991), est un élément important à considérer car le développement du feuillage d'un peuplement donné en dépend, tout comme de la quantité de nutriments disponibles (Brix, 1971, Albrektsen 1980, Axelsson 1984), de la quantité d'eau disponible (Linder & Axelsson 1982) et du climat (Bergh *et al.* 1998). La figure 1.3 présente le taux de survie des arbres, à l'âge de cinquante ans, d'une plantation d'épinette blanche en fonction de la qualité de station ainsi que de la densité du peuplement. On remarque que plus la qualité de station est élevée, plus le taux de survie est faible. Ceci s'explique par le fait qu'un sol fertile favorise la croissance des arbres et qu'ainsi la compétition entre les arbres s'installe plus rapidement. On remarque également qu'une densité de peuplement plus faible favorise le taux de survie puisqu'il y a moins de compétition entre les arbres.



Source : Bolghari et Bertrand 1984

Figure 1.3. Taux de survie estimé à 50 ans pour les plantations d'épinette blanche selon la densité de reboisement et la qualité de station (Source : Bolghari et Bertrand, 1984)

Dans la figure 1.4, on observe que le DHP est influencé non seulement par la densité de reboisement mais aussi par la qualité de station. En effet, on remarque que plus la densité du peuplement est faible, plus le diamètre des arbres est élevé. On note également que l'influence de la qualité de station a un effet plus important que l'espacement lui-même. Lorsqu'on passe d'une densité de peuplement de 1600 à 2500, le DHP varie de trois à cinq cm peu importe la qualité de station. Par contre, lorsque nous comparons les différentes qualités de station avec la même densité de reboisement, on remarque un effet beaucoup plus important sur le DHP. Une différence au niveau des diamètres des arbres pouvant aller jusqu'à dix cm est notée entre la station de faible fertilité et celle de fertilité plus élevée.



Source : Bolghari et Bertrand 1984

Figure 1.4. Diamètre à hauteur de poitrine (DHP) estimé à 50 ans pour les plantations d'épinette blanche selon la densité de reboisement et la qualité de station (Source : Bolghari et Bertrand, 1984)

Les plantations ou la forêt naturelle ne réagissent pas toutes également aux éclaircies. Il est possible d'influencer la densité de peuplement lors de la plantation initiale des semis ou lors d'une action subséquente comme, par exemple, une éclaircie. Le fait d'éclaircir un peuplement a ses avantages et ses désavantages qu'il faut prendre en considération afin de prendre les bonnes décisions et obtenir les résultats désirés. Généralement, les éclaircies permettent d'augmenter la croissance en diamètre et en volume des tiges tout en diminuant leur mortalité (Zobel and van Buijtenen 1989, Pfister *et al.* 2007). Plusieurs facteurs peuvent influencer les résultats de l'éclaircie, entre autres, son intensité, l'âge des arbres concernés, la qualité de station, les autres travaux sylvicoles (ex. élagage), l'espèce, etc. Plusieurs études ont été réalisées pour mieux comprendre l'effet des éclaircies sur la croissance des arbres et la qualité des produits.

Dans une étude sur le pin gris, Duchesne et Swift (2008) ont trouvé que l'éclaircie avait une influence sur le volume récolté. En 1977, à l'âge de 40 ans, le peuplement de pin gris a subi une éclaircie et 30 ans plus tard une récolte a été effectuée. Dans la figure 1.5, on voit bien l'effet de l'éclaircie commerciale tardive sur le DHP. En effet, le volume moyen par tige a augmenté de 103% avec l'éclaircie (de 0.141 à 0.357 m³/tige). Cette étude a également mis en évidence que les arbres ayant un taux de croissance plus rapide avaient des propriétés mécaniques inférieures. Dans l'étude de Duchesne et

Tanguay (2010) sur le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) MILL), la conclusion a été la même. Plus la croissance de l'arbre est rapide moins les propriétés mécaniques sont élevées.

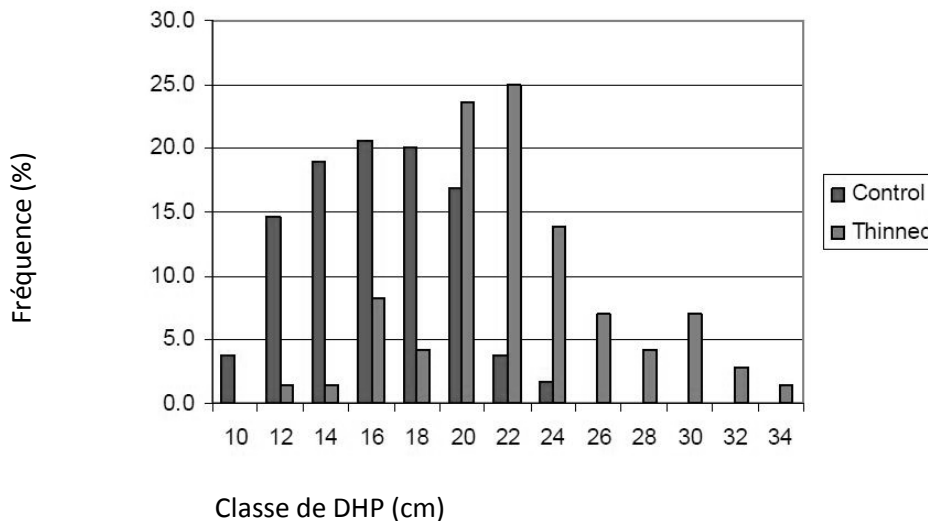


Figure 1.5. Fréquence des classe de DHP sur une éclaircie versus le témoin (Source : Duchesne et Swift. 2008)

Le défilement est une caractéristique importante influençant la quantité de pièces de bois que l'on extrait d'une bille. Le défilement est largement relié à la densité de peuplement. Plus la densité est faible, plus le défilement sera grand. Dans un secteur où les arbres ont plus d'espace entre eux, les branches ont plus de place pour proliférer. Cette prolifération engendre une augmentation du taux d'auxines qui sont à l'origine de la croissance de l'arbre. L'arbre aura donc un DHP supérieur ainsi qu'une présence plus élevée de bois juvénile qu'un arbre croissant dans un peuplement de forte densité. En forte densité, les arbres auront tendance à pousser en hauteur pour aller chercher la lumière. De plus, les arbres étant très proches les uns des autres, un élagage naturel s'effectuera avec les années.

En peuplement naturel, la question ne se pose pas vraiment à moins d'y faire des éclaircies mais lorsqu'il s'agit de bois de plantation, il se peut que les objectifs visés initialement résultent à terme en une perte de qualité et de volume au moment du sciage. C'est le cas, par exemple, lorsque les objectifs sylvicoles portaient avant tout sur l'accroissement du volume. Des tiges ayant le même volume ne produiront pas nécessairement la même quantité et la même valeur en sciages. Zhang *et al.* (1998) ont démontré que l'éclaircie augmentait le défilement des tiges de sapin baumier et, de ce fait, diminuait le rendement au sciage. De plus, les sciages provenant de ces plantations présentaient des propriétés mécaniques moindres.

1.3 Caractéristiques de qualité du bois

1.3.1 Nœuds

On ne peut parler des nœuds sans évoquer le développement des branches dans les arbres. En effet, la taille et la quantité des nœuds trouvés dépendent de la croissance des branches. En réalité, le diamètre, la fréquence et la distribution des nœuds sont liés à l'essence, la densité de peuplement et l'indice de qualité de station. Le nœud est la partie d'une branche englobée dans le bois au cours de sa croissance (Jozsa et Middleton, 1997). Avec le temps, les branches peuvent croître jusqu'à devenir très grosses ou tout simplement mourir. Lorsque les branches meurent et tombent (élagage naturel), le tronc continue sa croissance en diamètre et les branches sont recouvertes par la croissance de la tige. Dans ces cas, lorsque nous effectuerons le débitage, la partie où la branche était encore vivante produira des nœuds sains ou adhérents. Par contre, les sciages provenant de la partie de la branche morte qui aura été recouverte par le bois produira des nœuds lâches ou non-adhérents. Comme on peut le voir dans la figure 1.6, Moberg (2001) présente les différents types de nœuds retrouvés dans les arbres. Dans le cas des branches mortes et recouvertes, leur présence ne sera dévoilée que lors du débitage des billes.

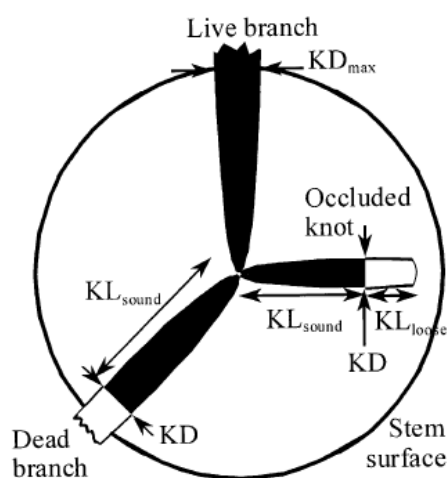


Figure 1.6. Illustration du diamètre des différents types de nœuds
(Source : Moberg 2001)

Une fréquence élevée de nœuds peut rendre les colombages moins résistants, tout dépendant de leur taille et de leur position dans la pièce. Les nœuds sont l'un des défauts influençant le plus la qualité d'une bille de bois lors du sciage (Oyen

et al. 1999). Le nœud est accompagné d'une déviation de fil latérale plus ou moins prononcée, ce qui résulte en une augmentation des contraintes locales suite au changement dans la géométrie longitudinale des fibres (Bodig and Jayne, 1982, Tong et al 2013).

Les nœuds ont été étudiés par de nombreux chercheurs. Duchesne et Swift (2008), dans leur étude sur le pin gris, ont trouvé que le peuplement ayant subi une éclaircie avait des DHP supérieurs au peuplement témoin mais aussi des diamètres de branches plus grand. Moberg (1999) a également trouvé sur les sites ayant un indice de qualité élevé que les branches avaient un plus gros diamètre lorsque l'espacement était plus grand (voir Figure 1.7). Par contre, sur les sites pauvres, la différence était moindre, voir minime. Il a également observé que la distribution des gros nœuds semblait être la même, peu importe l'indice de qualité de station. C'est-à-dire que le diamètre des nœuds croît de la base de la tige jusqu'à une certaine hauteur puis, décroît par la suite, tel qu'illustré à la figure 1.7. Il semble que le diamètre maximal des nœuds dans l'arbre est atteint près de la base de la cime vivante. Björklund (1997) a étudié la structure des nœuds du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), ce qui lui a permis de découvrir une augmentation du diamètre des nœuds à la base de la tige.

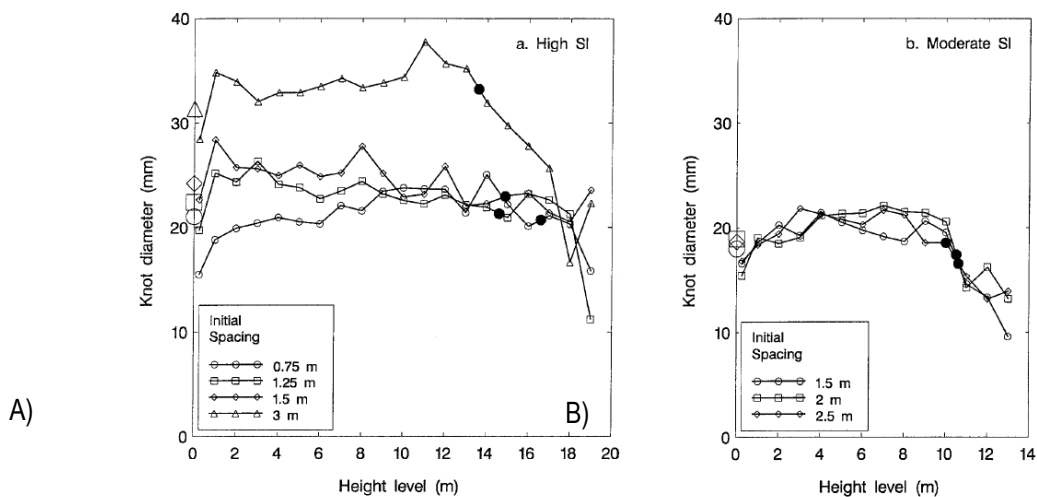


Figure 1.7. Diamètre moyen des nœuds pour un site de qualité élevée S_h (a) et un site pauvre S_m (b) pour les divers DHP rencontrés et les divers espacements. Les points noirs indique l'emplacement des premières branches vivantes (Source : Moberg 1999)

À la figure 1.8, les sites de qualité supérieure donnent naissance à des nœuds de plus grosses dimensions et les tiges ayant un diamètre plus grand ont développé des nœuds de plus grande dimension. On remarque finalement que les tiges de pin sylvestre ont développé des nœuds plus gros sur la partie sud de leur tronc. Des recherches affirment que la position du

soleil influence la croissance des nœuds dans un arbre. Moberg (1999) affirme que, de façon générale, les nœuds plus gros ont été trouvés au sud et que les nœuds plus petits se retrouvaient au nord (voir figure 1.9). Lemieux (2002), quant à lui, a trouvé que la fréquence des nœuds était beaucoup plus grande du côté sud mais le diamètre n'était pas le plus grand au sud. Tong *et al.* (2013) rapporte que le nombre de nœuds de grosse dimension étaient en plus grand nombre dans la direction sud chez l'épinette blanche.

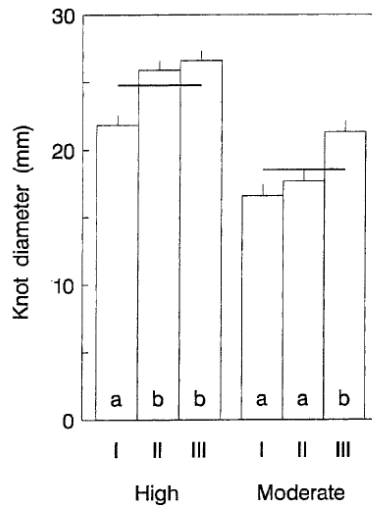


Figure 1.8. Diamètre moyen en fonction des classes de diamètre (I, II, III) et de l'indice de qualité de station (élevé et modéré). Les classes de diamètres ayant des lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$) (Source : Moberg 1999)

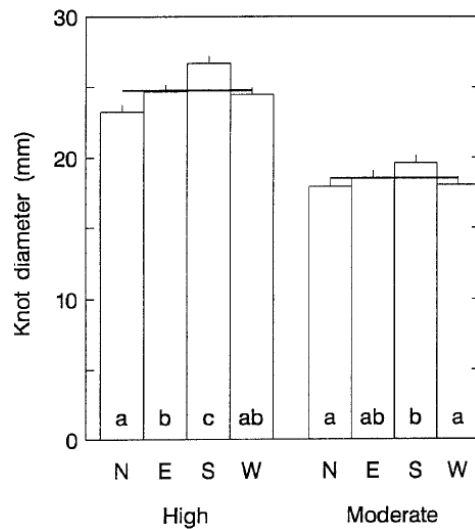


Figure 1.9. Diamètre moyen en fonction de l'azimut (N, E, S, W) et de l'indice de qualité de station (élevé et modéré). Les classes de diamètres ayant des lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$) (Source : Moberg 1999)

1.3.2 Défaut de forme

Les déformations des tiges réduisent considérablement le rendement matière au sciage (Monserud *et al.* 2004). Pour évaluer l'impact de la forme de la tige sur le rendement en produits du sciage, le logiciel Optitek s'avère intéressant. Ce logiciel de simulation, développé par FPInnovations, permet de modéliser le procédé de sciage pour les bois résineux et feuillus. On doit fournir au logiciel les caractéristiques de l'approvisionnement qui peuvent être établies à l'aide de deux méthodes soit à l'aide d'un scanner de forme ou de mesures manuelles. La méthode manuelle consiste à prendre le diamètre à différents intervalles le long de la tige ainsi que les cordonnées correspondant à chacun des diamètres mesurés.

Avec les données d'inventaire forestier il est difficile d'évaluer les potentiels de sciage car la forme de la tige n'est pas prise en compte. Pour évaluer l'impact de la courbure des tiges sur les sciages, il est possible de calculer un facteur de correction du volume en reconstruisant une tige de manière virtuelle grâce à une équation de défilement. En effet, avec le DHP, la longueur totale de la tige et les données du site, il est possible de reconstruire virtuellement une tige. C'est dans cette optique que Sharma et Zhang (2004) ont développé, un modèle pour évaluer le défilement des tiges en utilisant le DHP. Dans leurs travaux, ils ont développé une équation de défilement pour le pin gris, l'épinette noire et le sapin baumier.

Cependant, la tige virtuelle ainsi reconstruite est complètement droite et sans aucune déformation. Il est difficile de bien évaluer le rendement matière à partir des inventaires forestiers car les tiges, ont en réalité, des formes bien différentes. Un facteur de correction peut être appliqué pour tenir compte des défauts de forme et calculer plus précisément le rendement matière. C'est ce que Tong et Zhang (2008) ont fait dans leurs travaux sur le pin gris provenant de peuplements naturels. D'autres chercheurs ont également développé des équations de défilement (Kozak 2004, Sharma et Zhang 2004). Certains utilisent l'information de la surface terrière pour bonifier leur équation de défilement (Sharma et Parton (2009).

Dans la figure 1.10, on constate que Tong et Zhang (2008) ont effectué deux simulations soit une pour les usines produisant du bois de dimension et l'autre du colombage. L'usine de colombage coupe toutes les billes en huit pieds de long. Dans l'autre usine traitant du bois de plus grosse dimension, les billes peuvent être coupées en longueur de 16 pieds. Dans ces usines, les billes ayant un diamètre supérieur à 16 cm au fin bout sont envoyées à la scie à ruban double (twin band saw).

Les billes de moins de 16 cm sont sciées comme le font les usines de colombage. Le rendement matière moyen dans le cas de l'usine de dimensions était de 73.2% pour les tiges réelles et de 77.9% pour les tiges virtuelles.

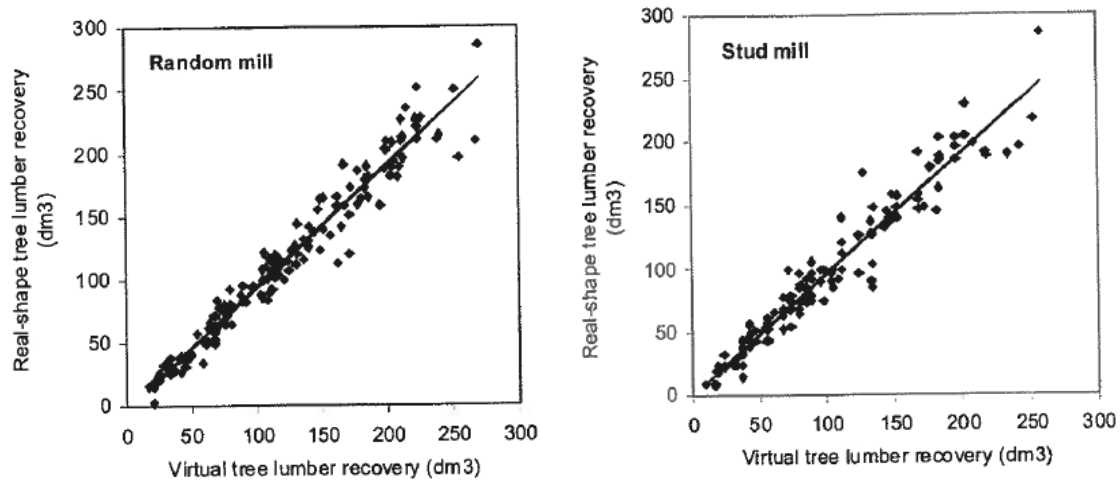


Figure 1.10. Rendement matière en volume des sciages de tige réelle en relation avec des tiges virtuelles pour deux types d'usine, de dimension et colombage (Source : Tong et Zhang 2008)

Dans le cas des deux simulations, les tiges virtuelles ont donné un meilleur rendement en volume de sciage que les tiges réelles. Les défauts de forme de ces dernières expliquent les écarts. Dans la figure 1.10, on remarque, dans les deux cas, que la relation entre la tige réelle et virtuelle est linéaire. Tong et Zhang (2008) ont développé l'équation suivante pour exprimer la relation entre les tiges virtuelles et réelles :

$$V_{real-shape} = a + bV_{virtual} \quad (1)$$

Où :

- $V_{real-shape}$: Volume provenant des tiges réelles
- $V_{virtual}$: Volume provenant des tiges virtuelles
- a et b : paramètres estimés de la régression linéaire

La forme des tiges doit être étudiée d'avantage pour mieux la comprendre et si possible avoir un certain contrôle sur elle. Il faut comprendre comment les déformations se produisent et dans quel contexte elles peuvent survenir (densité de peuplement, essence, ensoleillement, etc.) pour favoriser une meilleure utilisation de la ressource ligneuse.

1.4 Technologie et procédé du sciage

1.3.3 Procédé du sciage

Dans les années 50, des gens visionnaires faisaient des essais en utilisant les vibrations acoustiques pour déterminer les constantes élastiques du bois (Hearmon (1948), Jayne (1955), de James (1959), de Kollmann et Kreck (1960) et de Fukada *et al.* (1956)). Les méthodes pour évaluer les défauts internes du bois sont liées à de nouvelles découvertes qui ont exigé beaucoup de temps, dans plusieurs cas, avant d'être mises en marché. Prenons par exemple, le cas de la tomographie actuelle basée sur les calculs mathématiques de Radon datant de 1917. Pour profiter du premier scanner médical, il a fallu attendre près de soixante ans. L'honneur revient conjointement au physicien Allan Cormack et au britannique Godfrey Hounsfield qui, grâce à leurs travaux, mettaient au point la technique de la tomodensitométrie X. Cet évènement coïncide avec la mise au point du premier scanner médical en 1972 (Longuetaud 2005).

Au cours des vingt dernières années, beaucoup d'efforts ont été investis dans le développement de nouvelles technologies en vue d'optimiser les procédés de transformation du bois. L'avènement de l'informatique, des logiciels d'optimisation et des systèmes de vision artificielle ont fourni des moyens puissants pour mieux comprendre la ressource et optimiser les procédés. Plusieurs entreprises vouées à l'amélioration de la productivité des traitements du bois et des scieries ont été créées au cours des années 80 et 90. L'utilisation du laser jumelée aux logiciels d'optimisation ont aidé grandement les entreprises à améliorer leur rentabilité et les travailleurs en usine à prendre de meilleures décisions. L'installation de machines pour classer mécaniquement les sciages (MSR) dans les usines permettait également d'ajouter une plus value dans les produits.

C'est le cas du classement visuel du bois dans les usines de sciage. L'assistance offerte par les lasers et les ordinateurs qui détectent en temps réel les défauts de forme comme le touche et manque, le cambré, les dimensions, etc, ont beaucoup aidé les responsables de la classification du bois. Dans les années 2000, les caméras au rabotage ont fait leur apparition

avec traitement en noir et blanc d'abord et en couleur par la suite. Ces technologies combinées ont permis le classement des sciages en réduisant significativement l'intervention humaine, rendant ainsi les opérations beaucoup plus efficaces. Il faut rappeler que le personnel qui classait les pièces de bois disposait d'environ une seconde environ par pièce pour déterminer le grade et la longueur désirée pour l'éboutage. Le risque d'erreur était élevé considérant que le travail était répétitif tout en exigeant une attention soutenue. Huber *et al.* (1985) faisait déjà état de cette problématique. En effet, ils avaient effectué un test de classement dans une usine de sciage de chêne rouge et il s'est avéré que le taux d'erreur des six classeurs faisant partie de l'étude s'élevait à 32%. Toutes ces optimisations des procédés ont permis de passer à un facteur de consommation de 5,6 m³/Mppm dans les années 70-80, à un facteur de 4 m³/Mppm dans les années 1990-2000 dans le résineux. Parallèlement à cet état de fait, le volume moyen des arbres au Québec est passé de 170 dm³ à environ 120 dm³ pour la même période (Bédard, 2001).

De nos jours, les opérations de la majorité des scieries d'importance ont été optimisées pour faire face à une concurrence mondiale féroce et pour compenser les difficultés d'approvisionnement que les industries connaissent. Il est maintenant possible d'obtenir un haut rendement dans les scieries à l'aide des technologies et des procédés optimisés. Cependant, ces derniers prennent effet après que le débitage primaire des billes soit complété. Il demeure que l'étape la plus importante, soit le débitage, n'est pas optimisé à 100% et donc les pertes encourues peuvent être substantielles.

Cette situation a fait réfléchir plusieurs intervenants qui se sont interrogés sur les méthodes d'optimisation du débitage. Idéalement, il faudrait voir l'intérieur de la bille avant sa découpe. Pour le bois franc, l'acheteur ou le scieur de bois utilise une forme de classement pour évaluer la qualité des billes. En fonction des défauts externes retrouvés sur la bille de bois franc, un grade est appliqué. Les classeurs considèrent le diamètre des billes, la rectitude ainsi que les défauts apparaissant à la surface avant d'apposer un grade. Plus le classement est élevé, plus la qualité sera élevée. Ils peuvent ainsi déterminer les meilleurs sciages à faire pour ces billes.

Il est également possible de classer les arbres sur pieds en effectuant une inspection visuelle. Ces méthodes, plus ou moins précises, permettent dans une certaine mesure d'identifier la qualité des billes en fonction de l'utilisation projetée (MRN, 2013). Le déroulage demande, par exemple, des billes de bon diamètre, sans défauts apparents, ce qui n'est pas le cas pour les pâtes et papiers. Il est possible de faire appel aux méthodes acoustiques pour classer les tiges abattues tout comme les arbres sur pieds. Selon la vitesse à laquelle se propage le son dans la bille, il est possible d'évaluer en partie la

qualité du sciage grâce à l'estimation du MOE. Ces méthodes donnent une approximation de la qualité des tiges ou des billes sans permettre toutefois l'optimisation du sciage car elle ne localise pas la position des défauts internes dans la bille. L'opérateur du chariot dans les scieries de bois franc observe la qualité de surface sur les billes et débute le débitage en fonction des défauts visibles. Lorsqu'il effectue la première découpe, l'opérateur peut voir une partie des défauts internes mais comme il s'agit d'une opération destructive, il ne peut faire marche arrière. Au fur et à mesure qu'il débite la bille, l'opérateur voit les défauts internes apparaître et il peut procéder à des ajustements pour le reste de l'opération.

Sans information sur les défauts internes des billes, des erreurs sont commises lors du débitage, ce qui occasionne des pertes pour les industries de la transformation du bois. Harless *et al.* (1991) ont démontré que le fait de tenir compte des défauts internes dans la stratégie de sciage dans les billes de bois franc permettait d'augmenter significativement la valeur et la qualité des grades des pièces produites. Tel que mentionné, les scieries de résineux optent actuellement pour une maximisation du volume de sciage. Lemieux (2002) a trouvé qu'en effectuant une rotation pour les pires et les meilleures solutions de sciage d'épinette noire au point de vue qualité, il n'y avait pas vraiment de différence pour le classement visuel. Cependant, pour les essais mécaniques les meilleures solutions de sciage ont obtenu significativement des modules de rupture (MOR) et des modules d'élasticité (MOE) plus élevés que les pires solutions de débitage, ce qui laisse entrevoir que le classement visuel des sciages ne concorde pas nécessairement avec les propriétés mécaniques.

Au Québec, pour les résineux, on ne regarde pas vraiment les défauts de surface des billes. On optimise le sciage des billes pour le rendement en volume. La façon de faire est simple, un scanneur de forme pour les billes positionne ces dernières en vue d'obtenir le maximum de volume lors du sciage. Pour le bois franc, l'apparence visuelle (couleur, nœuds) revêt une importance capitale dans l'attribution des grades (NHLA). Dans le résineux l'apparence est moins importante puisque le bois est principalement utilisé comme bois d'œuvre structural. Par contre, les défauts internes comme les nœuds ou la pourriture peuvent produire du colombage de moindre résistance mécanique, ce qui résulte en une perte de qualité.

1.3.4 Tomodensitométrie à rayons X (computed tomography Ct-scan)

Ces dernières années, plusieurs méthodes ont été testées pour évaluer les défauts internes des billes de bois comme les rayons X, la résonance magnétique, les ultrasons, etc (Guddanti *et al.* 1998, Schmoltdt *et al.* 2000, Rojas 2005, Longuetaud 2005). Ces méthodes ont des avantages et des limites. Les essais réalisés, ces dernières années, démontrent que les

images obtenues à l'aide de la technologie CT-Scan (Computed Tomography Scan) sont prometteuses. Il apparaît que la forte énergie émergeant des rayons X permet facilement au CT-Scan de faire l'inspection de l'intérieur des billes. Les méthodes non destructives pour visualiser l'intérieur des billes ne sont pas très répandues dans l'industrie compte tenu des vitesses relativement lentes de traitement de l'image ainsi que des conditions difficiles à l'intérieur des usines. Dans un contexte de recherche, le scanner à rayons X a été utilisé au cours des vingt dernières années pour diverses études ayant comme objectifs l'analyse de la branchaison, de divers défauts internes (pourriture, nœuds, poches de résine, etc.), de la densité, de la distribution de l'eau dans les arbres. Des intervenants tels que Bucur (2003), Rojas Espinoza (2005) et Longuetaud *et al.* (2005) ont présenté l'ensemble des méthodes de détection des défauts non-destructives pour le bois. Dans le cadre de ce document, on s'attarde à la description des méthodes utilisées lors des travaux réalisés

La tomographie assistée par ordinateur (computed tomography) est normalement utilisée pour le diagnostic du corps humain. Cette méthode non destructive est probablement celle qui a été la plus étudiée pour l'analyse des défauts internes dans le bois. Le CT-Scan permet l'évaluation de la variation de la densité dans le bois. L'information obtenue d'une image CT est directement reliée à la densité de l'objet qui se traduit par différentes intensités de gris.

Le principe du scanner à rayons X est relativement simple. On recueille l'information grâce à un émetteur de flux à rayons X et un récepteur. Ces deux composants tournent 360° autour de l'objet à évaluer en étant synchronisés. Le flux de rayons X passe à travers l'objet à chaque degré de rotation et le récepteur mesure les valeurs transmises. Le système émet une intensité connue et le récepteur mesure l'intensité reçue de l'autre côté de l'objet. De cette manière, il est possible de calculer l'atténuation qui se définit comme étant la réduction du flux de radiation. Plus précisément, lorsque le flux de rayons X passe au travers l'objet, certains photons sont absorbés et d'autres perdus. Le coefficient d'atténuation linéaire varie avec la composition du matériel et la densité (Seeram 2001). Les mesures d'atténuation calculées par le récepteur sont envoyées à un ordinateur pour y être traitées.

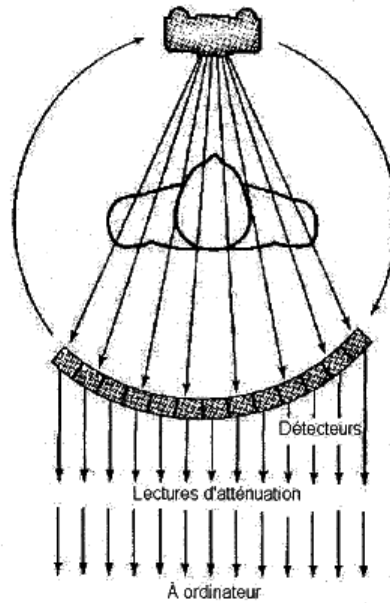


Figure 1.11. Principe technique du scanner à rayons X (Source : Seeram 2001)

Pour le traitement des images, des recherches ont été réalisées et plusieurs méthodes ont été développées. Par exemple, dans une bille qui contient un nœud, on essaiera de segmenter (isoler) la zone d'intérêt dans l'image de la bille pour ensuite la traiter. Taylor (1984) a utilisé des méthodes de segmentation basées sur le niveau de gris obtenu grâce à des histogrammes de fréquence d'intensité. Funt et Bryan (1987) ont utilisé la forme elliptique des nœuds et la densité pour distinguer le bois sain du bois pourri qui possède une basse densité et une texture rugueuse. Il y a plusieurs méthodes pour l'évaluation des images CT. Les méthodes utilisées dépendent des contraintes de l'image et des défauts que l'on souhaite analyser. À l'aide d'algorithmes de reconstruction, il est possible d'obtenir une représentation en trois dimensions (3D) à partir d'images successives en deux dimensions (2D) de l'objet scanné. Chaque pixel contenu dans l'image correspond au coefficient d'atténuation équivalent au volume du pixel. Le volume du pixel est déterminé par la taille du pixel et par l'épaisseur du flux des rayons X (Schmoldt *et al.* 2000). Normalement, dans la majorité des exemples, chaque pixel de l'image CT est associé à un nombre CT qui représente le coefficient d'atténuation du volume représenté par le voxel et la transmission des rayons X.

La plupart des études réalisées sur le traitement des images CT sont d'ordres qualitatifs puisqu'elles nous présentent une évaluation sommaire de la capacité d'identification et de la séparation des défauts internes. Quelques études sont allées un peu plus loin en nous présentant des résultats quantitatifs. Bhandarkar *et al.* (1999) ont obtenu pour l'érable à sucre, des

valeurs de précision de 84% et 80% pour la détection des nœuds et des fentes. Schmoltdt *et al.* (2000) ont obtenu des valeurs de précision entre 91%-92% pour la détection de défauts tels que les fentes, les nœuds, la pourriture et l'aubier pour trois essences de feuillus (chêne (*Quercus rubra* L. and *Q. nigra* L.), peuplier (*Liriodendron tulipifera* L.) et le cerisier (*Prunus serotina* Ehrh.)). Normark (2002) a obtenu une précision de 90% pour la détection du bois clair dans le pin sylvestre.

Malgré les prouesses technologiques qui ont marqué les récentes années, les rayons X pour optimiser le sciage en fonction des nœuds sont peu ou pas utilisés dans un contexte industriel. Cependant, des équipementiers arrivent avec des solutions très prometteuses et on peut penser que le jour où nous verrons ce type d'équipements n'est plus si loin. Il faut comprendre que les scieries de résineux sont des endroits poussiéreux où il y a beaucoup de vibrations et où les vitesses d'entrée des billes sont très rapides. Il faut être en mesure de lire les données provenant des rayons X, extraire l'information nécessaire (nœuds, pourriture, densité, etc.), prendre ensuite une décision sur le patron de coupe et positionner les billes sans ralentir la production, ce qui à l'heure actuelle est difficilement réalisable. On note cependant une amélioration constante des vitesses de la technologie CT-Scan. Par exemple, Guddanti (1998) a scanné des tiges de bois franc de 3,6 mètre de long et d'environ 35 centimètres de diamètre dans le cadre de son étude. À l'époque, il lui fallait environ deux heures pour scanner une des ces billes. De plus, pour scanner toute la bille, il devait la couper en plusieurs sections pour ensuite la reconstruire en juxtaposant les images. Dans le cadre des travaux réalisés, il a été possible de scanner de cinq à six billes de 2,5 mètres de longueur et d'un diamètre moyen d'environ 16 cm par heure dans un contexte de recherche.

L'utilisation du CT-Scanner exige l'acquisition de connaissances et de compétences spécifiques pour être en mesure de bien traiter les images produites. Le CT-Scan fournit une image en noir et blanc avec des tons de gris. Plus les pixels sont foncés, plus la densité du bois est faible (air) et vice-versa. En présence d'une forte humidité, les nœuds sont plus difficiles à discerner. Il faut alors utiliser une méthode complémentaire pour extraire la morphologie des nœuds. Oja (1999) a déterminé qu'il fallait ajouter environ deux mm aux diamètres des nœuds provenant de l'analyse d'image dans le résineux. Il a conclu que la segmentation des nœuds induisait un biais comparativement à la mesure visuelle.

Les scanners à rayons X ont été largement utilisés pour la recherche dans le domaine du bois. La haute qualité des images a permis l'étude et l'analyse des caractéristiques internes du bois ainsi que leurs distributions. Jusqu'à maintenant cette technologie a permis par exemple l'étude de la branchaison, de défauts comme la pourriture, des poches de résines, des nœuds, de la masse volumique du bois, de la répartition de l'eau dans l'arbre, etc (Guddanti *et al.* 1998, Schmoltdt *et al.* 2000, Rojas 2005, Longuetaud 2005). Les scanner doivent évoluer pour être en mesure d'acquérir les données aux vitesses

utilisées par l'industrie tout en gardant une résolution suffisante pour détecter les défauts correctement. On peut s'attendre, dans les prochaines années, que des équipementiers travailleront à fournir des outils permettant de voir les défauts internes des billes pour augmenter l'efficacité des scieries. Déjà, à l'heure actuelle, certaines compagnies arrivent avec des solutions intéressantes dans ce domaine.

CHAPITRE 2 Matériel et méthode

Cette section du document porte sur le matériel et les méthodes utilisés dans le cadre des travaux réalisés.

2.1 Matériel

Les arbres ont été récoltés dans une plantation établie sur une terre agricole abandonnée en 1977 où l'on retrouvait deux essences, le pin gris et l'épinette blanche. La plantation se situait au Nouveau-Brunswick près de la ville de Woodstock. Ce site était intéressant car on pouvait y retrouver 2 essences et divers espacement initiaux sur un même site. En effet, il s'agissait d'une plantation de type Nelder plot se caractérisant par un design circulaire faisant en sorte que la densité de peuplement (espacement initiaux) variait du centre vers l'extérieur). Les arbres près du noyau central poussent sous une forte compétition alors que ceux en périphérie poussent pratiquement sans compétition. Il n'y a pas eu d'interventions sylvicoles réalisées sur ce dispositif.

Le tableau 2.1 présente la variation de l'espacement initial en fonction de la position dans la plantation. Au total, le site comporte 17 espacements initiaux différents, allant de 12 000 tiges à l'hectare au centre à environ 600 tiges à l'hectare en périphérie du cercle. La rangée 17 a été également incluse dans l'échantillonnage. Ces arbres représentent un cas où il n'y aurait eu que très peu de compétition. La plantation est divisée en deux sections, soit l'épinette blanche d'un côté et le pin gris de l'autre. Cette division de l'espace permet d'obtenir des conditions de croissance assez identiques pour les deux essences ce qui est très intéressant pour la recherche. Au total, 96 arbres ont été prélevés sur le site, 46 pins gris et 50 épinettes blanches. Les arbres morts ou avec des défauts majeurs tels que les fourches ont été retirés de l'échantillonnage. Sur la parcelle d'échantillonnage, diverses informations ont été collectées telles que l'orientation géographique des arbres (nord), la dimension de la cime vivante dans l'axe nord-sud et est-ouest, la longueur totale des tiges, la longueur de la cime vivante et le diamètre des 5 plus grosses branches mortes et vivantes et le DHP. Une des particularités du site est qu'il offre un gradient complet d'espacements initiaux variant de 0.9 à 3.5 mètres entre les tiges.

Table 2.1. Espacement des arbres de la plantation
(Source : Ressources naturelles Canada)

# arbre	rayon (m)	espacement (m)	distance entre rangées (m)
0	9		
1	9.87	0.87	0.91
2	10.83	0.96	1.00
3	11.88	1.05	1.10
4	13.03	1.15	1.21
5	14.29	1.26	1.32
6	15.68	1.39	1.45
7	17.20	1.52	1.59
8	18.86	1.66	1.75
9	20.69	1.83	1.92
10	22.70	2.01	2.10
11	24.90	2.20	2.31
12	27.32	2.42	2.53
13	29.96	2.64	2.77
14	32.87	2.91	3.04
15	36.06	3.19	3.34
16	39.56	3.50	3.66
17	43.40	3.84	4.02

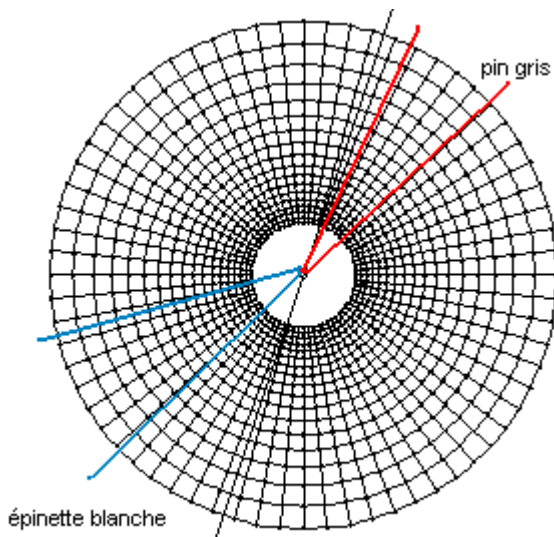


Figure 2.12. Configuration du site d'échantillonnage (Nelder Plot)

Les rangées 3, 4, 5, 8 et quelques arbres des rangées 2, 6 et 7, ont été sélectionnées pour l'échantillonnage du pin gris. Dans le cas de l'épinette blanche, les rangées 42, 43, 44 et 45 ont été sélectionnées pour l'échantillonnage, de même que quelques arbres des rangées 46, 47 et 48. Malheureusement, les rangées étaient rarement complètes, en raison de mortalité survenue au cours des 30 dernières années, surtout dans les espacements près du centre. La densité de peuplement diminue du centre vers l'extérieur du cercle. Cette diminution de la densité de peuplement ne s'effectue pas de façon linéaire, comme il est possible d'observer dans la figure 2.2.

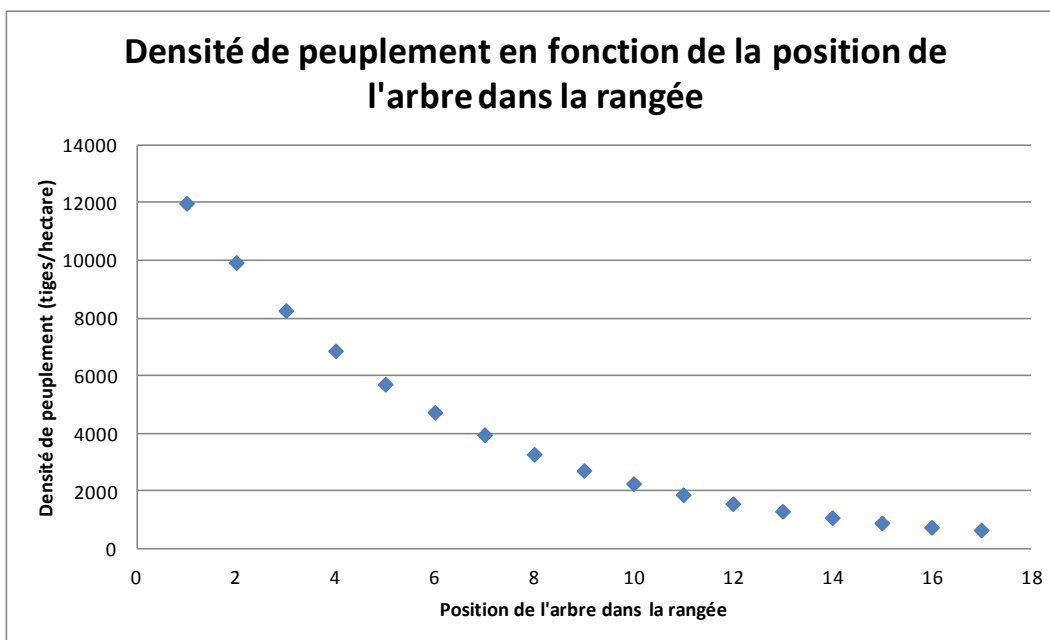


Figure 2.13 Densité de peuplement approximatif en fonction de la position des arbres

La compétition étant trop forte au centre de la plantation, peu d'arbres ont survécu à ce stress. Il est à noter que les rangées prélevées étaient consécutives, afin de minimiser la perturbation du site. La figure 2.3 présente une vue aérienne du site d'échantillonnage.



Figure 2.14. Site vu du ciel (source : Google maps)

Comme le montre la figure 2.4, la forte compétition dans les premières rangées a probablement causé la mortalité de plusieurs arbres. Il est également possible d'observer que ceux-ci sont de faible diamètre.



Figure 2.15. Photo du site avant coupe (épinette blanche)

La figure 2.5, présente les rangées 4 à 9 qui ont été sélectionnées pour le pin gris.



Figure 2.16. Photo au centre du site avant coupe (pin gris)

La figure 2.6 présente un pin gris situé en périphérie du cercle dans une zone de faible densité de peuplement (rangée 17). Nous pouvons observer que le grand espacement a favorisé à la fois le développement d'une bonne quantité de grosses branches, ainsi qu'un diamètre plus grand.



Figure 2.17. Photo d'un pin gris (périphérie du cercle)

La figure 2.7 présente les rangées d'épinette blanche après la coupe.



Figure 2.18. Photo du site pendant la coupe, épinette blanche (Source : Edwin Swift)

2.2 Méthode

Pour la sélection des rangées, nous avons tenté de sélectionner celles présentant le moins de mortalité. Sur chacun des arbres de la parcelle d'échantillonnage, les informations suivantes ont été mesurées : l'orientation géographique des arbres (nord), la dimension de la cime vivante et le DHP. Une fois cette étape réalisée, la récolte a pu être effectuée. Les tiges ont

été marquées avec de la peinture de couleur et ensuite identifiées à l'aide d'étiquettes de plastique apposées sur la découpe. La figure 2.8 présente l'opération de numérotation des tiges après l'abattage des arbres.



Figure 2.19. Numérotation des tiges

Les données suivantes ont été mesurées sur les arbres abattus : la longueur totale des cimes, celle des cimes vivantes, l'angle et le diamètre des cinq plus grosses branches mortes et des cinq plus grosses branches vivantes. Une fois la saisie des données complétée, les tiges ont été ébranchées et amenées en bordure de la route pour le transport.



Figure 2.20. Prise de données sur les tiges

Les tiges écimés à un diamètre d'environ 7 cm pour être ensuite transportées en décembre 2009 jusqu'au site de la station de Duchesnay afin d'en numériser la forme externe (Scanneur portable Comact Equipment Inc., voir figure 2.10).



Figure 2.21. Scan tridimensionnel de la forme externe des tiges

2.2.1 Méthode de calcul de la courbure (article 1)

Le scanner Comact permet d'obtenir des disques de coordonnées X et Y à tous les 5 cm, et ce, sur toute la longueur de l'arbre (coordonnée Z). Pour chaque section de disque mesuré par le scanneur, un diamètre lui est associé (diamètre de la section de l'arbre). Par la suite, Optitek, un logiciel de simulation de sciage, permet la visualisation de ces tiges et l'obtention de mesures de diamètres, du défilement, de la courbure et du volume total de la tige. La courbure fournie par Optitek correspond à la flèche maximale d'une ligne droite passant par deux sections de la tige. Optitek effectue également la mesure du défilement à l'aide du diamètre fin bout et gros bout de la tige.

Plusieurs essais ont été réalisés, afin de mieux exprimer mathématiquement la courbure des tiges. Cependant, l'approche que nous avons préconisée, fait référence aux coordonnées X, Y et Z. Le scanneur peut fournir des coordonnées centrales X et Y pour chacun des disques sur toute la longueur des tiges et ce, à tous les 5 cm. Pour exprimer la courbure de manière plus précise, il faut être en mesure de percevoir l'impact des multiples déviations sur toute la tige et non seulement sur une seule section. En disposant de coordonnées en X, Y et Z à tous les 5 cm par exemple, il est possible de calculer la longueur des vecteurs entre ces coordonnées. Plus les coordonnées sont rapprochées, plus la précision est grande. En bref, la méthode proposée permet d'obtenir la longueur totale de la tige suivant les multiples déviations qu'elle contient. Plus la courbure de l'arbre est prononcée, plus la somme des vecteurs sera élevée. Il a donc été possible de comparer la longueur réelle des tiges en ligne droite (axe Z) versus celles passant par le centre de tous les coordonnées X et Y, sachant que le parcours d'une ligne droite est toujours plus court que celui d'une ligne présentant des courbes.

La figure 2.11 présente un exemple de coordonnées centrales des différents disques en X, Y et Z d'une tige d'épinette blanche. Pour faire ressortir l'effet de courbure, la somme des vecteurs des coordonnées X, Y et Z, a été effectuée. Par la

suite, cette mesure a été comparée à la longueur complètement droite sur l'axe des Z. Comme il n'y a pas de tiges parfaitement droites, la valeur de la somme des vecteurs sera toujours plus élevée que la distance complètement droite prise sur l'axe des Z. Voici l'équation ayant servi au calcul de la courbure.

$$\text{FacteurMethodeVecteur} = \frac{(\text{SommeDesVecteurs} - \text{LongueurRéelle})}{\text{LongueurRéelle}} \times 100 \quad (2)$$

L'équation nous donne un pourcentage de longueur supplémentaire dû aux déformations plus ou moins nombreuses des tiges scannées. Pour éviter un biais, la valeur est toujours reportée sur la longueur réelle en ligne droite.

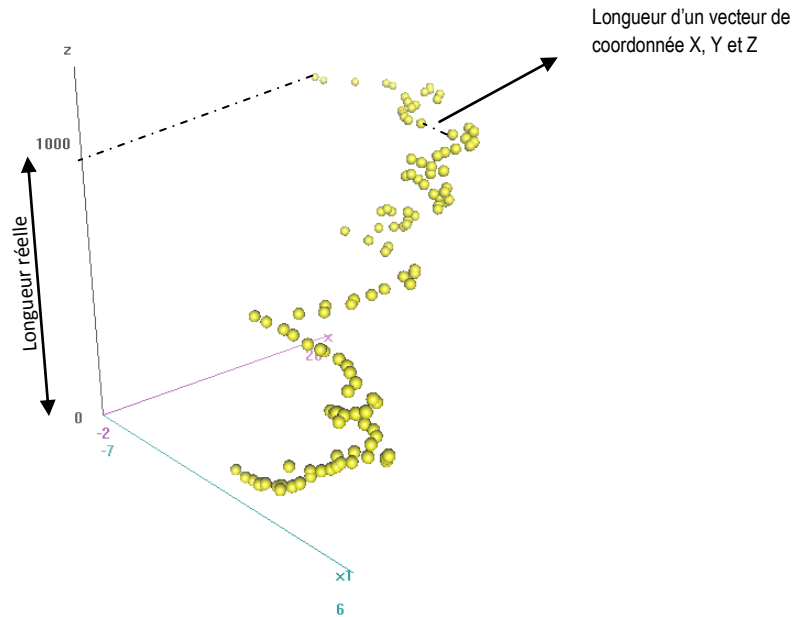


Figure 2.22. Exemple de coordonnées en X, Y et Z d'une épinette blanche

2.2.2 Calcul du facteur de correction du volume (article 3)

Le logiciel Optitek a été utilisé pour calculer un facteur de correction du volume des tiges. La méthode est relativement simple puisqu'il s'agit de comparer les résultats des simulations du sciage d'une tige réelle numérisée (figure 2.12A), à celle d'une tige virtuelle de même diamètre mais complètement droite (figure 2.12B).

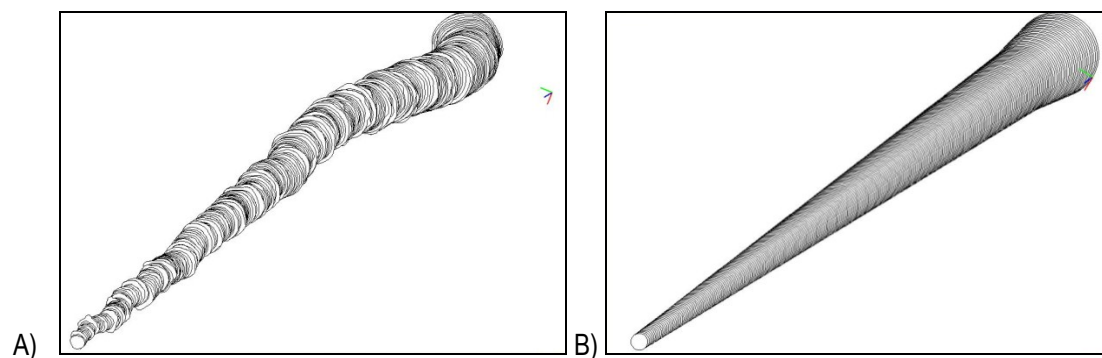


Figure 2.23. Tige récoltée sur le site versus une tige virtuelle comparable.

Pour atteindre l'objectif fixé, nous avons donc procédé avec une tige de référence virtuelle et complètement droite que nous avons comparée à une tige réelle scannée avec ses déformations naturelles. Pour les tiges virtuelles, nous avons utilisé le diamètre gros bout, le DHP (à 1,3 m), le diamètre à 5,48 m de hauteur ainsi que le diamètre fin bout pour reconstituer des tiges semblables, complètement droites et sans défauts. Cette méthode a été utilisée pour les deux essences traitées afin de pouvoir comparer les résultats.

Les données récoltées à l'aide du scan de forme ainsi que celles des tiges virtuelles ont été ensuite utilisées comme intrant pour le logiciel de simulation Optitek. Dans ce projet de recherche, nous avons choisi de modéliser une scierie généralement retrouvée fréquemment dans l'est du Canada. Il s'agit d'une scierie muni d'une ligne pour le gros bois ainsi qu'une autre pour le petit capable de scier des planches des formats 1X3" à 2X10" pour différentes longueurs, allant de 6 à 16 pieds. Un équipement de sciage courbe a été utilisé pour maximiser la valeur des sciages produits.

2.2.3 Méthode pour l'extraction des nœuds

Pour la dernière étape des travaux, les tiges ont été tronçonnées en billots de 2,5 mètres pour scanner leurs défauts internes à l'aide du CT-Scan de L'INRS à Québec. Lors de la coupe des tiges en billots, une rondelle de 3 cm a été prélevée pour fin d'analyse des propriétés physiques du bois dans un autre projet du réseau Forêt-Valeur. Les analyses aux rayons X ont été effectuées tous les 2 mm le long des billes à l'aide d'un Scanner SOMATOM Sensation de Siemens (figure 2.13). Ceci a permis d'obtenir des informations sur l'emplacement et la dimension des nœuds internes, de la moelle et de la forme externe de la bille. Pour procéder à l'analyse aux rayons X, il a été nécessaire de couper les tiges en longueur de 2,5 mètres. Elles ont pu, par la suite, être rejointes pour reformer une tige complète à l'aide d'un logiciel (CT2Opti) qui sera expliqué en détail

dans la prochaine section. Il est possible de sélectionner 2 points sur la dernière et la première image CT d'une bille coupé pour effectuer cette tâche. Comme seulement 3 cm séparent deux billes, les images étaient assez similaires. Il a alors été facile de sélectionner deux points tels que la moelle, ou encore un nœud, sur chaque image pour que le logiciel puisse reconnecter les billes en tiges dans le bon alignement.



Figure 2.24. Scan des caractéristiques externes et internes des billes à l'aide du CT-Scan à rayons X

La figure 2.14 présente une image de pin gris provenant d'un CT-Scan. Il est possible de percevoir les quatre nœuds au centre, ainsi que les cernes annuels très espacés au centre. Ce qui apparaît passablement en blanc sur l'image correspond à une masse volumique plus élevée, alors que l'aspect noir correspond plutôt à une faible masse volumique. Le pourtour de la bille qui correspond à l'ubier est passablement blanc car il est gorgé d'eau comparativement au cœur qui est plus sec. Lorsqu'il est temps d'extraire les nœuds dans cette section, ceux-ci se confondent avec le bois gorgé d'eau, ce qui pose un défi majeur pour la détection automatique des nœuds. C'est d'ailleurs un des problèmes souvent relaté dans l'utilisation du CT-Scan pour l'obtention d'images dans le bois ayant une forte humidité.

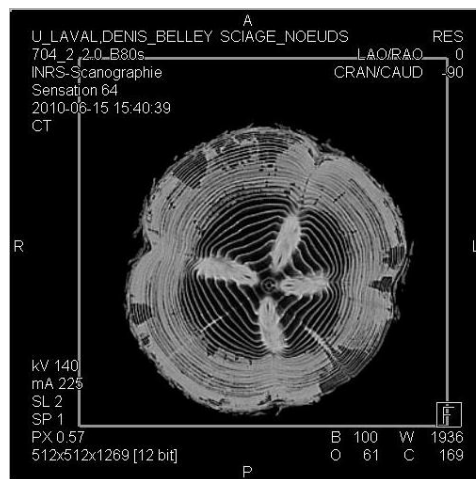


Figure 2.25. Image d'une coupe transversale de pin gris provenant d'un CT-scan

Dans la figure 2.15, il est possible d'observer une coupe longitudinale d'une bille de pin gris. Il s'agit de la même bille présentée à la figure 2.15. Nous y observons les nœuds et les cernes annuels, mais également la zone de haute humidité en surface (aubier).

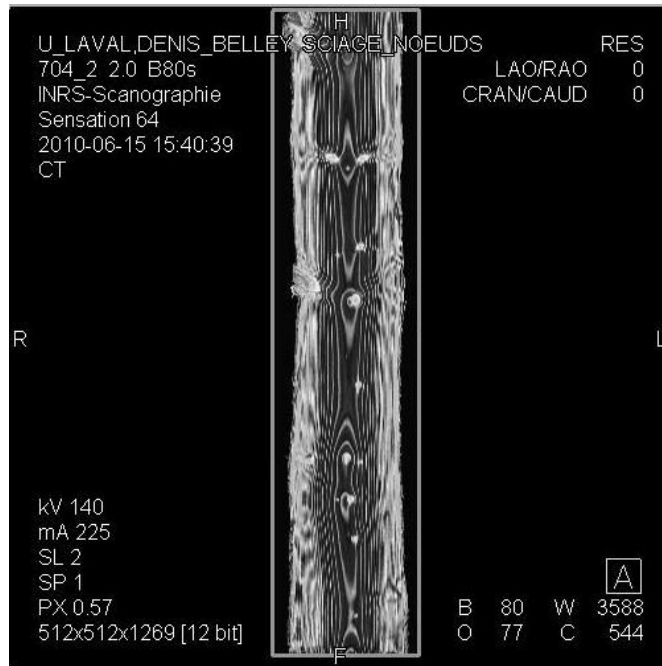


Figure 2.26. Image d'une coupe longitudinale de pin gris provenant d'un CT-scan

Dans les images suivantes nous présentons des images provenant de l'échantillonnage d'épinettes blanches. La figure 2.16 A) est la tige à l'extrémité (faible espacement initial) et la figure 2.16 B) présente la tige à l'intérieur du cercle ayant une forte densité de peuplement. Nous y voyons clairement l'influence de la densité de peuplement sur les cernes annuels. En effet, la tige ayant poussé dans un climat de forte compétition présente des cernes annuels relativement larges pour les 15 premières années de sa vie. Puis, lorsque la compétition s'accroît, la largeur des cernes annuels diminue grandement. Pour les tiges ayant bénéficié d'un espacement initial plus grand, nous constatons que les cernes y sont plus homogènes et dépourvus de cassure à quinze ans. De plus, tous les cernes annuels demeurent relativement de largeur constante. Il est à noter que ces images ont été prélevées à la base des billes où il y a eu un certain séchage.

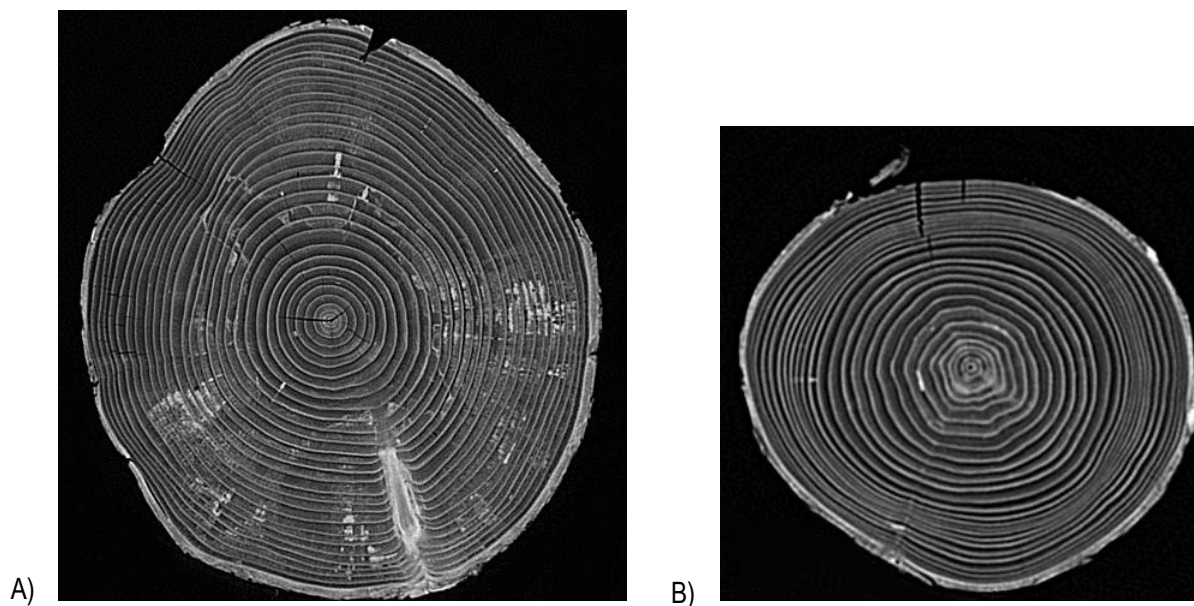


Figure 2.27. Image d'une coupe transversale de deux billes d'épinette blanche (espacement initial élevé A) DHP=21.2cm, espacement initial faible B) DHP=12.0cm)

Une fois numérisée, chaque bille de 2,5 m de longueur produit une série consécutive d'environ 2000 images CT. Un chevauchement d'image de 1 mm est présent et nécessaire, afin de maximiser la détection des nœuds. Les images CT ne pouvaient être utilisées directement avec le logiciel Optitek. Il était donc nécessaire de créer une solution logicielle, "CT2Opti", pour détecter et extraire les formes des tiges, les moelles et les nœuds à partir des images CT afin de rendre l'information compatible avec Optitek. Par la suite, il est possible de reconstruire les tiges avec ces informations (voir la figure 2.17). CT2Opti est un logiciel de traitement d'image développé pour extraire les nœuds d'une séquence d'images CT (Vallerand *et al.* 2011). Il utilise une combinaison de bases morphologiques, de seuils et de fonctions de détection, ainsi que certaines fonctions de mesure de traitement d'image développées pour un comportement spécifique. Le logiciel réalise cet objectif en trois étapes.

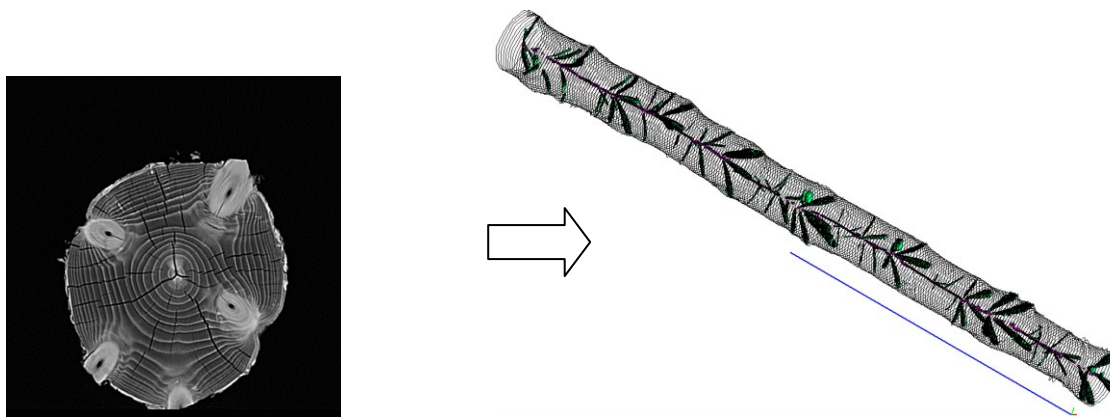


Figure 2.28. Exemple d'extraction des nœuds provenant d'images CT pour créer une tige en format Optitek (réalisé avec CT2Opti, Vallerand *et al.* 2011).

Tout d'abord, les nœuds identifiés comme candidats potentiels d'une section de nœuds spécifique sont extraits de chaque image de la séquence. À cette étape, une partie importante de ces candidats ne sont pas conservés car ils ne font pas partie de sections de nœuds réels. Ces faux candidats sont, pour la plupart, des poches d'humidité qui sont assez similaires à des nœuds en termes de valeur de densité. CT2Opti a été en mesure de détecter environ 98% des sections de nœuds réels (98,8% pour l'épinette blanche, 97,8% pour le pin gris).

Dans une deuxième étape, CT2Opti regroupe les objets 3D détectés en connectant des sections adjacentes présentant des caractéristiques similaires. Les objets 3D sont des nœuds potentiels, mais un nombre important de ces objets ne sont pas de véritables nœuds. Enfin, pour faire face à tous ces objets indésirables identifiés comme des nœuds potentiels, CT2Opti a besoin d'un ensemble de règles de filtration. Tout d'abord, les objets trop petits ou trop gros pour être considéré comme un nœud sont éliminés. Ensuite, d'autres fonctions sont utilisées sur les objets restants. Un modèle relativement simple est utilisé. Un nœud est un objet qui apparaît d'abord au voisinage de la moelle, pour ensuite se déplacer radialement jusqu'à ce qu'il atteigne l'extérieur de la bille. Afin de comparer avec notre modèle simple, la forme extérieure et la position du point de moelle doivent être extraits de la séquence d'images. Ceci est facilement réalisable par une combinaison de fonctions de traitement d'image.

En appliquant cet ensemble de règles, plus de 80% des nœuds sont détectés et exportés dans les tiges prêtes à être utilisées dans le logiciel Optitek (88,2% pour l'épinette blanche, 82,1 pour le pin gris). Il est primordial, qu'aucun objet indésirable ne soit exporté dans les tiges. En outre, nos validations démontrent que les nœuds manquants sont principalement de petits nœuds qui ont une influence soit nulle ou très faible sur le grade des pièces de bois résultants des simulations de sciage. Dans l'ensemble, nous sommes confiants que les tiges produites pour Optitek représentent correctement les tiges récoltées.

2.2.4 Simulation de sciage avec les nœuds dans Optitek (article 4)

Avec Optitek il est possible d'effectuer des simulations avec ou sans nœuds et de configurer chaque type de scierie souhaitée. Pour la simulation de sciage avec des nœuds, chaque équipement considère la position des nœuds pour l'optimisation. Que se soit au tronçonnage, au tout début du procédé de transformation, ou à toute autre étape de la production en usine, toutes sont capables d'extraire la valeur maximum de chacune des tiges. Cependant, plus on augmente les critères d'optimisation, plus le temps de réalisation des simulations est long.

Dans cette étude le positionnement des tiges pour la première simulation sans nœuds était "sweep up", ce qui signifie que la déviation maximale de la bille a été placée dans l'axe vertical pour en maximiser le volume (pratique courante de l'industrie du sciage résineux). Comme l'information sur les défauts internes est inconnue, ce positionnement était utilisé pour extraire le maximum de volume de sciages de chaque tige. Il est important de signaler que les arbres de l'échantillonnage avaient de

grosses déviations et ceci était particulièrement vrai pour le pin gris. Si une même tige comprend plusieurs grandes déviations, il est probable que le positionnement de la déflexion maximale ne soit pas la meilleure façon d'extraire le maximum de volume en produits. La combinaison de plusieurs déformations sur une tige et de son positionnement peut affecter l'extraction du volume maximal lors du sciage.

Le positionnement des tiges en fonction des nœuds consistait en une rotation des billes sur 360 degrés à tous les 12 ou 24 degrés. Après avoir terminé toutes les rotations nécessaires, le logiciel Optitek conserve la solution optimale générant le plus de valeur. Il est possible que la position optimale pour l'optimisation de la valeur avec les nœuds ne donne pas nécessairement le plus grand volume de bois d'œuvre. Des rotations aux 12 degrés ont été testées afin de vérifier si plus de possibilités de rotation donneraient de meilleurs résultats. Une simulation au sciage intermédiaire a également été réalisée. Cette simulation n'a considéré que la forme de la tige pour optimiser la position du tourne billes. Précisément, les billes ont été tournées tous les 12 ou 24 degrés sans l'information des nœuds afin de prendre la position avec la valeur la plus élevée. Avec cette simulation, Optitek a tenté de réduire autant que possible la flache dans les pièces de bois. Pour cette raison, il est possible que le volume ait été réduit étant donné qu'une pièce carrée, sans défaut de forme, aurait plus de valeur qu'une pièce plus longue mais avec beaucoup de flache. Après cette étape, les nœuds ont été remis dans les pièces de bois pour obtenir la valeur réelle par rapport au classement visuel. Il est à noter que les prix utilisés dans Optitek proviennent de la moyenne annuelle de 2011 de Pribec. Pour le classement des pièces, Optitek utilise les règles NLGA 2010 et quand il est mentionné grade 2 et meilleur, cela comprend les grades Structure choisie, No.1 et No.2.

CHAPITRE 3 Assessment of white spruce and jack pine stem curvature from a Nelder spacing experiment

3.1 Résumé

Cet article présente une méthode de calcul de courbure des arbres avec de multiples déviations. Règle générale, la courbure de l'arbre est évaluée selon la méthode de la déflexion maximale. Elle consiste à mesurer le point le plus éloigné d'une ligne droite tirée entre le grand et le petit bout d'une tige. Elle fonctionne assez bien pour une seule courbe mais donne de moins bons résultats avec des tiges ayant plusieurs déviations. Les tiges qui ont été récoltées pour réaliser les travaux associés au développement de cette méthode, proviennent d'une plantation âgée de 32 ans près de la ville de Woodstock au Nouveau-Brunswick. Deux essences ont été récoltées, soit l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) pour un total de 96 arbres. Le design particulier de cette plantation faisait en sorte que l'espacement initial variait de 640 à environ 12 000 tiges/hectare.

L'analyse des résultats a révélé que l'espacement initial avait un impact sur la courbure des arbres. En effet, plus l'espacement est élevé, plus la courbure est grande. Cependant, cette influence varie selon l'essence et diffère selon la méthode utilisée pour le calcul de la courbure. La méthode de calcul utilisant les vecteurs montre que la courbure des tiges de pin gris est plus prononcée et plus présente à de faibles densités de peuplement comparativement à l'épinette blanche.

3.2 Abstract

This study presents a method for calculating stem curvature for trees with multiple deviations. Generally, tree curvature is assessed using the maximum deflection method. It consists to measure the farthest point from a straight line drawn between the large and small ends of a stem. It works fairly well for a single curve but gives poorer results for stems with several deviations. The stems used for developing this method were harvested from a 32-yr-old Nelder spacing experiment established near Woodstock, New Brunswick, Canada. A total of 96 trees were selected for this study from the white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) that were planted on the same Nelder plot. This particular plantation design offered a gradient of initial spacing ranging from 640 to 12 000 stems/ha.

Results analysis revealed that initial spacing had an impact on tree curvature. Stem curvature increased with higher initial spacing. However, this influence varied between species and differed according to the method used to calculate curvature. The vector length calculation method showed that stem curvature in jack pine was more pronounced and more often encountered at lower densities than in white spruce.

3.3 Introduction

Curvature is an important element in assessing stem or log quality. This variable can significantly affect the wood amount or quality extracted from a tree. Tree curvature is a measurement that can be used to qualify a tree because it generally tends to lower the amount and quality of sawn timber. The sawmill industry has developed standards to assess the value of a log according to its curvature. These methods can be found in several forest guides (Fig 3.1) (Rast et al 1973; Petro and Calvert 1976).

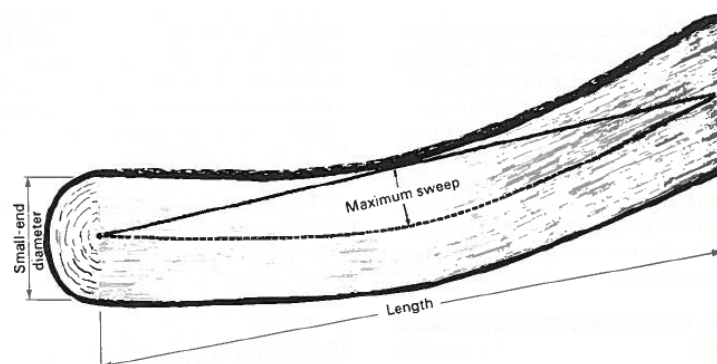


Figure 3.29. General method of determining maximum sweep (from Petro and Calvert 1976)

For the same diameter, a crooked stem gives less lumber than a completely straight one. However, stem curvature may have other impacts on wood quality. Indeed, significant correlations were found between stem deformation and percentage of compression wood (Krause and Plourde 2008). Ivkovic et al (2007) estimated that a 10% improvement in radiata pine

stem straightness decreased sawlog degradation caused by sweep by 17.1% and increased green timber recovery by about 0.5%. Decreasing the presence of tree deviations by adequate thinning should therefore be a priority for any forest manager, silviculturist, forester, or wood scientist. Sinuosity is defined as stem crookedness that occurs entirely within an internode or interwhorl (Campbell 1965). There are no studies relating sinuous growth to amount and location of slope of grain or pith defect deviations, both of which could strongly impact strength properties (Spicer et al 2000). Although our visual observations of the Nelder plot trees suggest a more sinuous stem growth in jack pine than in white spruce, the aim of this study was not to understand the fundamental behavior of sinuous stem growth between internodes but to develop a method to rapidly and more accurately calculate tree sweep based on true shape scanner data.

Many studies indicate that stem shape is also influenced by site quality, stand density (Gray 1956; Larson 1963; Ballard and Long 1988; Birk 1991; Sharma and Zhang 2004), and initial spacing (Tong and Zhang 2005). Curvature is an important component of tree shape, but taper is also a major factor. Sharma and Zhang (2004) found that taper significantly differed for jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.), black spruce (*Picea mariana* [Mill.] BSP), and balsam fir (*Abies balsamea* [L.] Mill.) growing in a natural forest. Hence, stem shape varied among species even when the trees grew and developed in similar conditions.

Measuring tree external form using a true shape scanner usually involves drawing a virtual line through the center of the large and small end sections of the stem. Measurement of maximum deflection with the farthest point to this straight line is then easily obtained (Fig 3.2a). This value is usually divided by the length of the stem and provides an average curvature across a given length usually expressed in cm/m. When it is not possible to use a true shape scanner, the maximum deflection measurement can be obtained manually with a string using the same principle. Sweep is an important characteristic in assessing tree quality, but it might be possible to measure it with greater precision.

The maximum deflection method is presumably adequate when stems have a single curve as shown in Fig 3.2a. In a stem bent in several places as in Fig 3.2b, the approach may not be adequate. It is therefore important to quantify all deviations to improve method precision, understand its impact on product recovery, and compare and model this distinctive feature to compare different forest tree assortments.

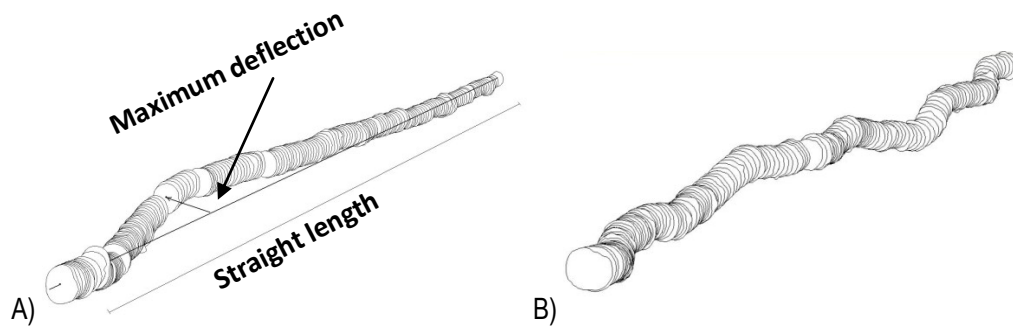


Figure 3.30. A) Curvature measurement with the true shape scanner, B) True shape scan of a jack pine stem with multiple deviations

The objectives of the study were to,

- 1) investigate the influence of initial spacing on tree curvature,
- 2) develop a new method for measuring stem sinuosity taking into account all deviations, and
- 3) examine the influence of the cardinal points on tree shape.

3.4 Materials and methods

3.4.1 Selection and Geometry Scanning of Sample Trees

The stems used in this study were harvested from a Nelder spacing experiment, Type 1a design, (Nelder 1962) of jack pine and white spruce that was established in 1977 near Woodstock, New Brunswick (46.16°N, 67.58°W). The study site offered various initial spacings that suited the objectives of this study. No silvicultural treatments were performed on this site. Table 3.1 shows the change in stand density as a function of position in the plantation. The plot had 68 radial spokes and 17 circles, representing 17 different initial spacings ranging from about 12,000 stems/ha in the center of the Nelder plot to about 600 stems/ha in the circle periphery (Fig 3.3). Distance between trees increased from the center to the periphery of the plot. Thus, trees grown near the center had strong competition, whereas those on the periphery grew almost without competition. The circle was divided into two species, white spruce on one side and jack pine on the other, which is a rare experiment in the literature. This experimental design provided similar growth and site conditions for both species. A total of 96 trees were collected from the study site: 46 jack pine and 50 white spruce. Dead trees or trees with defects such as forks were removed from the sample. Outer guard trees in row 17 were also included in the sample for analysis in this study, which reflected open growth conditions.

Table 3.2. Layout of tree spacing in the Nelder Spacing Experiment used in this study (Source: Project notes on file at Natural Resources Canada, Atlantic Forestry Centre, Fredericton, NB)

Row #	Radius (m)	Spacing (m)	Distance between rows (m)
0	9		guard tree
1	9.87	0.87	0.91
2	10.83	0.96	1.00
3	11.88	1.05	1.10
4	13.03	1.15	1.21
5	14.29	1.26	1.32
6	15.68	1.39	1.45
7	17.20	1.52	1.59
8	18.86	1.66	1.75
9	20.69	1.83	1.92
10	22.70	2.01	2.10
11	24.90	2.20	2.31
12	27.32	2.42	2.53
13	29.96	2.64	2.77
14	32.87	2.91	3.04
15	36.06	3.19	3.34
16	39.56	3.50	3.66
17	43.40	3.84	4.02

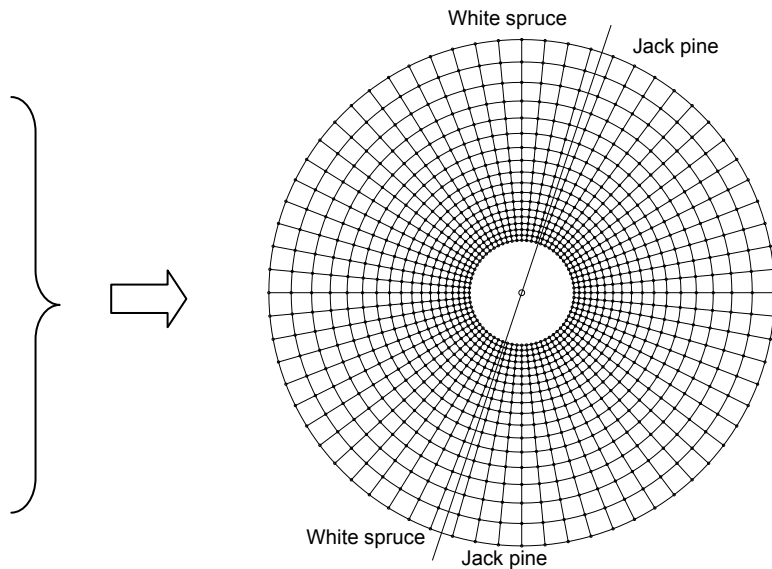


Figure 3.31. Experimental design of the initial spacing at the Nelder plot used in this study

After cutting and limbing the trees and topping them at 7-cm diameter, each stem was scanned using FPIinnovations' (Pointe-Claire, QC, Canada) Comact true shape scanner to obtain its form in 3D. The stems were placed horizontally on a series of brackets, and then the scanner moved along the stem extracting the external shape with laser technology at 5-cm intervals. This produced a series of cross sections along the length of the stem. Each cross section was defined by a diameter and a geometric center in the 3D Cartesian coordinate system, with X and Y coordinates indicating the position on the X-Y plane and the Z coordinate indicating the distance to the large end of the stem. Subsequently, Optitek, a sawing simulation software developed by FPIinnovations, made it possible to visualize the stems and provides data such as the large end diameter, small end diameter, taper, curvature, and volume of the stem. The sweep provided by Optitek was the maximum perpendicular deflection from a straight line drawn between the large and small ends of the stem. Taper was calculated as the difference between the large and small end diameters across the full length of the stem and was expressed in cm/m.

3.4.2 Assessment of Stem Curvature

To accurately express curvature, it is necessary to consider multiple deviations instead of only the maximum deviation across the whole stem length. Multiple tests were conducted to better express stem curvature. The approach proposed here refers to X, Y, and Z coordinates. The true shape scanner provided X and Y center coordinates for each disk every 50 mm along the stem length. To accurately express curvature, one must consider the impact of multiple deviations across the entire stem, not just one section. By having coordinates X, Y, and Z every 50 mm, it is possible to calculate the length of the

vectors \vec{V} (L) from the center of one cross section to another (Fig. 3.4). The smaller the Z coordinate is, the more accurate the estimate of curvature will be. Therefore, total length of all vectors in the stem should reflect overall deviation of the stem. The more pronounced tree curvature is, the higher the sum of the vectors will be, and the smaller the scanning intervals are, the more accurately the sum of the vectors will represent the true sweep of the stem. By comparing straight length with the total length of all vectors (the sum of all vectors), it was possible to estimate stem curvature (Eq 1). To avoid bias, the sweep was expressed as the difference between total length of all vectors and stem length, across the stem length:

$$L = \sum_{i=1}^n \left\| \vec{V}_i \right\| = \sum_{i=1}^n \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2 + (Z_i - Z_{i-1})^2} \quad (1)$$

where \vec{V}_i is the i^{th} vector from the i^{th} point to the $(i+1)^{th}$ point, x_i, y_i, z_i are the three-dimensional coordinates of the center point of the i^{th} cross-section, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ and n is the total number of cross sections in the stem.

Subsequently, the measurement was compared with the full straight length on the Z axis. Because there are no perfectly straight stems, the sum of the vectors will always be higher than the completely straight distance taken on the Z axis. The equation used to calculate curvature is,

$$CurvatureVectorMethod = \frac{(L - StraightLength)}{StraightLength} \times 100 \quad (2)$$

where L is the total length of all vectors, calculated using Eq 1.

Equation 2 gives a percentage of extra length caused by the curvature present in the stems. This allows for direct comparison of total curvature between stems. Equation 2 gives a percentage of extra length due to the curvature present in the stems. This allows for the direct comparison of total curvature between stems on the same basis.

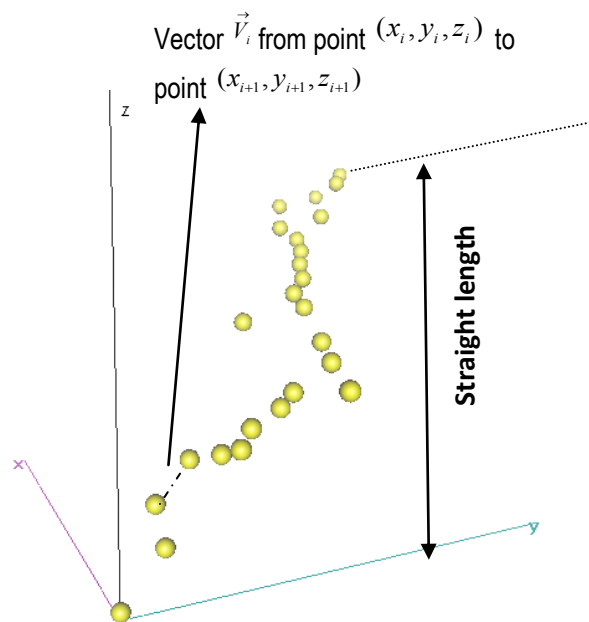


Figure 3.32. Example of coordinates X, Y and Z of a log section

The straight vector between two sets of coordinate sections will always be equal to or shorter than the real length of the segment. The greater the distance between the Z coordinates, the larger the underestimation of the curvature will be. Thus, the distance between the Z coordinates should be adjusted to the precision needed.

3.4.3 Statistical Analysis

SAS system (SAS Institute, Inc., Cary, NC) was used for statistical analysis. Regression analysis was performed (PROC MIXED of SAS system) with stem sweep as the dependent variable and stand density and species as the indicator variables. Data transformations were necessary to ensure that the assumption of homogeneity of variance and normality were met. Variables were natural logarithm transformed before analysis.

3.5 Results

Tree diameter at breast height (DBH) for white spruce ranged from 9.9-27.0 cm, whereas that for jack pine ranged from 11.5-33.8 cm (Table 3.2). The total length of the white spruce trees ranged from 7.5-17.5 m, whereas that for jack pine ranged from 10.6-19.5 m.

3.5.1 Stem curvature

Table 3.33. Stems summary data for jack pine (JP) and white spruce (WS)

Species	# stem		Curvature	Taper	DBH	Total	Live crown	Live crown	Stem
			max. deflection	(cm/m)	(cm)	length	length	dimension	volume
			(cm/m)	(cm/m)	(cm)	(m)	(m)	(m)	(dm ³)
JP	46	AVG.	0.894	1.071	18.5	17.1	6.3	3.4	238.7
		Max.	3.650	2.871	33.8	19.5	10.5	9.0	597.6
		Min.	0.402	0.627	11.5	10.6	1.6	0.7	70.1
		STD	0.532	0.407	4.9	1.9	2.1	1.8	115.0
WS	50	AVG.	0.666	1.497	18.0	12.7	5.5	3.7	175.4
		Max.	1.736	2.232	27.0	17.5	12.5	6.7	408.0
		Min.	0.226	0.581	9.9	7.5	1.6	1.2	38.7
		STD	0.295	0.413	4.8	1.8	2.2	1.4	97.9

First, results revealed that initial spacing affected several variables such as DBH, taper, live crown length, width of live crown, and volume and diameter of live knots. Stem curvature (maximum deflection) and taper were highly correlated with stand density and species at the 95% confidence level. Tree taper decreased with an increase in stand density (Fig 3.5), which is consistent with the theory (Larson 1963, Muhairwe 1994, Jozsa and Middleton 1997). The principal change in stem form from the open-grown to the stand-grown condition was the decrease in taper associated with the decrease in live crown length caused by branch mortality. A smaller live crown decreases radial growth in the lower part of the tree (compared with radial growth in the live crown), which decreases the overall taper of the stem (Larson 1963, Panshin and Zeeuw 1980; Jozsa and Middleton 1997). The fluctuation of height growth of trees in stands of dissimilar density has been ascribed to a number of causal factors; among these are wind and light in addition to the well-known effects of soil moisture (Larson 1963). On average, white spruce taper was significantly larger than jack pine taper (Table 3.3).

Table 3.34. Statistical results using an indicator variable for taper

	Source	F value	Pr>F
Taper	species	101.89	<.0001
	log_density	228.24	<.0001
	log_density*species	0.72	0.3984

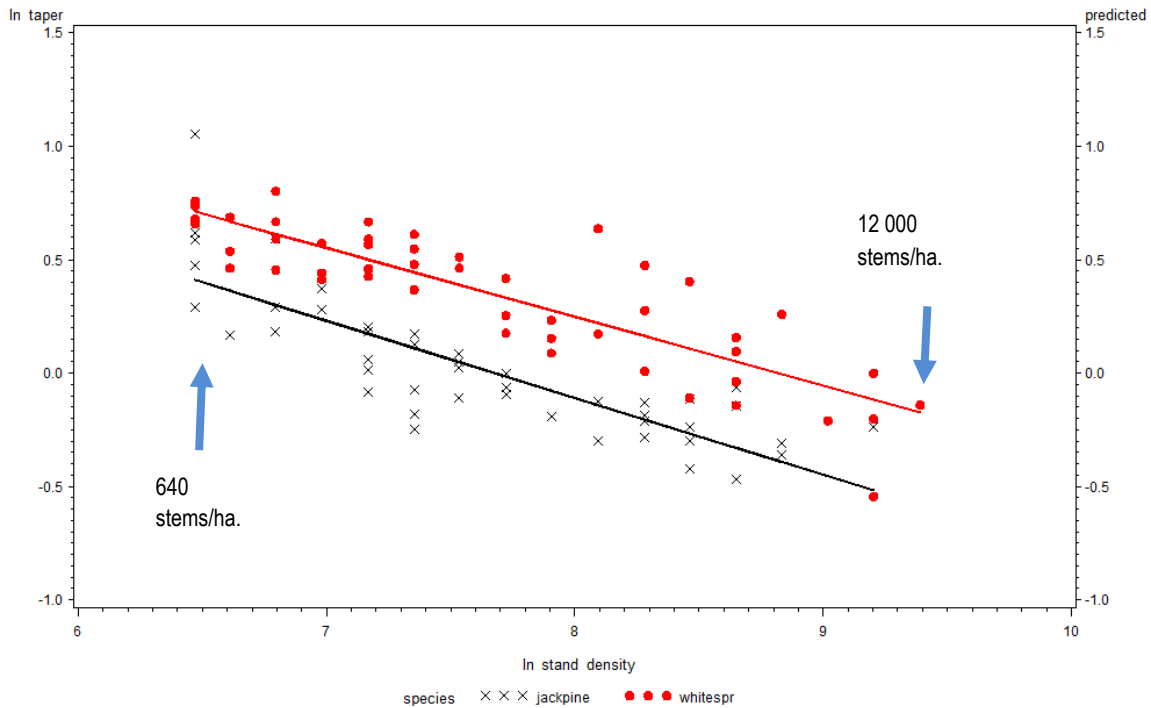


Figure 3.35. Natural logarithm of taper as a function of natural logarithm of stand density for jack pine (black x) and white spruce (red dots).

With the method of maximum deflection for curvature evaluation, there was a statistically significant difference between species. Indeed, jack pine curvature was significantly higher than white spruce curvature at 99.9% (Table 3.4). As shown in Fig 3.6 for both species, the curvature (maximum deflection) decreased with increasing stand density. With respect to the slope of the relationship between the logarithms of curvature and the logarithm of stand density, Fig 3.6 shows that the slope for jack pine is almost the same as that for white spruce.

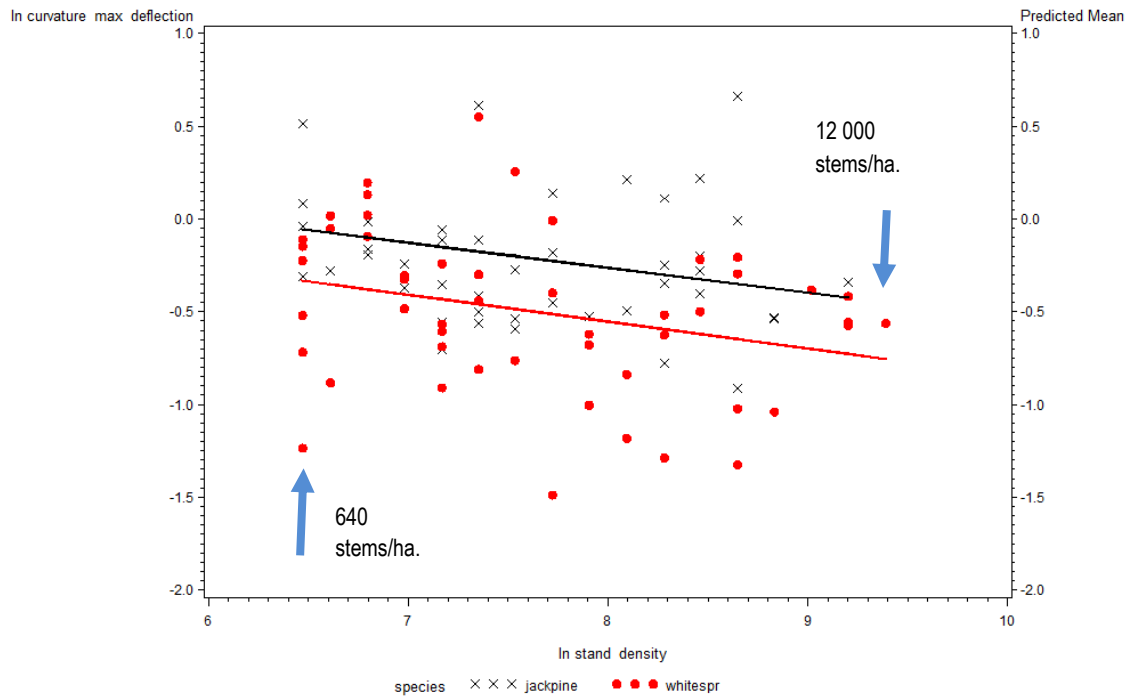


Figure 3.3. Natural logarithm of curvature as a function of natural logarithm of stand density (maximum deflection method) for jack pine (black x) and white spruce (red dots).

However, when the curvature calculation was evaluated with the length of the vector, we obtained an interaction between stand density and species, indicating that the slope of the curves between the two species significantly differed (Table 3.4). The results suggest that the method of calculating curvature commonly used may not be appropriate in all situations. When characterizing the curves, it is important to consider the smallest deviations because no matter how small they are, they may have an impact on the quality of the wood or lumber produced.

Table 3.4. Regression with indicator variable (comparison of curvature calculation method)

	Source	F value	Pr>F
Curvature	species	11.59	0.0010
Max deflection	log_density	7.00	0.0096
	log_density*species	0.01	0.9159
Curvature	species	55.35	<.0001
vector method	log_density	27.69	<.0001
	log_density*species	4.71	0.0325

In addition to this interaction between species and stand density, it was possible to detect a breaking point for jack pine, which suggests that the relationship between curvature and stand density is not linear. Indeed, performing the Bacon and Watts (1971) test, the piecewise model, showed that stem curvature of jack pine changed significantly below 1600 stems/ha. For a stand density lower than 1600, curvature increased considerably for jack pine. Above 1600 stems/ha, curvature varied little. White spruce also appeared to have a breaking point around 3100 stems/ha, but this was not statistically significant (Fig 3.7). For white spruce, curvature decreased in the same way. That is, it decreased steadily with increasing stand density for the site sampled. The Bacon and Watts test was also used to determine if there was a breaking point with the maximum deflection curvature maximum method. This test has not proved to be significant. It is therefore not possible to observe a breaking point with the method of maximum deflection that results in a linear relationship with stand density for both jack pine and white spruce. However, when the general relationship of the two species was compared, there was a statistical difference between the curves. Jack pine was significantly more crooked than white spruce, regardless of stand density.

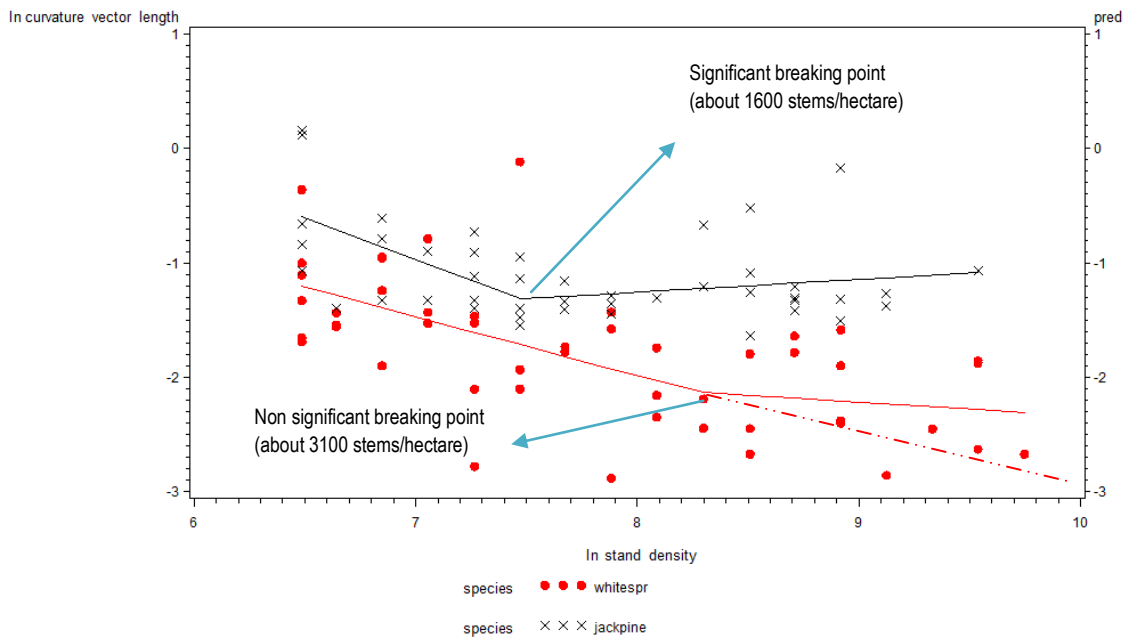


Figure 3.4. Natural logarithm of the curve against natural logarithm of stand density calculated with piecewise test (using vector method) for jack pine (black x) and white spruce (red dots).

3.6 Conclusion

This study highlights the impact of stand density on stem shape for a 32-yr-old jack pine and white spruce Nelder plantation. The two species were not affected in the same way. There were statistical differences between jack pine and white spruce for factors such as stem taper and curvature at this study site. This study showed that the method used to calculate tree curvature is important for data analysis. This research has demonstrated that curvature using vectors clearly shows a significant interaction between species and stand density, whereas no interactions were seen with the maximum deflection method.

The calculation method using the vector lengths shows that curvature of jack pine was more pronounced and more sensitive to low densities than that of white spruce. Also, the increase or decrease in curvature of jack pine was not constant according to stand density. Indeed, there was a change in the slope under 1600 stems/ha, indicating a significant increase in curvature. For white spruce, there was no statistical difference in the slope, suggesting that curvature increased steadily with decrease in stand density. These differences were not noted with the maximum deflection method. Therefore, results suggest that the method using vector lengths is better for diagnosing the impact of stand density on tree growth and could be used to optimize spacing selection in plantations. More research needs to be undertaken to determine this density threshold for white spruce and other commercially important planted tree species. Including a shade tolerant species such as black spruce would be of further value in exploring these relationships. Also, it could be interesting for future work, to check if the vector method could replace maximum deflection to the position logs before sawing.

CHAPITRE 4 The effect of the stand density on tree and lumber characteristics of white spruce and jack pine 32 years post-establishment

4.1 Résumé

La densité de peuplement peut affecter grandement certaines caractéristiques des arbres. L'objectif de cet article est de présenter les effets de la densité du peuplement sur les diverses caractéristiques du bois de tige d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). L'étude est basée sur un échantillonnage de 96 arbres d'une plantation de type Nelder de 32 ans d'âge établi près de Woodstock, au Nouveau-Brunswick. Cette plantation est caractérisée par une forme circulaire qui a pour effet de faire varier la densité de peuplement du centre vers la périphérie du cercle. En effet, les espacements initiaux variaient de 640 à environ 12 000 tiges / ha. Ce site est intéressant car il permet l'étude de deux essences différentes ayant grandi dans des conditions de croissance similaires. Plusieurs données terrains furent effectuées comme par exemple le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la courbure, le défilement, la longueur totale des arbres, les dimensions de la cime vivante, etc. De plus, les billes ont été converties en sciage afin d'évaluer leur module d'élasticité (MOE) et leur module de rupture (MOR).

Les résultats démontrent que la croissance des arbres est fortement influencée par la densité de peuplement. En effet, les diverses données récoltées sur le site telles que le DHP, la longueur de la cime vivante, les dimensions de la cime vivante, la dimension des cinq plus grosses branches morte et vivante, la longueur total des tiges, le défilement ont démontré de forte corrélation avec la densité de peuplement autant chez le pin gris que chez l'épinette blanche. Cependant, dans plusieurs cas, le pin gris n'a pas réagit de la même façon que l'épinette blanche même si les conditions de croissances étaient les mêmes. La densité de peuplement a également eu un effet significatif sur les résultats ($p \leq 0.05$) de MOE et MOR. Aucune différence n'a été trouvée entre les deux essences pour cet aspect. Cependant la relation MOR en fonction du MOE est différente entre les deux espèces à l'exception des valeurs de MOE entre 4292 et 8193 MPa. Pour le MOE en bas de 4292 MPa, le MOR du pin gris était significativement plus élevé que celui de l'épinette blanche. À des MOE supérieurs à 8193 MPa, le MOR du pin gris est nettement inférieur à celui de l'épinette blanche.

4.2 Abstract

Stand density can greatly affect tree characteristics. The objective of this paper is to present the effects of stand density on various stem wood characteristics of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). The study is based on a total of 96 trees sampled from a 32-year-old Nelder spacing experiment established near Woodstock, New Brunswick. This plantation is characterized by a circular shape and stand density decreases from the centre to the periphery of the circle, offering a gradient of initial spacings ranging from 0.91 to 4.02 m or 640 to about 12 000 stems/ha. This particular plantation design allowed us to compare tree and wood characteristics of two species grown at the same site under similar climatic conditions. Dendrometric data such as the diameter at breast height (DBH), total tree length, live crown dimensions, stem curvature, stem taper and the diameter of the largest branches were analyzed. In addition, sawlogs were converted into lumber to evaluate its modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) in static bending.

Results indicated that tree growth is strongly influenced by stand density irrespective of species. Expectedly, stem DBH, volume, height, taper, live crown length and width, live and dead branch diameters all increased with increasing spacing. However, in many cases, jack pine did not react the same way as white spruce although growing conditions were the same. The effect of stand density on lumber MOE and MOR was significant at the $p \leq 0.05$ level and there was no significant difference between the two species. The relationship MOR as a function of MOE was similar for the two species when lumber MOE values ranged between 4292 and 8193 MPa. However, the relationship was different below and above these thresholds. For MOE lower than 4292 MPa, jack pine MOR was higher than that of white spruce. With MOE higher than 8193 MPa, jack pine MOR was significantly lower than that of white spruce.

4.3 Introduction

Stand density in relation to tree development has been studied for many years. It is well known that competition between individual trees is a dynamic element (Ung et al., 1997; Rondeux 1993) because it constantly changes according to the trees growth and the temporal perturbations in the stand. For example, trees may experience competition-induced mortality, wildfires, windstorms, infestation by insects or fungi, and structural manipulations brought about by silvicultural treatments (Panshin and de Zeeuw, 1980; Zobel and van Buijtenen, 1989), affecting crown development and growth rates of individual trees (Raulier et al., 1996), and concurrent wood properties (Sjolte-Jorgensen, 1967; Janas and Brand, 1988; Jozsa and Middleton, 1997). The ability of the tree crown and root systems to access light resources and nutrients is largely density-dependent (Zobel and van Buijtenen, 1989).

Density regulation or initial spacing is usually achieved by manipulating both the number and arrangement of stems per area at the time of plantation establishment. When planting trees, initial spacing is normally determined by the volumetric and product yield objectives. Spacing can also be changed over time through thinnings and partial harvesting to prevent the loss of trees due to mortality and promote individual tree growth. In conifers, faster growth rates arising from density control generally affect wood properties as demonstrated in numerous studies like Briggs and Smith (1986), Fahey et al. (1991) and Jozsa and Middleton (1997).

In the literature, most studies on softwoods indicate that increased spacing has a strong positive effect on tree and branch growth, which generally increases knot diameter and potentially decreases lumber product quality (Zobel and van Buijtenen, 1989; Johansson, 1992; Moberg, 1999, Zhang et al., 2006; Duchesne and Swift, 2008; Duchesne and Tanguay, 2011).

In addition to the influence of stand variables like spacing and site quality, tree genetics also play a key role in tree growth characteristics. For example, Corriveau et al. (1990) studied 28 populations of white spruce in the Great Lakes and St. Lawrence forest region. Even if there were statistical differences between the populations, the study revealed that 85% to 90% of the variation in growth was attributable to individual tree differences within the same population. More recently, Lenz et al. (2012) found a solid relationship between tree morphology and wood quality in plantation-grown white spruce.

Numerous experimental spacing trials have been set up to study the space/growth relationships in tree plantations (e.g., Afflect, 2001; Parrott et al., 2012). Some experiments are entirely devoted to assessing the effects of a single stand density, while others include several. The Nelder plot is used to efficiently assess the effects of various densities within a small area (Nelder, 1962). Nelder published a description of some experimental designs specifically aimed at studying the effect of initial spacing on tree characteristics. Compared with conventional initial spacing studies that normally require very large samples taken over large areas, the Nelder plot allows for sampling fewer trees on a fairly compact area (Afflect, 2001; Parrott et al., 2012). In fact, the tree becomes the base unit of the study where it is distributed across a relatively homogenous site thus minimizing extraneous environmental influences. However, these designs often require statistical analysis that takes into account spatial positions. Another disadvantage of the Nelder plot design is the possible occurrence of tree mortality over time. Indeed, the mortality of a tree may have an influence on characteristics of nearby trees. Whenever possible, it is preferable to remove these trees for sampling as suggested by Mark (1983) and Stape and Binkley (2010). Sampling should also be avoided where tree mortality is high. Another important point to consider when the time comes to analyze the data from such a tree layout is the variation in planting positions, which may slightly alter the spatial distribution (Parrott et al., 2012). Although the Nelder-type experimental designs are statistically less rigorous than randomized experiments, they still remain a very effective tool for understanding the impact of spacing on tree growth and concurrent changes in wood properties in plantations.

The general objective of the study was to:

Assess and compare the influence of initial spacing on external tree characteristics of two species (jack pine and white spruce) having grown on the same Nelder plot. The tree-level variables were DBH, total tree height, stem volume, stem taper, live crown dimensions, and live and dead branch diameters. More specifically, the effect of initial spacing on the modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) of lumber products was checked for these two species.

4.4 Materials and Methods

4.4.1 Nelder plot characteristics

A Nelder-type plantation experiment established in 1977 by the New Brunswick Ministry of Natural Resources, near Woodstock, New Brunswick (46.16° N, 67.58° W), was selected for the study. The plantation was divided into two halves with white spruce planted on one side and jack pine planted on the other (Fig. 4.1A). Both species experienced the same growth conditions given that the plot was established in an abandoned farm pasture. In this plot design, each line intersection corresponds to a tree spatial position, and the distance between the trees increases from the centre to the periphery of the circle (from 0.91 m up to 4.02 m). Thus, the trees growing near the centre experienced strong competition, while those on the periphery grew without virtually any competition and in some cases can be considered to be open-grown. No silvicultural interventions were performed on this plot after planting.

Figure 4.1B shows the change in stand density as a function of tree position in a Nelder row (or spoke). In each row, there are 17 initial spacings ranging from per hectare equivalents of 12,000 stems in the centre to about 600 stems on the outer circumference of the circle. For each species, five adjacent rows were selected for wood quality analysis.

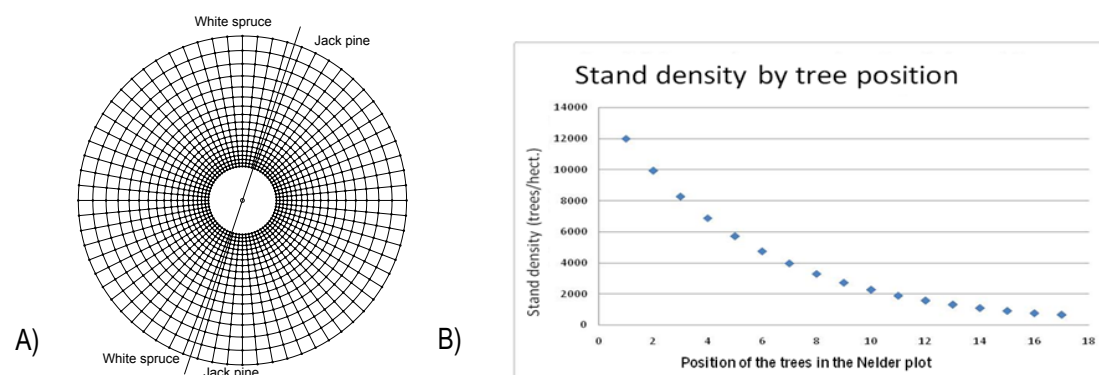


Figure 4.36. A) Plan of the Nelder plantation. B) Stand density as a function of tree position in the plantation, from centre (position 1 equals to 12 000 stems/ha) to outside (position 17 equals to 600 stems/ha) of the circle.

4.4.2 Tree sampling

A total of 96 trees, 46 jack pine and 50 white spruce, were selected for destructive sampling on the site. All living trees comprised in a Nelder row were harvested (representing 17 initial spacings). In practice, this resulted in about 13-14 useable trees per row because of tree mortality in the higher stand density classes (positions 1 to 5 in Fig. 4.1B). Dead trees or trees with major defects such as forks were removed from the sample. A dead tree could have an effect on the characteristics of the nearby trees because of the increase in the growing space. The following data were collected: geographic position (north), tree diameter at breast height (diameter-outside bark at a height of 1.3 m), live crown width (m; NS and EW directions) and length (m), total stem length (m) and the diameter (cm) of the five largest living branches, and the diameter (cm) of the five largest dead branches. After cutting and limbing the trees, each stem was cut at 7-cm diameter and scanned using FPIinnovations' Comact true shape laser scanner to obtain its exact 3D form (Comact Equipment Inc.). Subsequently, Optitek, a sawing simulation software, was used to estimate stem and log metrics, such as the large-end diameters (cm), small-end diameters (cm), taper (cm/m), curvature (cm/m) and volume (m³). Taper was calculated as the difference between the large-end and small-end diameters over the full length of the stem.

4.4.3 Lumber mechanical testing

Trees were cut into 2.5 m (8 feet) long logs. The logs were converted into lumber (38 x 64 mm (2 x 3 in), 38 x 89 mm (2 x 4 in) and 38 x 140 mm (2 x 6 in) using a portable sawmill. After kiln drying, the modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) of the lumber belonging to a sub-sample of 33 white spruce and 38 jack pine trees were determined in static bending following the ASTM D-198-05 standard. This was determined using the 3rd point-loading method using the SYSTECH model FLX-800 static bending machine. The MOE and MOR values were adjusted to a moisture content of 15% following ASTM D-1990-07. MOR for both 76 mm (3 in) and 152 mm (6 in) lumber was adjusted for size effect to a standard uniform width of 102 mm (4 in). A total of 327 lumber pieces were tested.

4.4.4 Statistical analysis

Statistical analysis was carried out using a linear regression with PROC GLM procedure in SAS software between all morphological traits, the stand density and species, with the latter being treated as an independent indicator variable (Table 2). The normality of data distribution was tested and as the distribution of the errors was not normal, a logarithmic transformation was performed (Table 2). For example, $\ln(640 \text{ stems/ha}) = 6.5$, while $\ln(12000 \text{ stems/ha}) = 9.4$ on the logarithmic scale (see Fig. 2). For mechanical properties, statistical analyses were carried out using a mixed linear model and the MIXED procedure in SAS (SAS Institute Inc. 2010). For the MOE, the error distribution was normal but for the MOR, a logarithmic transformation was performed.

Data were analyzed using the following model:

$$MOR_{ij} = \beta_0 + \beta_1 MOE_{ij} + \beta_2 Species_i + \beta_3 MOE_{ij} * Species_i + \gamma_{j(i)} + \epsilon_{ij}$$

where

$\gamma_{j(i)}$ is a random effect associated with stem j within species i and ϵ_{ij} is the residual term.

Species and stem effects were treated as random.

All tests were done at the $\alpha=0.05$ significance level.

4.5 Results and Discussion

4.5.1 Effects of initial spacing on tree characteristics

Table 4.1, show a summary of the data taken for the stems.

Table 4.5. White spruce and jack pine tree characteristics all stand densities considered

Species	# stem		Sweep		Total		Live crown	Live crown	Live crown	Stem
			max. deflection	Taper	DBH	length	length	dimension	ratio	volume
			(cm/m)	(cm/m)	(cm)	(m)	(m)	(m)	(%)	(dm ³)
Jack pine	46	Avg.	0.894	1.071	18.5	17.1	6.3	3.4	36.8	238.7
		Max.	3.650	2.871	33.8	19.5	10.5	9.0	65.6	597.6
		Min.	0.402	0.627	11.5	10.6	1.6	0.7	10.8	70.1
		STD	0.532	0.407	4.9	1.9	2.1	1.8	8.4	115.0
White spruce	50	Avg.	0.666	1.497	18.0	12.7	5.5	3.7	42.5	175.4
		Max.	1.736	2.232	27.0	17.5	12.5	6.7	77.6	408.0
		Min.	0.226	0.581	9.9	7.5	1.6	1.2	18.2	38.7
		STD	0.295	0.413	4.8	1.8	2.2	1.4	11.2	97.9

Table 4.2 presents the relationship between initial spacing and tree characteristics. Tree taper, DBH, length, volume, live crown length, and diameter of the five largest branches in the live crown were all statistically significantly correlated with stand density and species. The total tree length, width of the live crown and diameter of dead branches showed an interaction between stand density and species.

Table 4.37. Statistical result of different factors using an indicator variable

	Source	Valeur F	Pr>F
Taper	species	101.89	<.0001
	log_density	228.24	<.0001
	log_density*species	0.72	0.3984
DBH	species	0.84	0.3605
	log_density	94.77	<.0001
	log_density*species	0.19	0.6632
Total length	species	151.6	<.0001
	log_density	7.40	0.0078
	log_density*species	4.66	0.0335
Live crown length	species	3.81	0.0538
	log_density	13.53	0.0004
	log_density*species	0.88	0.3498
Live crown dimension	species	6.40	0.0131
	log_density	245.94	<.0001
	log_density*species	9.63	0.0025
stem volume	species	15.01	0.0002
	log_density	43.01	<.0001
	log_density*species	0.00	0.9665
Live knot diameter	species	6.20	0.0146
	log_density	53.34	<.0001
	log_density*species	1.55	0.2160
Dead Knot diameter	species	37.97	<.0001
	log_density	75.69	<.0001
	log_density*species	9.18	0.0032

Figure 4.2 shows the negative relationship between tree taper and stand density ($p < 0.0001$). This trend could visually be seen on the site. Strong competition forces trees to grow in height in order to access light, resulting in slender stems. In contrast, wider spacing produces trees with larger tapers resulting in conical-shaped stems (Larson, 1963). In this study, white spruce taper was higher than that of jack pine ($p < 0.0001$) in similar growth conditions (Fig. 4.2). Besides the effect of stand density and species genetics, tree taper could also be influenced by site quality and climate change (Muhairwe, 1994). No statistically significant interaction between stand density and species for taper could be found ($p = 0.3984$).

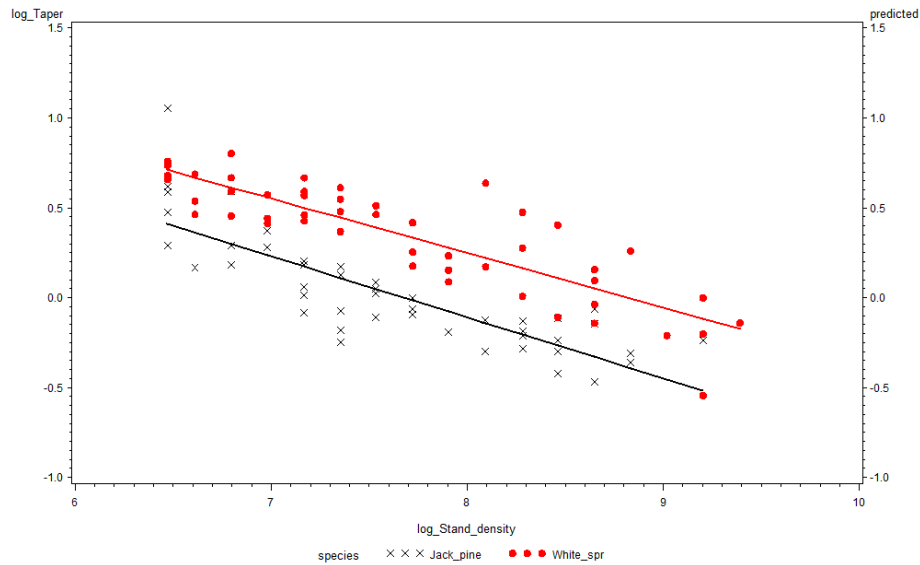


Figure 4.38. Logarithm of stem taper as a function of logarithm of stand density. The range of the logarithmic scale, 6.5 to 9.4, represents a stand density range of 640 to 12000 stems/ha.

As expected, tree DBH increased with lower stand density ($p < 0.0001$) (Fig. 4.3). Similar results were reported for plantation jack pine (Zhang and Chauret, 2001; Tong and Zhang, 2005). In an open-growth area, the branches have more space to grow, which increases live crown photosynthesis and the production of auxins – i.e. growth hormones that regulate shoot elongation and wood formation. These trees will grow faster and develop larger and more tapered stems with a higher proportion of juvenile wood than trees growing in a dense stand (Jozsa and Middleton, 1997; Kang et al., 2004). At a given stand density, there was no difference in DBH between white spruce and jack pine trees ($p = 0.3605$). There was no significant interaction ($p = 0.6632$) of stand density and species for DBH. In Figure 4.4, as for DBH, stem volume significantly increased in wider spacings for both jack pine and white spruce ($p < 0.0001$). On this site, for a given stand density, jack pine produced significantly more volume than white spruce ($p = 0.0002$). However, a larger volume does not necessarily mean a higher stem quality. In this Nelder plot, based on visual observations, we found that jack pine trees were statistically ($p < 0.05$) more crooked (Belley et al. 2013) than white spruce trees, meaning that a larger volume will not necessarily result in a higher lumber yield. No significant ($p = 0.9665$) interaction (density*species) was detected for stem volume.

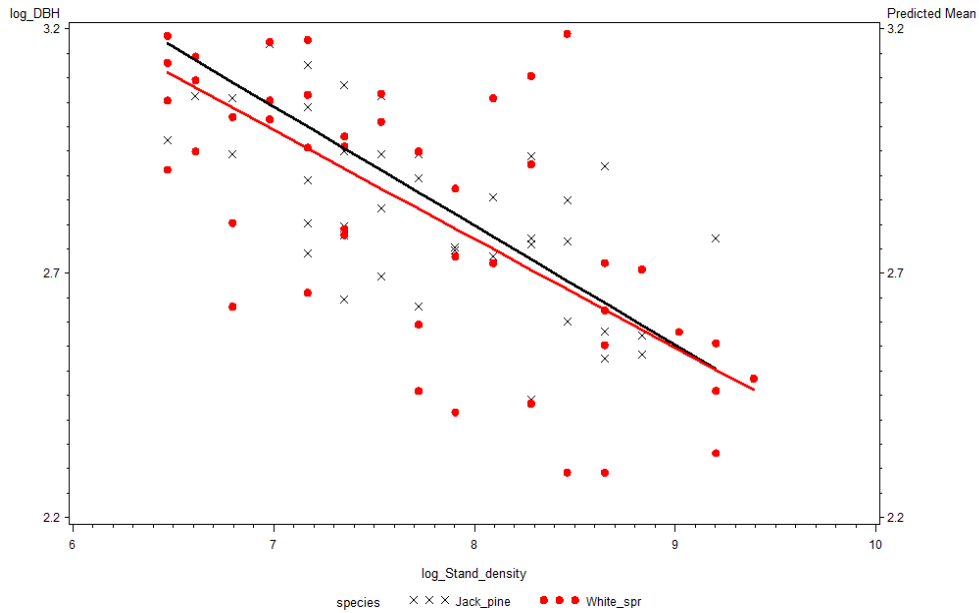


Figure. 4.39. Logarithm of DBH as a function of logarithm of stand density

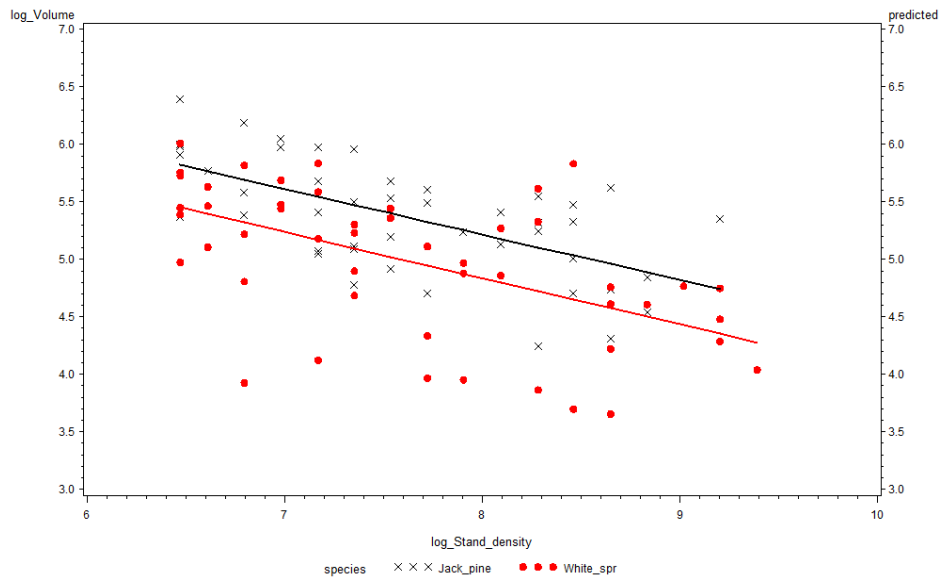


Figure 4.40. Logarithm of stem volume as a function of logarithm of stand density

Tree height increased when stand density increased for both species ($p=0.0078$). Trees growing at lower stand densities are generally shorter (Kang et al., 2004). However, there was a significant interaction at the 95% confidence level ($p=0.0335$) between stand density and species (Fig. 4.5). This means that jack pine and white spruce do not respond the same way to stand density changes. Results in Figure 4.5 and Table 4.1 show that jack pine trees were significantly taller than white spruce trees ($p<0.0001$), very likely due to the fact that jack pine is a less shade tolerant species that tends to grow faster to capture the light it needs to survive and grow under strong competition. Overall, tree height was reduced at the extremes of the density ranges. At high densities, height was reduced because of high competition between trees, whereas at the lowest

densities, competition was not apparent initially and resources were spent for branch growth instead of being used for height growth.

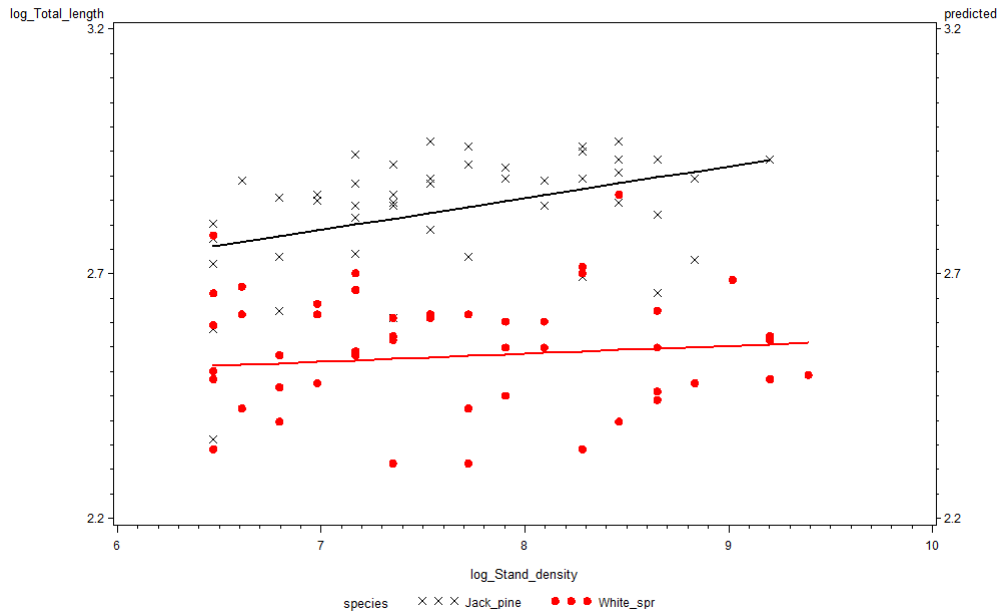


Figure 4.41. Logarithm of total tree height as a function of logarithm of stand density

Crown characteristics

Live crown length decreased with an increase in stand density ($p=0.0004$; Fig. 4.6), which is in agreement with Larson (1963) and Jozsa and Middleton (1997). Here, the difference between species is not significant ($p=0.0538$).

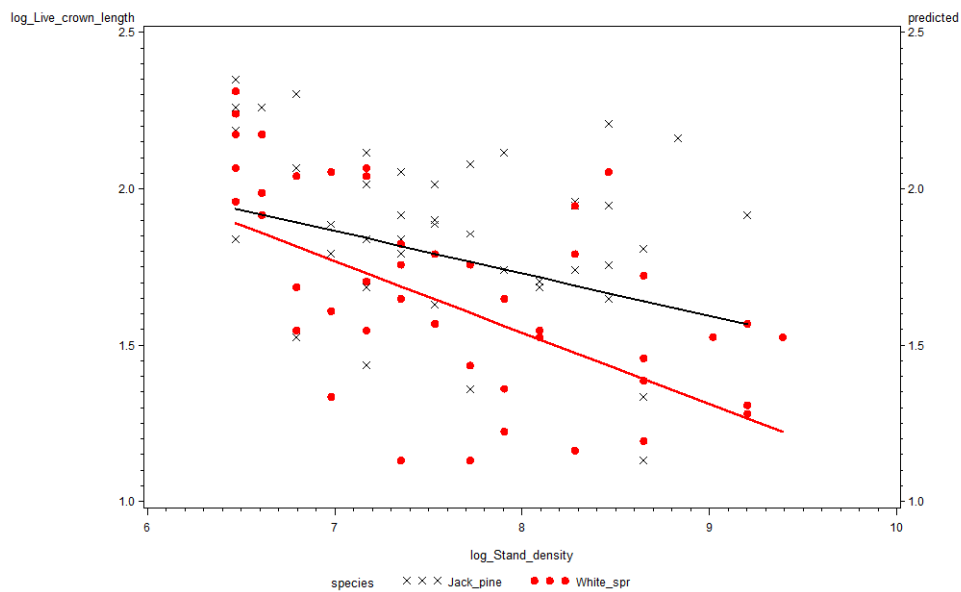


Figure 4.42. Logarithm of live crown length as a function of logarithm of stand density

Similarly, the live crown width decreased when the stand density increased ($p < 0.0001$) (Fig. 4.7). There was also a significant interaction ($p = 0.0025$) between live crown dimension and stand density (dimension N-S, E-W). The slope of jack pine was significantly steeper than that of white spruce ($p = 0.0131$). Thus, when stand density increased, the live crown dimension for jack pine decreased at a significantly faster rate than it did for white spruce. Trees grown in wide-spaced plantations generally produce larger crowns (Smith, 1980; McClain et al., 1994).

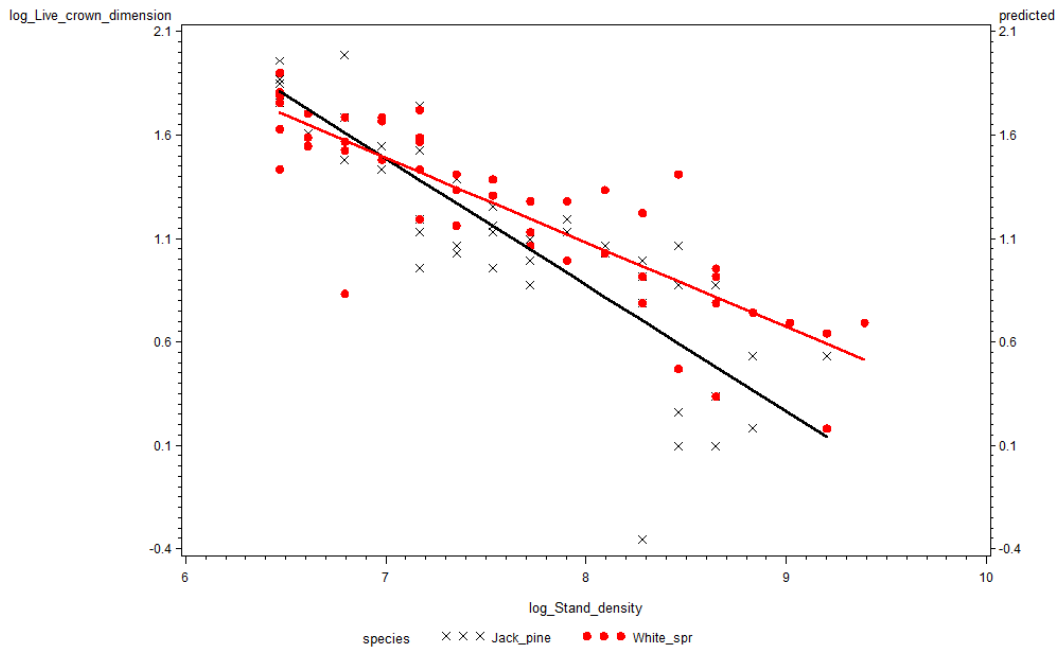


Figure 4.43. Logarithm of live crown width as a function of logarithm of stand density

Branch diameter

The diameter of the five largest live branches also significantly decreased with increasing stand density ($p < 0.0001$; Fig. 4.8), in agreement with the literature (Hein et al., 2008). The size of live branches was also significantly ($p = 0.0146$) larger in jack pine than in white spruce irrespective of the initial spacing level. This confirms the tendency of jack pine to develop larger branches and knots, especially at low stand densities (Zhang et al., 2006; Duchesne and Swift, 2008). Even if an interaction seems to exist between the logarithm of live branch diameter and the logarithm of stand density (Fig. 4.8), the slope of the relationship is the same for both species ($p = 0.2160$).

The dead branch diameter decreased when the stand density increased ($p < 0.0001$) and there was a significant interaction ($p = 0.0032$) with stand density (Fig. 4.9). The jack pine regression slope indicates that knot size in jack pine increased faster than in white spruce when stand density decreased ($p < 0.0001$). Jack pine seems to be more sensitive to low densities when

considering branch recession and size. Tong and Zhang (2005) also reported that initial spacing affected tree growth diameter, crown width, tree height, stem volume, knottiness, stem taper and stem deformation for jack pine.

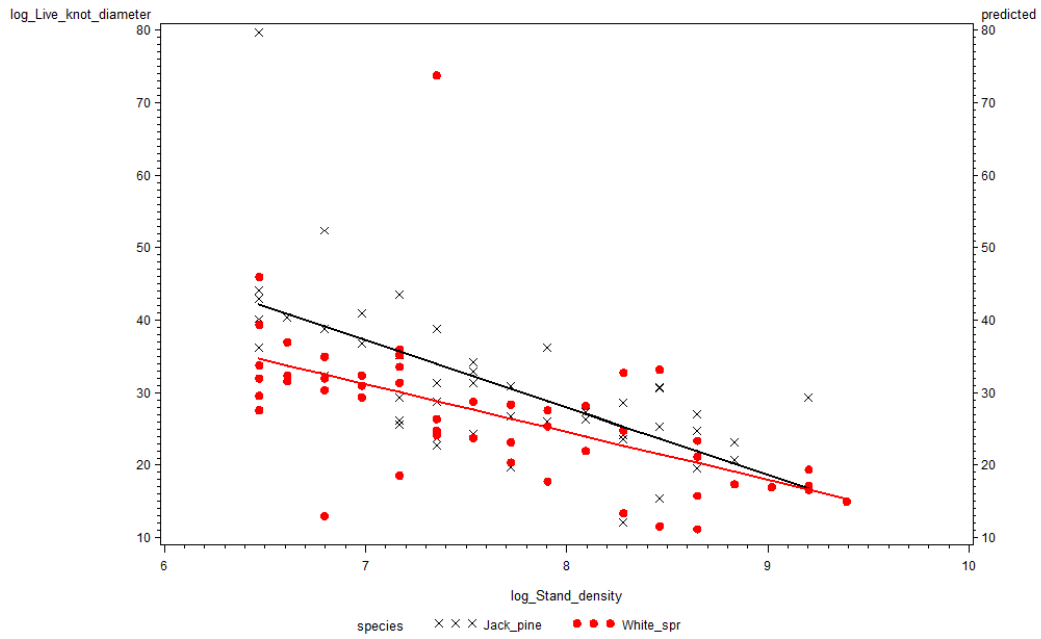


Figure 4.44. Logarithm of live branch diameter as a function of logarithm of stand density

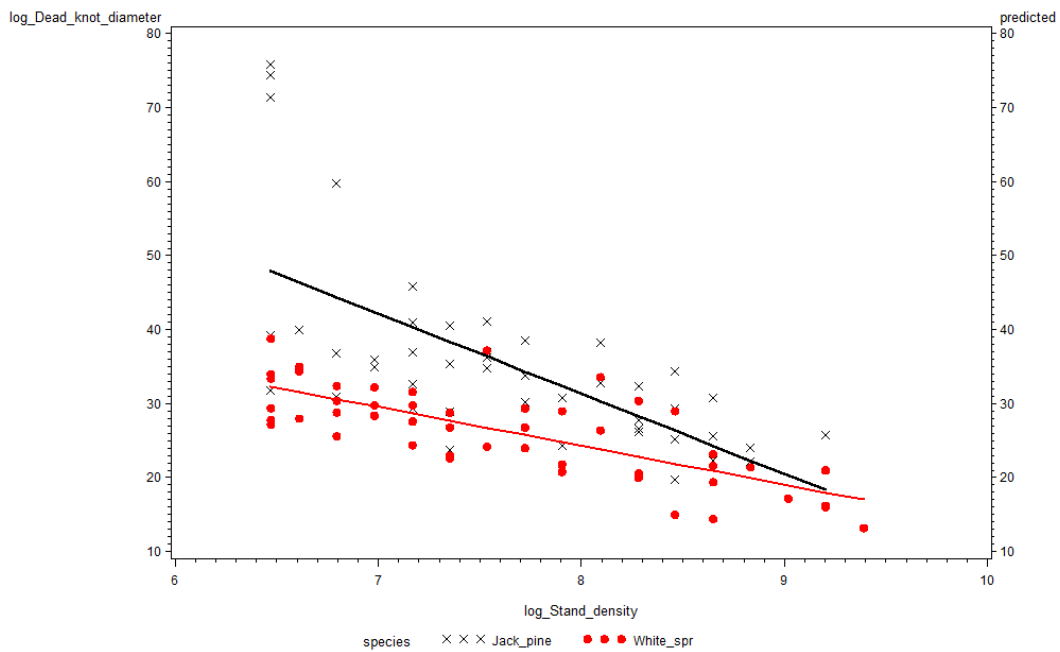


Figure 4.45. Logarithm of dead branch diameter as a function of logarithm of stand density

4.5.2 Lumber mechanical properties

Table 4.3 presents the results of ANOVA analysis for the MOE lumber testing. The wood samples had an approximate moisture content of 10% and a density ranged from 300.2 to 442.9 kg/m³ for white spruce, and from 288.6 to 602.9 kg/m³ for jack pine. The MOE and MOR values were adjusted to a moisture content of 15% following ASTM D-1990-07. MOR for both 76 mm (3 in) and 152 mm (6 in) lumber was adjusted for size effect to a standard uniform width of 102 mm (4 in). Wood scientists recognize that there is a strong relationship between lumber MOE and MOR and tree characteristics (Lei et al., 2005, Paradis et al., 2013). MOE is the best predictor of lumber strength and it can be determined nondestructively with different methods such as the measurement of static or dynamic bending vibration and dynamic longitudinal vibration (Divos and Tanaka, 1997) and of acoustic velocity of standing trees and lumber (Paradis et al., 2013).

Table 4.46. MOE as a function of stand density (Mixed regression model)

Source	F value	Pr>F
Stand density	15.44	.0001
species	1.43	0.2326
Stand density_*Species	0.61	0.4338

Figure 4.10 shows that MOE increased with increasing stand density ($p < 0.0001$, Table 4.5). There was no statistical difference between the two species ($p = 0.2326$), and no significant interaction between the species and stand density ($p = 0.4338$). The wide variation in MOE values at a given stand density is probably caused by the large variation in wood quality. Lumber MOE reached very low values in the low stand density classes, where juvenile wood constitutes a higher proportion of the stem, branches are larger, knots are more frequent, wood is of lower density (specific gravity) and the grain deviation is more pronounced. The combination of these spacing-related factors along with the young age of the plantation (32 years) could explain the low lumber MOE values obtained in this study.

The observed negative impact of increasing spacing on lumber MOE agrees with another study carried out on white spruce in Thunder Bay, Ontario (Duchesne and Tanguay, 2011). At 60 years of age, lumber MOE was found to decrease from a maximum of 9427 MPa in the 1.8 m spacing, to 8031 MPa and 7476 MPa in the 2.7 and 3.6 m spacings, respectively (which corresponds to 3086, 1370 and 771 trees/ha). Lumber wood basic density for this study was 348, 319 and 332 kg/m³ respectively. Generally, at a given spacing, wood properties are expected to improve with age, as trees grow more mature wood and natural pruning of lower branches occurs.

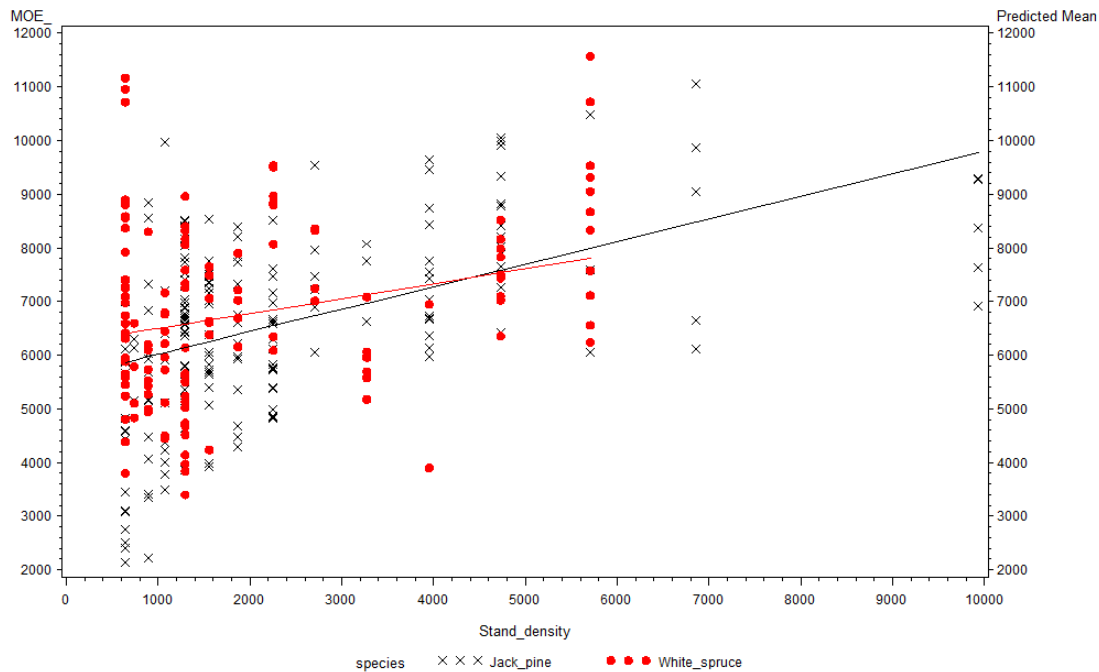


Figure 4.47. Lumber MOE (MPa) as a function of stand density (trees/ha)

Table 4.4 presents the lumber MOR results of the ANOVA analysis

Table 4.4. Logarithm of MOR as a function of stand density (MIXED regression model)

Source	F value	Pr>F
Stand density	19.65	<.0001
species	0.32	.5714
Stand density_*Species	0.00	.9452

As for MOE, lumber MOR significantly increased with stand density ($p < 0.0001$; Table 4.5; Fig. 4.11). There is no statistical difference between the two species ($p = 0.5714$). One would expect jack pine to have a lower MOR than white spruce as it tends to have larger knots at low stand density, but this is not the case. One tentative reason is that jack pine wood tends to be denser than white spruce wood (Jessome, 1995), which may counterbalance the negative effect of larger knots on lumber mechanical properties. No significant interaction ($p = 0.9452$) was observed for MOR between species and stand density.

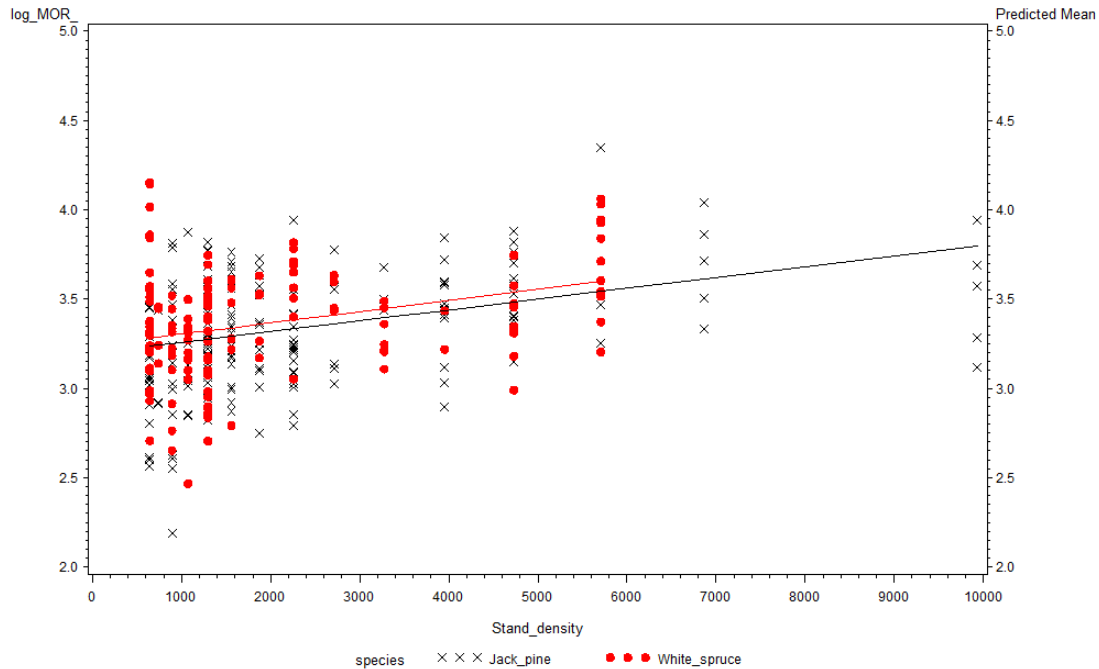


Figure 4.48. Logarithm of MOR (MPa) as a function of stand density (trees/ha)

Table 4.6. MOR as a function of MOE for a Mixed regression model

Source	F value	Pr>F
MOE	356.89	<.0001
species	6.12	0.0140
MOE_*Species	6.88	0.0092

It is important to note that this plantation is young and it is possible that the wood properties may improve in the future. For loblolly pine (*Pinus taeda*), Clark et al. (1994) found that the effect of thinning on improving lumber quality was better for closely spaced stands (1.8 m x 1.8 m, 3000 trees/ha) than those spaced more widely. In this particular case, the combined effect of initial spacing and thinning shows that high stand densities result in an increase in wood strength. For black spruce, it was shown that trees coming from a low stand density gave lumber for which the MOR was lower than for trees harvested from denser stands (Zhang and Chauret, 2001). In a study on yellow pine, it was also shown that population density had a significant influence on MOE (Biblis et al., 1995), although density had no influence on MOR (Biblis et al., 1997). If one looks at the relationship between MOR and MOE (Fig. 4.12), we see that MOR increased with an increase in the MOE. Although the interaction between jack pine and white spruce is significant, the MOR/MOE relationship is not the same ($p=0.0092$). However, when considering only the MOE interval between 4292 and 8193 MPa, the relationship between MOR and MOE is not significantly different between the species ($p>0.05$). When the MOE is higher than 8193 MPa, the MOR/MOE relationship

differs between species. Indeed for a given MOE, jack pine gives a lower MOR than does white spruce. However for MOE below 4292 MPa, white spruce tends to give lower MOR ($p < 0.05$) than does jack pine. However these results should be taken with caution because there were few white spruce data for MOE values below 4292 MPa. Figure 4.12 also shows that jack pine trees produced more lumber in the lower end of the MOE class below 4290 MPa. This strongly suggests that jack pine lumber quality is more affected by low stand density than white spruce, most likely because it produces larger knots, greater sweep and more wood grain deviation.

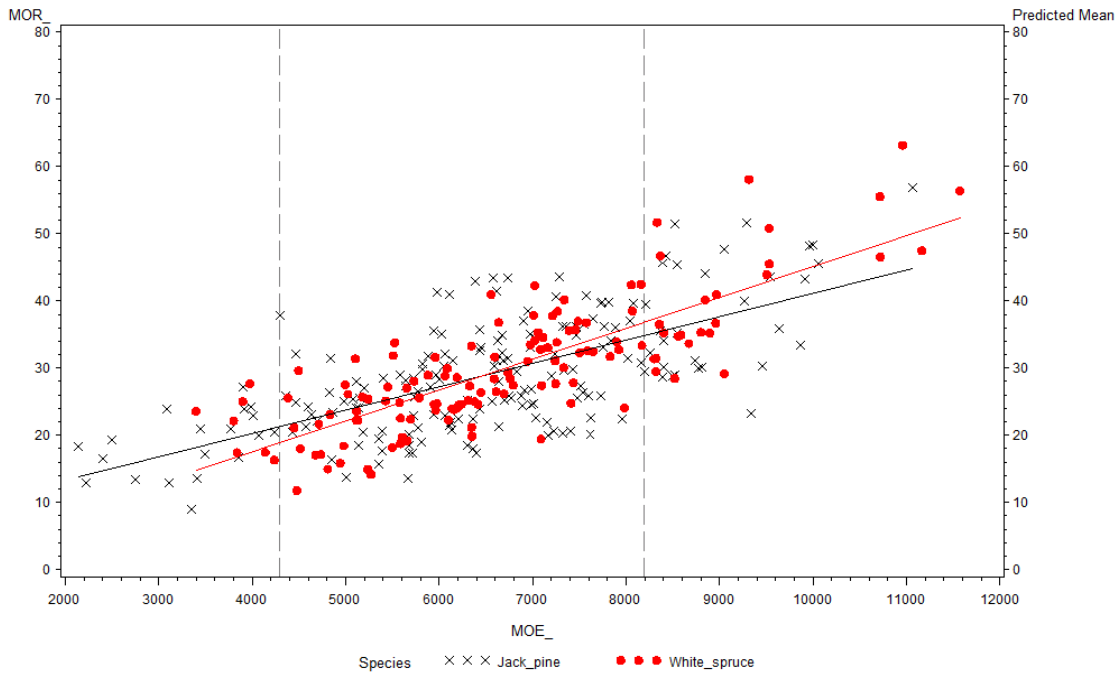


Figure 4.49. Lumber MOR (MPa) as a function of MOE (MPa)

Experience with a larger set of similarly designed Nelder plots in Ontario suggests that the selected site and its species-specific nature/affinity is a principal determinate underlying differences between species for a given initial spacing (e.g., the ecological characteristics of the site may be more conducive to jack pine growth than white spruce growth and hence growth differences may be less attributed to density effects) (Peter Newton, personal communication, Nov. 2, 2012). It is important to note that the results developed in this study are based on a relatively small sample of a Nelder plot plantation. The inferences regarding similarities and differences between the two species in reference to the various attributes and relationships assessed may be applicable and reflective of only this single site.

4.6 Conclusion

The particular design of the plantation experiment used in this study made it possible to compare the tree and wood characteristics of two economically important Canadian species, jack pine and white spruce, growing under the same conditions over a period of 32 years.

As the present and previous studies show, stand density has an important effect on tree growth and characteristics. Indeed, lower stand density generally increased crown size, branch diameter and juvenile wood proportion and also decreased stem straightness (Sjolte-Jorgensen, 1967; Janas and Brand, 1988). Whether for the DBH, length of live crown, volume, knot diameter, total tree height, width of live crown or taper, stand density is a principal determinate influencing these features. The results of this study showed that different species under similar growth conditions are not affected exactly the same way by stand density. Indeed, statistical differences were detected between jack pine and white spruce for tree taper, stem volume and live crown dimensions. Species plays a key role in the development of certain tree characteristics. However, the species coupled with growing conditions such as stand density sometimes leads to different relationships. This study showed such differences in relation to live crown width, total stem height and size of the largest five dead branches. Thus, depending on stand density, jack pine reacts differently than white spruce for these studied characteristics. These information show the effects of stand density and it could be useful to take decision for the silviculturist.

The predicted MOR lumber values for jack pine and white spruce were the same for both species when MOE values ranged between 4290 and 8193 MPa. For MOE lower than 4290 MPa, the results suggest that (1) white spruce had higher MOR within this interval, and (2) the MOR of jack pine was more affected by defects such as knots and grain deviation than white spruce was. However, the conclusion is tentative given the limited data sets.

In conclusion, the Nelder plot design is a useful research tool for studying the relationships between initial spacing and wood quality, and identifying which species and spacings can produce the desired wood characteristics for given end-products. This information is greatly needed to ensure that silvicultural investments in stand density management enhance wood quality and create added value along the forest sector value chain.

CHAPITRE 5 Stem deformation correction factor for accurate estimation of lumber volume recovery of white spruce and jack pine

5.1 Résumé

Cet article présente une approche pour évaluer l'impact de la forme de la tige sur la récupération du volume de sciage de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) et du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). La méthode consiste à calculer la réduction du volume de sciage en tenant compte de la déformation des tiges. Le facteur de correction qui en résulte peut ainsi être appliqué pour effectuer une estimation du volume de sciage avant la récolte à partir des données d'inventaires forestiers. À cette fin, une tige réelle avec des déformations et une tige jumelle virtuelle complètement droite ont été sciées à l'aide d'un simulateur de sciage pour fin de comparaison des rendements. Les simulations ont été réalisées à partir d'un échantillonnage de 96 tiges récoltées sur une plantation de type Nelder âgée de 32 ans située de Woodstock, au Nouveau-Brunswick. La conception de cette plantation, offrait des espacements initiaux allant de 640 à environ 12 000 tiges/ha et permettait l'étude de deux espèces différentes cultivées dans des conditions de croissance similaires.

Les résultats des simulations ont montrés que les tiges réelles de pin gris et d'épinette blanche produisaient respectivement 45,1% et 13,1 % moins de volume de sciage par rapport aux tiges virtuelles sans défauts. La réduction du volume des sciages entre la tige réelle et la tige virtuelle était statistiquement significative pour les deux espèces. Le pin gris a obtenu un facteur de correction du volume supérieur à l'épinette blanche en raison de la courbure qui était plus sévère pour cette essence et de la forme des tiges qui était plus influencée par la densité de peuplement que celle de l'épinette blanche.

Les deux équations de régression (tige virtuelle-tige réelle) développées dans ce travail pourraient être utilisées pour estimer la récupération des volumes de sciage avec plus de précision dans des plantations d'épinettes blanche et de pins gris ayant eu des conditions de croissance comparables.

5.2 Abstract

This paper presents an approach to assess the impact of stem shape on lumber volume recovery for white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) trees. The method calculates a lumber volume reduction per tree that accounts for natural stem deformations. The resulting correction factor volume can be applied to stand volume estimations based on inventory data, to better estimate of lumber quantity before harvest. To this end, a real stem with natural deformations and a completely straight virtual stem were sawn with a sawing simulator for pairwise comparison of lumber yields. The simulations were carried out for a total of 96 stems that were harvested in a 32-year-old Nelder Spacing Experiment established near Woodstock, New Brunswick. This particular plantation design offers a gradient of initial spacings ranging from 640 to about 12 000 stems/ha and allows the study of two different species grown under similar site conditions.

The simulation results showed that real sinuous stems of jack pine and white spruce produced respectively 45.1% and 13.1% less lumber compared to virtual stems free defect. This lumber volume recovery reduction between the real and virtual stems was statistically significant for both species. Jack pine obtained a greater lumber correction volume factor than white spruce, due that jack pine stems were more crooked, and their shape more influenced by stand density than white spruce.

The two regression equations (virtual stem-real stem) developed in this work could be used to estimate lumber recovery more accurately in other white spruce and jack pine plantations with comparable growth conditions.

Key words: volume correction factor, Nelder plantation, virtual stems, real stems, stand density, sweep.

5.3 Introduction

Forest inventory data is crucial to forest management decision making. Typical forest inventory surveys consist of estimating tree basal area (m^2/ha) with the cross-sectional area (over the bark) at breast height (DBH) at 1.3 meter above the ground, recording tree species, and total height, in order to calculate stand density (number of trees per hectare) and gross stand volume (m^3/ha). To this end, taper equations are widely used to estimate stand volumes. Several stem taper equations have been developed, in recent years, by Clark et al. (1991), Zakrzewski (1999), Kozak (2004), Sharma and Zhang (2004) and Sharma and Parton (2009). Sharma and Zhang (2004) developed equations for jack pine, black spruce and balsam fir. Later Sharma and Parton (2009) developed another taper equation that included this time, basal area as stand density parameter. However, taper models do not take into account defects such as stem deformations. Thus, the prediction of lumber volume recovery from forest inventory data remains a challenge, mainly because stem shape is not easily, or cost-efficiently,

measurable. To more accurately predict pre-harvest stand value, it becomes important to develop lumber recovery models linking external tree shape information with existing inventory data.

Tree shape and tree size are affected by stand density or initial spacing. These characteristics have a direct influence on log value, processing costs and lumber yields (Monserud et al. 2004). Indeed, during log processing, diameter, taper and sweep affect the lumber yield and the grade (Pinto, 2004, Zhang and Chauret, 2001). For jack pine, initial spacing has been shown to affect significantly tree diameter, live crown development, length and log taper, the merchantable volume and the knots size as well as the stem deformations (Tong and Zhang, 2005).

In order to evaluate the effect of stem shape on lumber recovery, Tong and Zhang (2008) compared real stems obtained from a true shape scanner to virtual straight stems reconstructed from taper equations excluding all deformations such as crook and sweep. As expected, they found that real jack pine stems from naturally regenerated forests produced lower lumber volume yield than the virtual stems created with the taper equations. The yield obtained in a simulated stud mill using real stems was 58.6% while for the virtual stems it was 60.7%. A paired t-test indicated also that the average lumber volume recovery per individual stem was significantly lower in true-shape scanned stems. For white spruce and jack pine grown in plantations, there are few data currently available. Therefore, the Nelder plot design with a large variation in stand density offers a good opportunity to study the impact of spacing on stem shape and on the lumber volume correction factor.

The current scanner technologies can provide a precise external three dimensional (3D) stem shape. Once stems are digitized and transferred into a sawing simulation software such as Optitek, the 3D data can accurately assess the lumber volume from harvested stems (Goulet, 2006). Optitek also provides precise metrics such as taper, curvature, stem volume, length, diameter all along the stem, lumber and wood chip yields, and lumber quality (grades). The software allows to model sawmill layouts including almost any processing equipment currently used in Canada. Therefore, the sawing simulation results are quite close to reality. Recently, the terrestrial light detection and ranging (LiDAR) scanner technology has been applied to scan stem and crown morphology of standing trees with the purpose of linking this forest information to Optitek and then estimating pre-harvest product value (Mercier and Favreau, 2012).

However, the use of 3D scanners is still not commonly used in the sawmill industry, mainly because of the initial high cost of acquisition, the logistics involved and the expertise and time needed to support it. Thus, most sawmills are still planning their operations based on data collected from forest inventories. Therefore, the objectives of this paper were:

- 1) To simulate and compare lumber volume recovery between virtual stems (with no deformations) and real stems (with deformations).
- 2) To develop a volume correction factor that more accurately predicts lumber yields for plantation-grown white spruce and jack pine trees.
- 3) To study the relationship between lumber recovery and the 17 different stand densities of a Nelder plot.

5.4 Materials and methods

The stems were harvested in a Nelder Spacing Experiment (see Figure 1) established in 1977 near Woodstock, New Brunswick (46.16° N, 67.58° W). A total of 96 trees were harvested in December 2009, 50 white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) and 46 jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). In this Nelder plot, the surface area was divided in half, white spruce on one side and jack pine on the other. In addition to providing similar growth and site conditions for both species, this study site was well suited for the objectives of this study. This particular experimental plantation design offers a gradient of initial spacing ranging from 640 to about 12 000 stems/ha. The distance between trees increases from 0.91 m in the centre of the plot to 4.02 m at the periphery, (see Figure 5.1). The plot had 68 radial spokes and 17 circles, representing 17 different initial spacings. Dead trees or trees with defects such as forks were removed from the sample. Outer guard trees in row 17, planted for protection purposes, were also included in the study sample. No silvicultural treatments had been performed on this site. After cutting and limbing the trees and topping them at 7 cm diameter, each stem was scanned using FPIinnovations Comact true-shape laser scanner to obtain a three dimensional stem shape. The stems were scanned at every 5 centimeter along its length. The gross merchantable volume, defined as lumber volume under the bark of the tree trunk between the diameter at stump height (about 15 cm above ground) and a top diameter of 9 cm, is also given by the scanner. The Optitek simulator uses the under bark diameter.

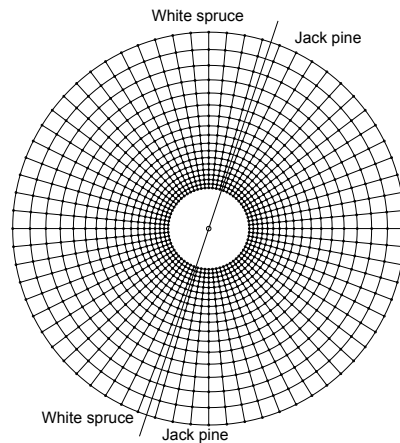


Figure 5.50. Experimental design of the initial spacing at the Nelder plot used in this study.

As mentioned before, there are several types of taper equations and such of those are presented by Tong and Zhang (2008) for jack pine grown in natural forests. However, these equations cannot be used in the special design of a Nelder plantation. Furthermore, it was not possible to create reliable taper equations for each of the 17 different initial spacings due to the

limited number of sample trees in each Nelder row. Consequently, in order to evaluate the effect of the stem shape on the lumber yield, a simple method was used. For each real stem scanned with external defects (Fig. 5.2A), a virtual stem reference (Fig. 5.2B) was created using only the butt diameter, the DBH (1.3 m), the diameter at a height of 5.48 m and the top end diameter (9 cm). A completely straight stem without defects (Fig. 5.2B) was created in 3D by extrapolating straight lines between the butt end diameter and DBH, DBH and the diameter at 5.48 m, and the latter and top end diameter. The same method was used for the two species.

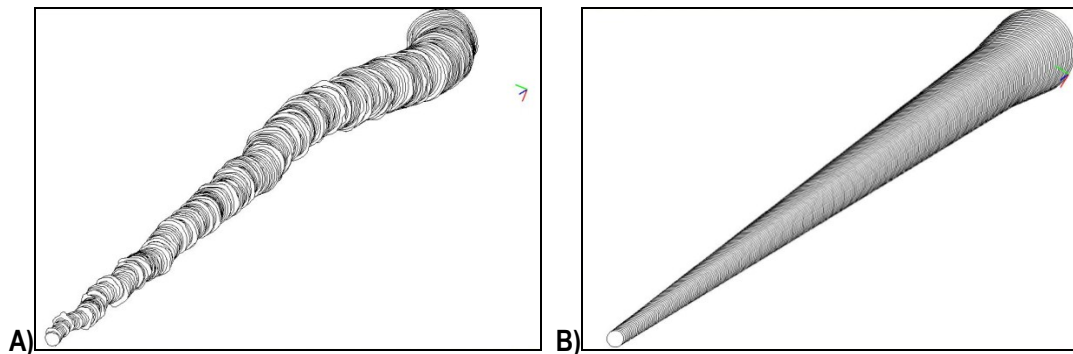


Figure 5.51. **A)** Real laser-scanned stem with natural deformations. **B)** Virtual defect-free stem.

Then, the real and virtual stems were used for the sawing simulations using the Optitek software. Thereafter, the lumber volume obtained from each pair of stem was compared. A typical sawmill equipped with modern curve sawing technology was used in Optitek. The sawmill model used is typical random length sawmill able to saw lumber pieces ranging from 5.08x7.62 cm (2x3") to 5.08x25.4 cm (2x10") in nominal size, and from 1.83 m to 4.88 m (6 to 16 feet) in length. All simulations aimed to maximizing lumber value, based on Pribec's (2011) lumber price list.

5.3 Statistical analysis

The lumber volume data from the real and virtual stems was transformed with the square root to obtain a normal distribution. Thereafter, a split-plot ANOVA was used to evaluate the impact of stem deformations (real stem vs. virtual defect-free stem) on lumber yield using the Mixed procedure of SAS software (SAS Institute Inc. 2010). The structure of this design had species (white spruce, jack pine) in the main plot and the stem status (real, virtual) in the subplot. For the stem characteristics presented in Table 1, statistical analysis was carried out using a linear regression between the stand density and species, with the latter being treated as the independent indicator variable. Statistical tests were also done in SAS software.

5.5 Results

In this 32-yr-old Nelder plot, tree DBH ranged from 9.9 cm to 27.0 cm for white spruce and from 11.5 cm to 33.8 cm for jack pine. The total tree length ranged from 7.5 m to 17.5 m for white spruce and from 10.6 m to 19.5 m for jack pine. Other measurements were collected such as live crown width and length (NS, EW), total length, live crown length and DBH. The stand and tree characterization results are reported in Belley et al. (submitted). In that study, the taper of white spruce was found to be significantly higher than that of jack pine while no statistical difference was detected for the DBH between the two species.

Table 5.1 presents the average characteristics of the 96 sample trees analyzed. For the real stems, the scanned length and sweep for jack pine are significantly greater than for white spruce. There was no significant difference between jack pine and white spruce DBH. On average, the merchantable volume of jack pine real stems was greater than that of white spruce.

Table 5.7. Summary of data taken on the 96 stems.

Species	Stem type		Total length (m)	Scanned length (m)	DBH (cm)	Taper (cm/m)	Sweep (cm/m)	Merchantable volume (dm ³)
White spruce	real stem	avg.	12.7	10.0	18.0	1.5	0.7	137.5
		St. Dev.	1.8	2.1	4.8	0.4	0.3	86.9
		Max.	17.5	14.6	27.0	2.2	1.7	341.3
		Min.	7.5	4.3	9.9	0.2	0.2	11.3
	Virtual stem	avg.		10.0	18.0	1.5		129.3
		St. Dev.		2.1	4.8	0.4		82.4
		Max.		14.6	27.0	2.2		319.7
		Min.		4.3	9.9	0.2		8.3
Jack pine	real stem	avg.	17.0	13.4	18.4	1.1	0.9	194.4
		St. Dev.	1.9	1.5	5.0	0.4	0.5	102.1
		Max.	19.5	15.7	33.8	2.9	3.7	503.1
		Min.	10.6	8.7	10.1	0.6	0.4	38.8
	Virtual stem	avg.		13.4	18.4	1.1		171.7
		St. Dev.		1.5	5.0	0.4		95.7
		Max.		15.7	33.8	2.9		546.8
		Min.		8.7	10.1	0.6		35.9

Table 5.2 presents the results from the sawing simulation in Optitek software.

Table 5.8. Results from the sawing simulation in Optitek software.

Species	Dimension (inches)	number of pieces		Lumber volume	
		real	virtual	real (bf)	virtual (bf)
White spruce	1x3	29	41	55.0	66.9
	1x4	62	71	191.2	231.8
	1x6	0	2	0	8.8
	2x3	51	46	149.7	151.4
	2x4	122	127	829.0	886.0
	2x6	23	28	260.6	335.8
Total		287	315	1485.6	1680.8
Jack pine	1x3	64	63	135.0	104.4
	1x4	50	78	135.5	252.5
	1x6	1	4	3.6	17.7
	2x3	70	65	211.8	201.6
	2x4	102	164	694.9	1159.2
	2x6	28	29	312.9	342.5
	2x8	0	5	0	89.3
	Total		315	408	1493.7

Results show that the virtual stems without defects produced significantly more lumber volume than the real stems with deformations, regardless of species ($p < 0.0001$). However, the total lumber volume sawn from virtual jack pine stems was significantly higher than that of virtual white spruce stems ($p < 0.0042$). Regarding the species, comparison of lumber volume produced from real stems only, there was no statistical difference between species, despite the fact that the merchantable volume of jack pine was initially higher (Table 5.1).

Concerning the interaction between the species and the type of log sawn (virtual vs. real), the decrease in lumber volume from virtual stem to real stem was 45.1% for jack pine and 13.1% for white spruce. The difference was statistically significant ($p < 0.0001$). These results clearly show the negative impact of the stem sweep on lumber volume yield for jack pine and the importance to understand this characteristic in order to maximize the lumber volume and value in plantation context. By adjusting initial spacing or stand density, stem shape of jack pine could be affected positively or negatively, as well as lumber value (Table 5.3).

Lumber yield can also be expressed in terms of wood consumption factor (m^3/Mbf), i.e. the round wood required to produce thousand board feet of lumber. For white spruce, the average lumber yield was 4.1 m^3/Mbf for the real stems versus 3.5 for virtual stems, while for jack pine, the yield was 4.9 m^3/Mbf for real stems versus 3.2 for virtual stems. These differences are both statistically significant at 95% confidence level. These results clearly demonstrate the species-specific impact of stem shape on the sawing performance, since both species had grown under the same conditions.

Table 5.9. Total lumber value for the 96 stems sawn in Optitek (price list from Pribec 2011).

Species	Lumber Value (US \$)	
	real	virtual
White spruce	470.4	523.3
Jack Pine	472.9	683.5

Figure 5.3 presents, for the lumber volume per tree generated by Optitek, the linear regression between real and virtual stems for both species. The regression for white spruce is $y = 0.9227x - 1.8452$ and has a coefficient of determination R^2 of 0.97, while for jack pine, the regression is $y = 0.7507x - 4.3624$ and the R^2 is 0.92. These equations can then be used to calculate the correction factors. For example, if the lumber recovery per tree is estimated at 200 dm³ using only the DBH and height from forest inventory data (virtual with no deformations), then the corrected volume per tree (real) should be 182.6 dm³ for white spruce and 145.8 dm³ for jack pine. It is important to note, however, that these equations and their resulting lumber volume corrections are based on a relatively small sample from a Nelder plot plantation, so they should be used only in similar growth conditions and similar sawmill configurations. The stem shape of jack pine or white spruce grown in plantation could be very different compared with densely regenerated natural forests, as reported in Tong and Zhang (2008), because the number of trees per hectare is usually much higher in natural fire-origin forests compared with plantations.

Figure 5.3 also shows a greater data variation in lumber volume for jack pine trees with two outliers. However, even if we remove these two trees from the analysis, the conclusion stays the same. It is interesting to note that the slope for white spruce is significantly steeper ($p < 0.0001$) than that of jack pine, even though jack pine stems always had a larger volume than white spruce. The greater sweep and more pronounced sinuous growth of jack pine remain the most logical explanations for this difference.

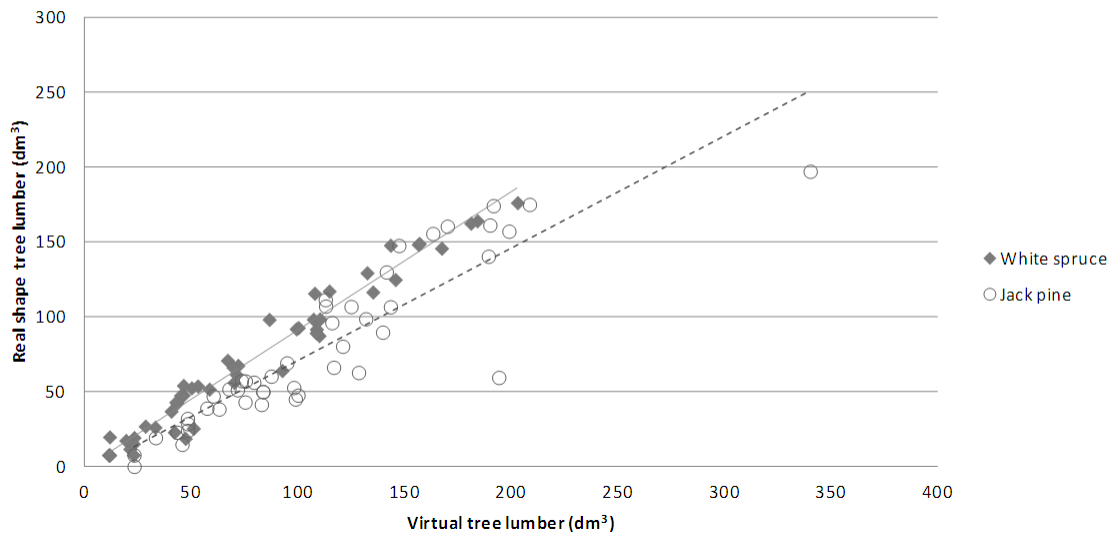


Figure 5.52. Lumber volume per tree based on real-shape stems with deformations (Y), in relation to the lumber volume per tree, based on virtual stems without deformations (X), for 32-yr-old jack pine and white spruce stems grown in plantation. (Regression with an indicator variable)

For naturally regenerated jack pine grown in New Brunswick, Tong and Zhang (2008) demonstrated that sawing simulation with virtual stems always gave a significantly higher lumber volume. However, the difference between virtual and real stems was smaller than in our study, although the natural stands had been precommercially thinned at three different spacings (control, 1.22 X 1.22 m, 1.52 X 1.52 m and 2.13 X 2.13 m). Belley et al. (2013) showed that stem deformations increase markedly with the decreasing of stand density for jack pine trees coming from the same Nelder plot, especially when the planting density was 1600 trees per hectare or lower. Indeed, lower stand density generally increases crown size, branch diameter and juvenile wood proportion and also decreases stem straightness (Sjolte-Jorgensen 1967, Janas and Brand 1988).

Figure 5.4 presents the real shape lumber volume per tree as a function of stand density. The lumber produced decreased significantly with an increase in stand density ($p \leq 0.0001$) but there was no difference between the species. For the same Nelder plot, Belley et al. (2013) showed that white spruce had a larger taper than jack pine while jack pine had a greater sweep, stem volume and stem length than white spruce. There was no difference in DBH between the two species. The initial advantage of jack pine, with its greater stem volume compared to white spruce, appears to have been offset by its greater stem sinuosity, since both species ended up with a similar lumber yield. Hence, the amount of lumber produced is

affected by several, often interacting factors like sweep and crook, DBH, taper, stem volume and stem length (Dobie and Middleton, 1980; Monserud et al., 2004).

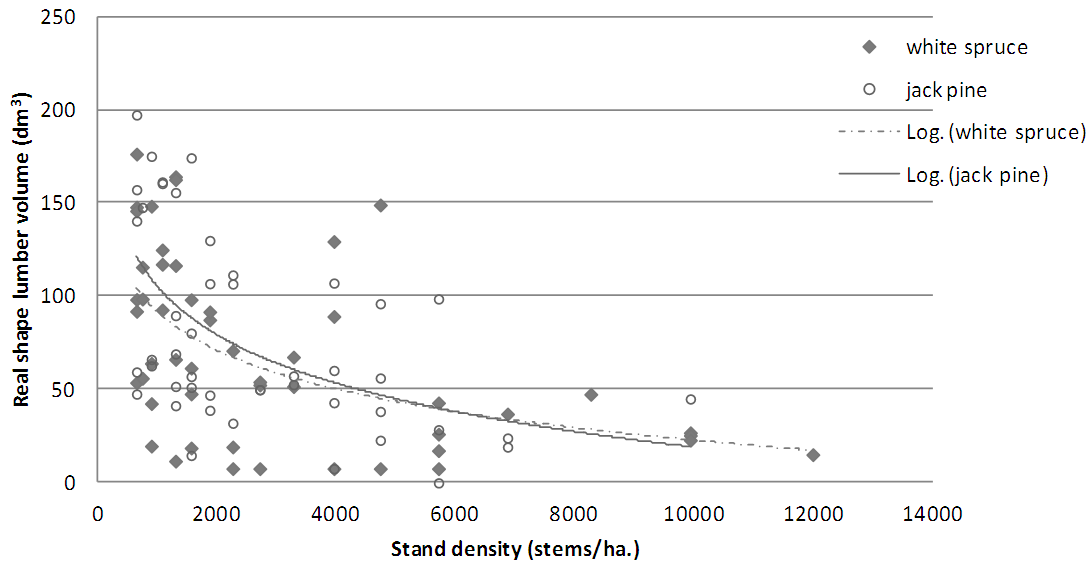


Figure 5.53. Lumber volume of real stems with deformations (dm^3/tree) in relation to stand density for 32-yr-old white spruce and jack pine and stems grown in plantation. (Regression with an indicator variable)

5.6 Conclusion

The purpose of this study was to compare the lumber volume correction factor for two species grown in the same conditions. The Nelder plot design highlighted the impact of stand density, on the lumber volume recovery of white spruce and jack pine trees. Simulations with the Optitek sawing simulator showed that, for the lumber volume obtained, jack pine was more negatively affected by stem deformations than white spruce. Indeed, for species having grown under the same conditions, jack pine had a higher lumber volume correction factor than white spruce, even though it had a higher merchantable stem volume at the beginning. Jack pine stems were more crooked than those of white spruce, and their shape was more influenced by stand density than white spruce. As expected, virtual stems produced higher volume recoveries than real-shape stems for both species. The decrease in lumber volume observed between virtual and real stems was 45.1% for jack pine, and 13.1% for white spruce. The regression equations (virtual stem-real stem lumber volumes) could be used to estimate lumber volume (and value) recovery more accurately in other jack pine and white spruce plantations with comparable growth conditions.

CHAPITRE 6 Sawing optimization based on CT-scanned knot attributes - impact on lumber volume recovery, quality and value

6.1 Résumé

Cet article porte sur l'optimisation du sciage considérant à la fois la forme extérieure de la tige, de même que la distribution spatiale des nœuds de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Les tiges utilisées ont été récoltées dans une plantation de 32 ans de type Nelder près de Woodstock au Nouveau-Brunswick. Un total de 53 arbres ont été sélectionnés pour cette étude. Cette conception particulière de plantation offre un gradient d'espacement initial allant de 640 à environ 12 000 tiges/ha. Elle permet aussi l'étude de deux espèces différentes cultivées dans des conditions très similaires.

Pour optimiser le sciage, le logiciel Optitek a été utilisé pour effectuer les simulations. Premièrement, une simulation de sciage a été réalisée à l'aide de la forme externe des tiges. Les résultats obtenus sont similaires à ce que l'industrie fait actuellement pour extraire le maximum de volume dans les tiges. Pour la deuxième partie de l'étude, une tomodensitométrie à rayons X a été effectuée sur les mêmes billes permettant ainsi d'effectuer une simulation au sciage en considérant cette fois la répartition exacte des nœuds. Pour effectuer cette tâche, il a fallu réaliser un logiciel pour extraire l'information des images rayon X et finalement la traiter pour la rendre compatible au logiciel Optitek.

La prise en compte de la distribution des nœuds lors des simulations du sciage a permis d'augmenter le nombre de pièces de qualité No.2 & meilleur de 15% pour l'épinette blanche et de 40% pour le pin gris. L'augmentation de la valeur des sciages associée à la connaissance de la distribution interne des nœuds a variée de 9,5% à 15,1% pour l'épinette blanche et de 15,2% à 23,0% pour le pin gris. Encore une fois, l'augmentation du rendement en valeur a été plus forte chez le pin gris que chez l'épinette blanche en raison de la présence de nœuds de plus fortes dimensions qui augmentent le potentiel d'optimisation. Cet exercice démontre bien le potentiel de connaître le positionnement des nœuds à l'intérieur des tiges pour la stratégie de sciage. Ceci permet non seulement d'augmenter les rendements en sciage mais également la qualité des pièces sciées

6.2 Abstract

This paper is about log sawing optimization considering both the external shape and knowledge of the spatial distribution of internal knots for white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). The 53 stems used

were harvested in a 32 year-old Nelder Spacing Experiment established near Woodstock in New Brunswick. This particular plantation design offered a gradient of initial spacing ranging from 640 to about 12 000 stems/ha and allowed studying two different species grown under very similar site conditions.

To optimize sawing, Optitek software was used to perform the simulations. First, a sawing simulation was performed using the stems external shape. The results are similar to what the industry using now to extract the maximum stem volume. For the second part of the study, an X-ray scanning was performed on the same logs to permit sawing simulation considering this time the exact knots distribution. To perform this task, we had to make a software to extract information from X-ray images and finally treated to make it compatible with Optitek software.

The comparison of the two types of sawing simulations applied to the same 53 stems revealed that taking into account the knots distribution at the log primary breakdown significantly increased lumber volume and lumber value. The increase of lumber value is between 9.5% and 15.1% for white spruce and between 15.2% and 23.0% for jack pine. The white spruce and jack pine logs produced significantly more No.2 & better grade pieces when the knots were considered. The white spruce produced 15% more No.2 & better pieces and 40% more for jack pine. Integrating CT-scan information of internal log characteristics in the sawing strategy appears as a promising way to maximize not only lumber volume but also lumber quality (i.e. minimizing the impact of knots on lumber grades, and potentially also on lumber mechanical properties).

6.3 Introduction

Many variables can alter lumber volume recovery or sawing performance. For example, external morphological factors like stem shape, taper, sweep, DBH, log volume or species can affect the amount of lumber volume extracted from a tree. Other internal factors like knots size, frequency and spatial distribution, grain deviation or wood density also need to be considered to optimize log primary breakdown in sawmills. In these cases however, sawing optimization shall not only affect lumber volume recovery but also wood quality.

Over the last twenty years, much effort has been invested in the development of new technologies to optimize processes in the wood transformation sector. For example, Bucur (2003), Rojas Espinoza (2005) and Longuetaud (2005) have already presented the current methods for non-destructive defect detection in wood. Without information on the internal tree defects, lots of mistakes are made when sawing is done, which causes losses for the industry. Harless *et al.* (1991) have shown that considering internal defects in sawing strategy for hardwood logs allowed significant increase of 7.1% in the value of the lumber produced. Currently, softwood sawmills are opting for maximizing volume during primary breakdown rather than highest quality. Lemieux (2002), performing a rotation for the worst and the best solutions (i.e. minimize lumber downgrades due to knots) to sawn black spruce, has found no real difference in visual classification between these two conditions. However, mechanical tests realized on lumber pieces with the best solutions obtained a modulus of rupture (MOR) and

modulus of elasticity (MOE) significantly higher than the worst solutions. Thus, the presence of knots can alter lumber mechanical properties depending on their size and position in the lumber pieces. Knots are one of the major defects affecting the stem quality and the lumber (Oyen *et al.* 1999). They are often accompanied by a grain deviation more or less pronounced depending on their size, such deviations increase local stresses as they change the geometry of longitudinal fibers (Bodig and Jayne, 1982).

While most of the studies on the CT image treatments are qualitative, some studies have gone further by presenting quantitative results, Bhandarkar *et al.* (1999) obtained for sugar maple, precision values of 84% and 80% for the detection of knots and cracks. Schmoltdt *et al.* (2000) identified six wood characteristics detection for three hardwood species: clear wood, knot, bark, split, sapwood and decay. Their accuracy varied from 91% to 92% for the detection of these defects.

Normark (2002) also obtained around 90% accuracy for the detection of clear wood in Scots pine. The use of CT-Scanner requires the acquisition of specific knowledge and skills to be able to properly process the images produced. The CT-Scan provides a black and white image with shades of gray. Darker pixels result in lower wood density. In the presence of high moisture levels in sawlogs, the knots are more difficult to detect automatically using image analysis algorithms. Complementary methods must be used to extract the morphology of the knots. Oja (1999) identified the need to add about two mm to the diameter of each knot detected from image analysis for Norway spruce. He concluded that the segmentation of the knots induced bias compared to the visual measurement.

The objectives of this paper are:

- 1) Evaluate the effect of knots distribution on lumber volume
- 2) Evaluate the effect of knots distribution on lumber value
- 3) Evaluate the effect of knots distribution on No.2& better grade lumber quantity.

6.4 Materials and Methods

6.4.1 Tree selection

A total of 53 trees were selected for this study, 31 white spruces (*Picea glauca* (Moench) Voss) and 22 jack pines (*Pinus banksiana* Lamb.). The stems were harvested in a Nelder Spacing Experiment established in 1977 near Woodstock, New Brunswick (46.16° N, 67.58° W). The Nelder plot had a circular shape and it was divided into two species, white spruce on one side and jack pine on the other. This experimental design, allowing similar growth conditions for both species, has a gradient of initial spacings ranging from 640 to about 12 000 stems /ha (0.91 m to 4.02 m). The plot had 68 radial spokes and

17 circles, representing 16 different initial spacings. Dead trees or trees with defects such as forks were removed from the sample. Outer guard trees in rows 17 were also included in the sample for analysis in this study. No silvicultural treatment was performed on this site. After cutting the trees, they were topped at 7 cm diameter.

6.4.2 Data preparation for volume-based sawing simulations

The sawing simulator software Optitek of FPInnovations was used for all simulations. A typical sawmill equipped with modern curve sawing technology was used in the Optitek software. The first series of sawing simulations, aimed at maximizing lumber volume production only, represented the base case for current sawmill processes in eastern Canada. Each stem was scanned using FPInnovations' Comact true shape laser scanner to obtain the external 3D form. A measure was done at every 5-cm interval along the stem. Information from the 3D scan data provides an accurate representation of a stem with deformations and can be directly used in the Optitek software to perform the sawing simulations.

6.4.3 Data preparation for knot-based sawing simulations

Simulation was done on the same stems previously used in the volume-based simulations, but including, this time, the knot information from the X-ray Computed Tomography images. The x-ray scans were performed every 2 mm along the logs with a Siemens Somatom Sensation CT scanner, to get as much information on internal knots as possible. To proceed with the x-ray scanning, it was necessary to cut the stems into 8 foot long logs which were joined afterwards by the software to rebuild the entire stem. This part was done in "CT2Opti" software developed by ForValueNet in collaboration with FPInnovations (Vallerand *et al.* 2011), described below. The reconstruction was possible by selecting 2 points (f.ex. the pith and a knot) on the last and the first sections of a log contained in a stem. Only 3 cm separated two consecutive logs on a stem, so the images were similar and the software was able to reconnect the logs in the right alignment with the correct spacing.

Knot extraction and filtering with CT2Opti

Once scanned, each 2.5 m long log produced a consecutive series of approximately 2500 CT-images (with some overlapping to maximize knot detection). These images, containing only tones of gray, black and white, could not be used directly with the Optitek software. It was therefore necessary to create a software, "CT2Opti", to detect and extract the stem, pith and knot shapes from the CT-scan images, and reconstruct the sawlogs with internal knots (see figure 6.1). CT2Opti is an image processing software developed to extract the knots from a sequence of CT-images. It uses a combination of basic morphology, threshold and edge detector functions, as well as some custom-made image processing functions developed for specific behavior. The software achieves this goal in three steps.

First, candidate sections identified as potential knot sections are extracted from each image. At this level, a significant portion of those candidates are not real knot sections. Those false candidates are mostly part of humidity pockets which are very

similar to knots in terms of density value. In the present study, CT2Opti succeeded to detect around 98% of the real knot sections (98.8% for white spruce, 97.8% for jack pine).

In a second step, CT2Opti regroups detected candidate sections in 3D objects by connecting adjacent sections with similar characteristics. Those 3D objects are potential knots. Finally, CT2Opti needs to sort out the real knots from all those unwanted objects identified as potential knots. A set of rules is applied to filter the unwanted objects. First, objects too small or too big to be considered as a knot are eliminated. Then, the remaining objects are compared to a knot model. In this relatively simple model, a knot is an object which first appears near the pith point and, then, moves radially until it reaches the outside of the log. In order to use this simple model, the external shape and the position of the pith point must be extracted from the image sequence. This is easily done by combining image processing functions.

By applying this set of rules, more than 80% of the detected knots are located and exported to an output Optitek log (88.2% for white spruce, 82.1 for jack pine). At this time, it is crucial that no unwanted object is exported. Further validations show that the missing knots are mainly small knots with no or really low influence on lumber grade. All in all, we have a strong confidence that the Optitek logs represent correctly the harvested one.

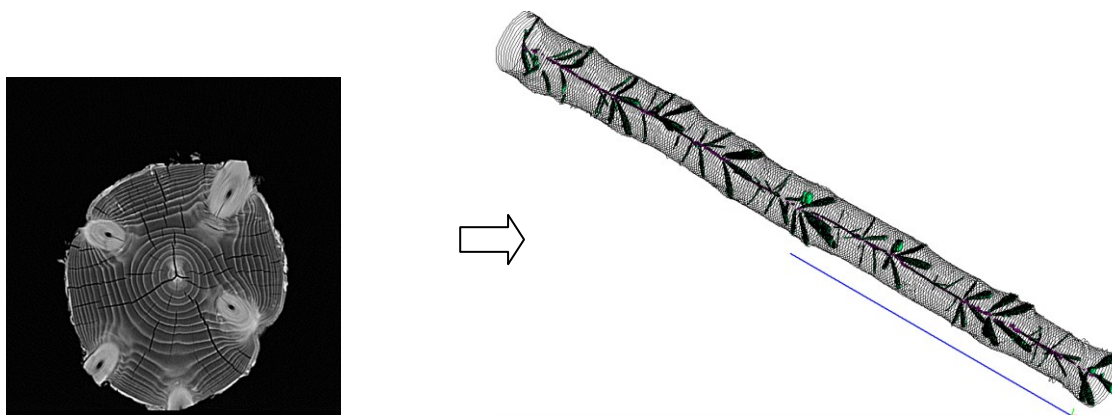


Figure 6.54: Example of knot extraction from CT images created with the CT2Opti software.

6.4.4 Sawing simulations based on knots

With Optitek, it is possible to simulate sawing the log with or without their knots using any type of sawmill. For the sawing simulation with knots, each equipment considers the position of the knots for the optimization, from the slasher at the beginning to the trimmer, the last sawing operation in the mill. All possibilities are considered in order to extract the maximum stem value. Obviously, the higher the optimization level is, the longer the simulation process will be.

For the first simulation without knots (i.e. considering external shape only), the log positioning was “sweep up”, meaning that the log maximum deflection or deformation were placed in the vertical axis. This positioning is used in the sawmill industry to

extract the maximum lumber volume. It is important to note that some trees from the sampling, especially jack pine, had severe crooks and sweeps. When sawing these logs, even with the "sweep up" position, the maximum volume will not always be obtained. The combination of several crooks in a stem affects the extraction of the lumber volume.

For the second sawing simulation with knots, log positioning was sweep up to start, then rotations of 24 degrees each (15 rotations) were done to maximize lumber value recovery. After completing all possible rotations, the Optitek software kept the optimal solution generating the highest lumber value. Sweep up position did not always give the highest lumber volume. Rotations of 12 degrees each (30 rotations) was added to make sure that the best solution (or maximum value) was attained. An intermediate sawing simulation was also done considering only the shape of the log in order to optimize the rotation position. In clear, each log was rotated from 0 to 360 degrees, either with increments of 12 or 24 degrees, without the knot information and the position with the highest lumber value. With this simulation, Optitek tries to reduce as much as possible the waste on lumber pieces. It is possible that lumber volume recoveries could be reduced because of that. After that, the knots were put back into the lumber to get the real grade and value of the pieces produced. The lumber price list used in Optitek for the optimization comes from Pribec 2011. For the lumber grading, Optitek uses the NLGA rules (NLGA 2010). It is important to note that the results obtained in this study were based on a relatively small sample of a Nelder plot plantation.

6.4.5 Statistical analysis

The data were treated with the logarithm transformation to assure normality. A split-plot Anova model was used to compare the lumber volume and the lumber value between species (white spruce and jack pine). The factor operating in the main-plot of the model was the species, between the three levels of optimization (sweep, shape or knot) and also two level of rotation (12 or 24 degrees) applied on each log, the factors operating in the sub-plot of the model. For the aggregated lumber grade, No. 2 & better, a logistic regression model test was performed. The significant level was fixed at 95%.

6.5 Results

Table 6.1 presents a summary of the data taken on the 32 years old sample trees (53). The average scanned length of the jack pine (10.3 m) was higher than that of white spruce (6.9 m). Taper for white spruce was on average 1.2 cm/m and for jack pine 0.6 cm/m. Sweep for white spruce was on average 0.5 cm/m and for jack pine 1.0 cm/m. On average, the stem merchantable volume of jack pine was higher than that of white spruce (99.4 dm³ for white spruce and 174.5 dm³ for jack pine). The average DBH was 16.2 cm for white spruce and 18.1 for jack pine. The stem merchantable volume is the volume under the bark comprised between the diameter at stump height and a top diameter of 9 cm.

Table 6.10. Summary data taken on the 53 stems

Species		Scanned length (m)	DBH (cm)	Taper (cm/m)	Sweep (cm/m)	Merchantable volume (dm ³)
White Spruce	avg	6.9	16.2	1.2	0.5	99.4
	st. Dev.	2.1	3.9	0.3	0.2	59.9
	max.	10.5	25.3	2.0	1.4	270.7
	min.	2.5	9.6	0.6	0.2	11.3
Jack pine	avg	10.3	18.1	0.6	1.0	174.5
	st. Dev.	1.6	4.2	0.2	0.3	85.3
	max.	13.0	27.7	1.6	2.0	357.2
	min.	5.3	10.8	0.3	0.5	27.2

Table 6.2 presents the results of the sawing simulation results with and without knots. First, lumber volume and lumber value were superior with knot optimization, but there is no significant difference in the results between the two rotations (12 or 24 degrees). The increase of lumber value with knot optimization (between sweep up and knot optimization - 24 degrees) was 9.5% for white spruce and 15.1% for jack pine. There is also an increase of lumber value between shape-based optimization and knot-based optimization but it is less than for the sweep up optimization. The statistical results will be presented later. Jack pine being a species with a tendency to produce wider knots, could explain such a difference. When knots are considered in the sawing simulation, the lumber volume recovered is significantly higher for jack pine (11.4%) and white spruce (7.7%) (between sweep up and knot optimization at 24 degrees). These results are interesting because, at the beginning of the study, we hypothesized that the knot optimization would possibly produce more value but less volume, which is not the case here.

Log rotation gives the possibility of finding the best solution for lumber volume rather than lumber value. Concerning the difference between shape-based optimization and knot-based optimization, it is important to understand that Optitek aims at maximizing the value and not necessarily the volume. When the shape-based sawing optimization was done, the knots were not considered, they were introduced in the simulation process afterward (for the knot-based optimization). This is why it is possible that the first simulation without knots gives higher volume. Indeed, when only the lumber shape is used, Optitek tries to obtain the best lumber grade and the highest value (i.e. maximize value rather than volume). For example, a piece of lumber of 3.6 m (12 feet) graded No. 3 according to NLGA could be trimmed to 2.5 m (8 feet) to reduce wane and get a No.1 grade. After this shape-based simulation, the knots were put into this lumber piece. By doing so, it is possible that the 2.5 m long piece initially graded as No. 1, got finally downgraded No.3 because of large knots, inducing some value losses. The architecture of the simulation software requires to follow the described sequences of operations.

Table 6.11. Result from simulation with and without knots

Species	Rotation degrees	Optimization	Lumber volume	Lumber value
			(dm ³)	(\$)
White spruce	24	Sweep up	1389,8	253,4
	24	Shape optimized	1521,7	274,0
	24	Knots optimized	1496,5	277,4
	12	Sweep up	1389,8	253,4
	12	Shape optimized	1511,5	277,0
	12	Knots optimized	1575,6	291,6
Jack pine	24	Sweep up	1549,7	268,6
	24	Shape optimized	1760,5	306,7
	24	Knots optimized	1726,4	309,3
	12	Sweep up	1549,7	268,6
	12	Shape optimized	1731,0	304,1
	12	Knots optimized	1837,8	330,4

Table 6.3 shows that lumber value was significantly greater when knots are considered in the sawing optimization ($p < 0.0001$). There is an interaction between optimization (sweep up, shape optimization or knots optimization) and species ($p < 0.0001$). The lumber values for white spruce and jack pine were higher with knot optimization no matter what the rotation degree was. Table 6.3 also presents the statistical analysis carried out on the sawing simulation results with and without knots. The Cook distance test showed that three data elements were far away from the others. These data elements were removed from the statistical analysis to get a better fit, but even when they were kept in, the conclusions stayed the same. In table 3 the term optimization refers to the sweep up, shape optimization or knot optimization. The term degree refers to simulation at 12 or 24 degrees.

Table 6.12. The effect of knot optimization on sawing simulation for lumber value (\$) (split-split ANOVA)

Effect	F Value	Pr>F
Species	2.77	0.1024
Optimization	77.05	<.0001
Species*Optimization	13.80	<.0001
degree	0.00	0.9682
Species*degree	0.25	0.6201
Optimization*degree	0.02	0.9805
Species*Optimization*degree	0.35	0.7042

Table 6.4 presents the contrast results for the lumber value for the interaction in table 3.

Table 6.13. Contrast analysis the sawing optimization for lumber value (\$)

Contrasts		
Label	F Value	Pr>F
(knots vs shape)*species	8.90	0.0031
(knots vs sweep up)*species	27.41	<.0001
(shape vs sweep)*species	5.05	0.0255

For jack pine and white spruce, the result are significant at the 95% level, and follow the same pattern for lumber value (\$):

(Sweep up) value < (shape) value < (knot) value

Thus, the highest lumber value is always obtained when the spatial distribution of knots is considered in the sawing simulation. Thereafter, there is some gain to consider the shape of the log and finally, the sweep up position always gives the lowest lumber value.

Table 6.5 presents the results of the sawing simulation but this time for the lumber volume. As for the lumber value, there is a significant interaction between species and optimization but the effect of the rotation degree was not significant for lumber volume.

Table 6.14. The effect of knot optimization on sawing simulation for lumber volume (split-plot ANOVA)

Effect	F Value	Pr>F
Species	3.38	0.0718
Optimization	54.73	<.0001
Species*Optimization	9.16	0.0001
degree	0.25	0.6194
Species*degree	0.10	0.7510
Optimization*degree	0.31	0.7314
Species*Optimization*degree	0.18	0.8390

Table 6.6 presents the contrast results for the lumber volume for the interaction in table 6.5.

Table 6.15. Contrast analysis of the sawing optimization for lumber volume

Contrasts		
Label	F Value	Pr>F
(knots vs shape)*species	7.05	0.0085
(knots vs sweep up)*species	17.93	<.0001
(shape vs sweep)*species	2.48	0.1165

This time there is some difference between jack pine and white spruce (table 6.6). For jack pine, the result for lumber volume is significant (at the 95% confidence level) as follows:

(Sweep up) volume < (shape) volume < (knot) volume

For jack pine there is always a significant difference between the different optimizations done. The highest volume was always obtained with the knot-based optimization.

(Sweep up) volume < (shape) volume = (knot) volume

For white spruce (at 95% confidence level), there is no significant difference between knot-based and shape-based optimizations. However, the sawing optimization based on sweep up position gives a significant lower lumber volume.

With these previous results, it is difficult to determine if the increase in lumber value is due to the increase in volume, the increase in lumber quality or both. Table 6.7 shows the simulated grades produced for jack pine and white spruce with and without knot information. For jack pine, the simulation when logs were rotated at every 24 degree without knots information, gave 84 pieces of No. 2&better (sweep up) as opposed to 118 when the knot information was considered. This great difference is statistically significant. For white spruce, the simulation at 24 degrees without knot information gave significantly less No. 2&better (100 pieces) compared to the simulation including knots information (115 pieces). For both species, information on knots significantly improved simulated lumber grade yields.

Table 6.16. Lumber grades obtained from sawing simulation with and without knots

Species	Rotation degrees	Pieces	Pieces	Pieces	
		(grade 2&better)	Grade (#3)	Grade (economy)	
White spruce	Sweep up	24	100	6	4
	Shape optimized	24	110	6	1
	Knots optimized	24	115	3	1
	Sweep up	12	100	6	4
	Shape optimized	12	106	6	0
	Knots optimized	12	115	3	1
Jack pine	Sweep up	24	84	20	13
	Shape optimized	24	98	18	11
	Knots optimized	24	118	13	6
	Sweep up	12	84	20	13
	Shape optimized	12	90	24	10
	Knots optimized	12	116	15	6

Table 6.8 shows the statistical analysis on the grade. First, there is no statistical difference between 12 and 24 degrees rotations. Here, for both species, knots optimization always gives more No. 2&better pieces grades than for sweep up or shape optimization. This shows the importance of considering knots to optimize log primary breakdown. We also expect that the proportion of Machine Stress Rated (MSR) grade lumber will increase with knot-based optimization simply because more No.2 & better pieces were obtained. (To qualify for MSR grade, lumber should first be visually graded as No. 2&better, SPS-97). The more MSR pieces are produced, the more lumber value you will get. This potential additional benefit was not considered in the analysis of lumber value.

Table 6.17. Pearson Chi-Square Test for No.2&better grade (logistic regression Pearson Chi-Square Test)

Source	Chi-square	Pr>Chisq
Species	82.10	<.0001
Optimization	16.96	0.0002
Species*Optimization	0.70	0.7051
Degree	0.06	0.7989
Species*Degree	0.15	0.6940
Optimization*Degree	0.20	0.9063

It is important to mention that the logs used in these simulation come from a rather young plantation (32 years old) and very particular in stand density distribution. Indeed the stand density had a large variation and with 12 000 trees/ha, the trees were small and the optimization difficult. If it is possible to produce one 2x3 in a stem then whatever the knot position, the result will probably be the same, because it would not possible to avoid the knots in that piece of lumber. For white spruce,

the stem volume and stem length were significantly lower than that of jack pine, which may explain the lower lumber volume obtained. If the stems are shorter and smaller, the possibility to optimize lumber primary breakdown to avoid the adverse effects of knots on lumber grade recovery and value is much more limited. Hence, the value gains generated from the knot-based sawing optimization in this young plantation could be even greater in older forests with larger piece size trees.

The CT-scan technology presents good opportunities for sawing optimization and thus better forest resource utilization. It shows substantial gains in terms of value and most likely in terms of MSR grade potential since the knot-based sawing optimization increased the proportion of No. 2 & better. It is also possible to increase lumber volume, only with a good shape optimization at the log turner. Indeed, between sweep up position and shape optimization (every 24 degrees) there is an increase of lumber volume of 9.5% for white spruce and 13.6% for jack pine.

The software CT2Opti allows to adequately extracting knot and external shape of stems in a research context. The results have shown the importance of a good and stable log turner. If it is not possible to turn the log in the right alignment and maintain it in this correct position for the sawing, the lumber yield will not always be maximized. The results suggest that if we optimize only the log position for sawing, some gains are possible.

6.6 Conclusion

The aim of the study was to determine the impact and potential gain of knowing the spatial distribution of the knots contained in a log on the sawing process. Optitek simulation results have shown that taking into account the spatial knot distribution prior to sawing has a significant impact on lumber value. Therefore if or when implementing the CT-scan technology becomes economically viable, the spatial knot distribution should be consider in the sawing strategy. The knot-based sawing simulations generated both greater lumber volume and greater lumber value in this study. The increase in lumber value ranged between 9.5% and 15.1% for white spruce and 15.2% and 23.0% for jack pine. Both jack pine and white spruce logs produced significantly more No. 2 & better pieces when knots were considered. The white spruce and jack pine stems produced 15% and 40.5% more No.2 & better pieces, respectively. Combining CT-Scan information, CT2Opti knot extraction, to Optitek sawing simulations appears to be a very promising approach to extract more value from our trees and increase the competitiveness of our sawmilling industry.

Conclusion

Cette thèse de doctorat a permis de mettre en évidence l'impact de la densité de peuplement sur les caractéristiques des arbres et des sciages de pin gris et d'épinette blanche sur différents facteurs. Comme dans les études antérieures, il est possible d'observer l'importance de la densité de peuplement sur la forme des arbres. On a détecté des différences statistiques entre le pin gris et l'épinette blanche pour des facteurs tels que le défilement et la courbure. L'essence joue un rôle primordial dans l'obtention de certaines caractéristiques chez les arbres. Cependant l'essence jumelée aux conditions de croissance, telle que la densité de peuplement, donne parfois lieu à des impacts différents. Tous les résultats démontrent que la croissance des arbres est fortement influencée par la densité de peuplement. En effet, le DHP, la hauteur totale, le défilement, la longueur et la largeur de la cime vivante, le diamètre des cinq plus grosses branches mortes et vivantes ont généralement augmenté avec l'augmentation de la distance entre les arbres, autant chez le pin gris que chez l'épinette blanche.

Il est intéressant d'observer que des essences dans des conditions semblables de croissance ne sont pas affectées de la même façon. En effet, on a détecté des différences statistiques entre le pin gris et l'épinette blanche pour le défilement, le volume des tiges, la largeur de la cime vivante, etc. L'essence joue un rôle important dans l'obtention de certaines caractéristiques chez les arbres. Dans cette étude, il y a eu des interactions pour la largeur de la cime vivante, la longueur totale des tiges et des 5 plus grosses branches mortes.

La méthode pour calculer la courbure semble importante pour l'analyse des données. Afin d'être en mesure de quantifier les nombreuses déviations chez l'arbre pour ensuite en dégager un comportement, il faut pouvoir percevoir chacune d'entre elles. L'estimation de la courbure par le calcul de la flèche maximale, permet d'exprimer, de façon générale, le comportement de la courbure. Cependant, elle ne permet pas autant de précision que la méthode de calcul à l'aide de la longueur des vecteurs. Dans le cas des travaux réalisés, la méthode de calcul de la courbure à l'aide des vecteurs a démontré une interaction entre les essences et la densité de peuplement. En d'autres mots, le comportement de la courbure en fonction de la densité de peuplement diffère entre les deux essences étudiées. La méthode de calcul basée sur la longueur des vecteurs permet de démontrer que la courbure du pin gris est plus accentuée et plus sensible aux faibles densités de peuplement que l'épinette blanche. De plus, l'augmentation ou la diminution de la courbure chez le pin gris n'est pas constante selon la densité de peuplement. En effet, il y a un changement dans la pente sous les 1600 tiges à l'hectare où l'on constate une importante augmentation de la courbure. Pour l'épinette blanche, il n'y a pas de différence statistique dans la pente ce qui suggère que la courbure augmente de façon constante avec la diminution de la densité de peuplement. Ces résultats suggèrent que la nouvelle méthode de calcul, à l'aide des longueurs de vecteurs, permet de mieux diagnostiquer l'impact de la densité de peuplement sur la courbure des arbres. Afin d'éviter d'obtenir des arbres ayant trop de déviations dans les plantations de pin gris, notre méthode suggère de ne pas reboiser sous le seuil de 1600 tiges à

l'hectare (ou espacement de 2.5 m), ce que la méthode de la flèche maximale ne permet pas de détecter. Il aurait été intéressant d'effectuer un plus grand échantillonnage pour vérifier si un point de cassure pourrait apparaître pour l'épinette blanche dans d'autres dispositifs.

Pour calculer la somme des vecteurs entre toutes les coordonnées, la méthode employée a utilisé des vecteurs droits. Il est raisonnable de croire que cette méthode tend à sous-estimer légèrement la longueur totale des vecteurs. Plus les coordonnées entre les vecteurs sont rapprochées, plus la longueur totale se rapproche de la réalité. Il serait intéressant également d'intégrer cette méthode ou une combinaison de méthodes pour effectuer la modélisation de la courbure dans les peuplements forestiers.

Les simulations effectuées avec le logiciel Optitek ont permis de mettre en évidence les différences entre le pin gris et l'épinette blanche. Les résultats montrent que la forme de la tige affecte grandement le rendement en volume de sciage. En effet, le volume de sciage de l'épinette blanche et du pin gris virtuels (tiges droites et sans défauts) était évidemment plus élevé que celui des tiges réelles, en raison de leurs déformations. Le pin gris était significativement plus touché par les déformations que l'épinette blanche. La diminution du volume de sciage entre les tiges virtuelles et réelles était de 45,1% pour le pin gris et de 13,1% pour l'épinette blanche. Cette différence de volume de sciage entre les tiges réelles et virtuelles est statistiquement significative pour les deux espèces. Comme prévu, le volume de sciage produit par les tiges réelles était linéairement corrélé à celui des tiges virtuelles.

La technologie CT-scan présente de bonnes opportunités pour l'optimisation de sciage et donc une meilleure utilisation des ressources forestières. Elle montre des gains substantiels en termes de valeur et très probablement en termes de potentiel MSR, puisque l'optimisation de sciage basé sur les nœuds a augmenté significativement la proportion des pièces de grade No.2 et meilleur. Afin d'être en mesure d'utiliser l'information sur la distribution spatiale des nœuds provenant des images CT dans Optitek, un nouveau logiciel a dû être développé. Un des défis majeurs est d'arriver à complètement automatiser la détection des nœuds, du bois de compression ou de la déviation du fil et de l'humidité élevée (poches humides) à une vitesse raisonnable pour l'industrie. Lorsque ces matières ont toutes les mêmes intensités de gris, il est difficile de les départager. CT2Opti permet de bien faire cette extraction (les nœuds et la forme externe) dans un contexte de recherche. Pour extraire la valeur maximale d'une tige de résineux avec l'information des défauts internes, il est important d'avoir un positionneur de billes offrant peu d'erreur sur l'angle de la rotation au moment d'effectuer le débitage primaire. S'il n'est pas possible de retourner la bille et de la maintenir dans le parfait alignement pour le sciage, le gain ne sera pas optimal.

Il a également été possible de déterminer l'impact et le gain potentiel de connaître la distribution spatiale des nœuds sur le processus de sciage. Les résultats des simulations ont montrés que les nœuds ont eu un impact sur la valeur des pièces

produites. Par conséquent, il peut être définitivement intéressant de les utiliser dans la stratégie de sciage. En effet, le pin gris et l'épinette blanche ont produit significativement plus de pièces de qualité n°2 et meilleur, lorsque les nœuds ont été pris en considération. En effet, pour l'épinette blanche la quantité de pièces No.2 et meilleur a augmenté de 15%, alors que pour le pin gris l'augmentation a été de 40,5% lorsque les nœuds sont considérés. Les simulations de sciage prenant en compte l'emplacement des nœuds ont également produits à la fois un plus grand volume de bois d'œuvre, de même qu'une plus grande valeur. L'augmentation de la valeur des sciages se situe entre 9,5% et 15,1% pour l'épinette blanche et entre 15,2% et 23,0% pour le pin gris. Les simulations produites ont mis en évidence l'impact du positionnement avant le sciage. Des simulations ont été réalisées en effectuant des rotations à tous les 12 degrés. Ceci a permis de démontrer que la position "sweep up" n'est pas toujours la meilleure pour extraire le plus de volume de sciage dans les billes. En effet, les résultats ont démontré que si nous optimisons seulement la position des billes en fonction de leur forme, des gains substantiels sur le sciage sont obtenus. Dans un contexte où la forêt est fortement sollicitée, il est important d'utiliser la ressource adéquatement afin que les générations futures puissent également en bénéficier.

Bibliographie

- Affect, D., 2001. A comparative study of spatial analysis methods for forestry Nelder experiments. Masters thesis, University of British Columbia.
- Albrektson, A. 1980. Biomass of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Amount development methods of mensuration. Department of Silviculture, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Report 2. 189 p. (In Swedish, with English summary.) ISBN 9157603383.
- Alemdag, I.S. 1991. National site index and height growth curves for white spruce growing in natural stand in Canada, *Can.J.Res.*21:1466-1474.
- Axelsson, B. 1984. Increasing forest productivity and value by manipulating nutrient availability. In: *Forest potentials: productivity and value*. Weyerhaeuser Science Symposium, Tacoma, 4. p. 5–38.
- Bacon, D.W. Watts, D.G. 1971. Estimating the transition between two intersecting straight lines. *Biometrika*, 58(3):525-534.
- Ballard, L.A. Long, J.N. 1988. Influence of stand density on log quality of lodgepole pine. *Can. J. For. Res.* 18(7):911-916.
- Beaulieu, J. et Corriveau, A. 1985. Variabilité de la densité du bois et de la production des provenances d'épinette blanches, 20 ans après plantation, *Revue Canadienne de recherche forestière*, vol. 15, p. 833-838.
- Beaulieu, J., Corriveau, A., Mothe, F., Poliquin, J., Doucet, J., 1990. Densité et largeur des cernes des populations d'épinettes blanches de la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent. *Can. J. For. Res.* 20, 121-129.
- Beaulieu, J. 1996. Programme et stratégie d'amélioration génétique de l'épinette blanche au Québec, Sainte-Foy, Québec, Canada, Ressource Naturelle, Centre de foresterie des Laurentides, 25 p.
- Beaulieu, J. Zhang, S.Y. Yu, Q. Rainville, A. 2007. Genetic variation in white spruce veneer quality, *Wood and fiber science*, vol 38, n°3, p. 553-564.
- Bédard, P. 2001. Lignes directrice pour adapter le procédé de sciage à la ressource ligneuse et au marché, Rapport projet 2427, Forintek Canada Corp.
- Belley, D. Beaudoin, M. Duchesne, I. Vallerand, S. Tong, Q.J. Swift, D.E. 2013 Assessment of white spruce and jack pine stem curvature from a Nelder spacing experiment. *Wood Fiber Sci.* 45:237-249.
- Belley, D. Duchesne, I. Beaudoin, M. and Swift, D.E (submitted, 2014) The effect of stand density on tree and lumber characteristics of white spruce and jack pine 32 years post-establishment.
- Bergh, J. McMurtrie, R.E. Linder, S. 1998. Climatic factors controlling the productivity of Norway spruce: a model-based analysis. *Forest Ecology and Management* 110: 127–139.
- Bhandarkar, S. M. Faust, T.D. Tang, M. 1999. Catalog : a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography. *Machine Vision and Applications* 11 : 171-190.

Biblis, E.J. Carino, H. Brinker, R. McKee, C.W. 1995. Effect of stand density on flexural properties of lumber from two 35-year-old loblolly pine plantations. *Wood Fiber Sci.* 27(1), 25-33.

Biblis, E.J. Carino, H. Brinker, R. 1997. Flexural properties of lumber from two 40-year-old loblolly pine plantations with different stand densities. *Wood Fiber Sci.* 29(4), 375-380.

Birk, E.M. 1991. Stem and branch form of 20-year-old radiata pine in relation to previous land use. *Australian Forestry* 54(1-2):30-39.

Bodig, J. Jayne, B.A. 1982. *Mechanics of wood composites*. Van Nostrand Reinhold co. Toronto, Canada. 712 pp.

Bolghari, H.A. Bertrand, V. 1984. Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec. Min. Énergie Ressource, Mémoire recherche, for. N° 79.

Briggs, D.G. Smith, W. R. 1986. Effects of silvicultural practices on wood properties of conifers : a Review, *Wood properties of conifers*.

Brix, H. 1971. Effects of nitrogen fertilization on photosynthesis and respiration in Douglas-fir. *Forest Science* 17: 407–414.

Bucur, V. 2003. *Nondestructive characterization imaging of wood*. Springer serie in wood science. 354 p.

Campbell, R.K. 1965. Phenotypic variation and repeatability of stem sinuosity in Douglas-fir. *Northwest Sci.* 39:47-59.

Clark III A.C., Souter R.A. Schlaegel, B.E. 1991. Stem profile equations for southern tree species. USDA For. Serv. South. Res. Pap. SE-282. Asheville, NC.

Clark, A. Saucier, J.R. Baldwin, V.C. Bower, D.R. 1994. Effect of initial spacing and thinning on lumber grade, yield, and strength of loblolly pine. *For. Prod. J.* 44, 14-20.

Corriveau, A. Beaulieu, J. et Mothe, F. 1987. Wood density of natural white spruce populations in quebec, *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 17, p. 675-682.

Corriveau, A. Beaulieu, J. Mothe, F., Poliquin, J. et Doucet, J. 1990. Densité et largeur des cernes des populations d'épinettes blanches de la région forestière des grands Lacs du Saint-Laurent, *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 20, p. 121-129.

Corriveau, A. Beaulieu, J. Daoust G. 1991. Heritability and genetic correlations of wood characters of upper Ottawa Valley white spruce (*Picea glauca*) population grown in Québec, *The forestry Chronicle*, vol. 67, n°6, p.v698-705.

Dobie, J. Middleton, G.R. 1980. Lumber yields from sweepy lodgepole pine. *For Chron* 56(2): 66-67.

Duchesne, I. Swift, E. 2008. Impact of intensive silviculture on wood product quality and value in a jack Pine –long-term of late commercial thinning at wide spacing-. General report Project n° 5767.

Duchesne, I. Tanguay, F. 2010. Long-term impact of precommercial thinning on wood product quality and value in Balsam Fir (the Green River case study), General report Project n° 201000576.

Duchesne, I. Tanguay, F. 2011. Effects of initial spacing on tree and wood attributes on lumber quality and value in white spruce - The Stanley spacing trial case study. FPInnovations Report.

Fahey, T.D. J.M. Cahill, T.A. Snellgrove L. Heath. 1991. Lumber and veneer recovery from intensively managed young-growth douglas-fir. USDA Forest Service Research paper PNW-RP-437. 26 pp.

Fudaka, E. Yasuda, S. Kohara, J. Okamoto, H. 1956. Dynamic Young's modulus and piezoelectric constant of old timber. Bull Kabayasi Inst Phys Res 6:104-107.

Funt, B.V. Bryant, E. C. 1987. Detection of internal logs defects by automatic interpretation of computer tomography. Forest Products Journal 37(1) : 56-62.

Gray, H.R. 1956. The form and taper of forest-tree stems. Imperial Forest Institute. Oxford, UK. Paper 32.

Guddanti, S. et Chang, S.J. 1998. Replicating sawmill sawing with top saw using CT images of full-length hardwood log. Forest Products Journal, 48 (1) : 72-75.

Harless, T.E.G. Wagner, F.G. Steele, P.H. Taylor, F.W. Yadama, V. McMillin, C.W. 1991. Methodology for locating defects within hardwood logs and determining their impact on lumber-value yield. *Forest Products Journal*, 41(4), 25-30.

Hearmon, R.F.S. 1948. The elasticity of wood and plywood. Dept Sci Ind Res For Prod Res Spec Report no. 7. HMSO, London, 87 p.

Ivkovic, M. Wu1, H.X. Spencer, D.J. McRae, T.A. 2007. Modelling the effects of stem sweep, branch size and wood stiffness of radiata pine on structural timber production. *Australian Forestry*. 70(3):173-184.

Jayne, B.A. 1955. A non destructive test of glue bond quality. *Forest Product Journal* 5 5:294-301.

James, W.L. 1959. A method for rapid measurement of the rate of the rate of decay of free vibrations. USDA, FPL Bull no 2154, USDA, Madison, WI

Janas, P.S. Brand, D.G. 1988. Comparative growth and development of planted and natural stands of jack pine. *For. Chron.* 64:320-328.

Jessome, A.P. 1995. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada, Publication SP-514F, Forintek Canada Corp.

Johansson, K. 1992. Effects of initial spacing on the stem branch properties and graded quality of *picea abies* (L.) Karst. *Scandinavian Journal of forest research* (7) : 503-514.

Jozsa, L.A. Middleton, G.R. 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois : nature et conséquences pratiques. Forintek Canada Corp. Pub. spéciale SP-34F. 42 p.

Kang, K.Y. Zhang, S.Y. Mansfield, S. 2004. The effect of initial spacing on wood density, fibre, and pulp properties in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.), *Holzforschung*, vol. 58, p. 455-463.

Kellomaki, S. Tuimala, A. 1981. Effect of stand density on branchiness of young Scots pines. *Folia For.*, 478 : 1-27.

- Kollman, F.F.P. Krech, M. 1960. Dynamic measurement of wood elastic properties and damping. *Holz Roh Werkst.* 18 2:41-45.
- Kozak, A. 2004. My last words on taper equations. *For. Chron.* 80: 507-514.
- Krause, C. Plourde, P.Y. 2008. Stem deformation in young plantations of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) in the boreal forest of Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management.* 255(7):2213-2224.
- Larson, P.R. 1963. Stem form development of forest trees. *For. Sci. Monogr.* 5. 42 p.
- Lemieux, H. 2002, L'amélioration potentielle des sciages d'épinette noire en tenant compte des nœuds, thèse de doctorat Université Laval, Québec, Canada, 156 pages.
- Lenz, P. Bernier-Cardou, M. MacKay, J. Beaulieu, J. 2012. Can wood properties be predicted from the morphological traits of a tree? A canonical correlation study of plantation-grown white spruce. *Can. J. For. Res.* 42, 1518-1529.
- Linder, S. Axelsson, B. 1982. Changes in carbon uptake and allocation patterns as a result of irrigation and fertilization in a young *Pinus sylvestris* stand. In: Waring, R.H. (ed.). *Ecology of subalpine zones.* Oregon State University, Corvallis. p. 38-44.
- Longuetaud, F. 2005. Détection et analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'épicéa commun (*Picea abies*) par tomographie à rayons X. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Champenoux, France, 118 pages.
- Loup, C. 1990. Le développement architectural du pin maritime. Mécanique de l'arbre. LMGC, University of Montpellier II, Montpellier. 34-54.
- Magnussen, S. Yeatman, C.W. 1987. Early testing of jack pine, 1. Phenotypic response to spacing, *Revue canadienne de recherche forestière*, vol 17, n°6, p. 453-459.
- Mark, W.B. 1983. Spacing trials using the Nelder wheel, in: Standiford R.B., Ledig F.T. (Eds.) *Proceedings of a work shop on Eucalyptus in California.* USDA For. Serv., Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, CA, Gen. Tech. Rep., PSW-69, pp 81-86.
- Moberg, L. 1999, Variation in knot size of *Pinus Sylvestris* in two spacing trials, *Silva Fennica* 33(2) : 131-144.
- Moberg, L. 2001. Models of internal knot properties for *Piceaabies* . *Forest Ecology and Management* , 147, 123 138.
- Monserud, R.A. Parry, D.L. Todoroki, C.L. 2004. Recovery from simulated sawn logs with sweep. *New Zealand J. of Forestry Sci.* 34(2) : 190-205.
- Muhairwe, C.K. 1994. Tree form and taper variation over time for interior lodgepole pine. *Can. J. For. Res.* 24:1904-1913.
- MRN. 2013. <https://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/classif-tiges-essence-feuillues-6.pdf>. Classification des tiges d'essences feuillues, Ministère des Ressources Naturelles, Secteur des Forêts, 108 p.

MRNFP. 2003. Gouv. Du Québec. Ressource et industrie forestières. Portrait statistique. Edition électronique. Canada, Québec. 230 p.

Nelder J.A. 1962. New kinds of systematic designs for spacing experiments. *Biometrics* 18(3):283-307.

Nordmark, U. 2002. Knot identification from CT images of young *Pinus sylvestris* saw logs using artificial neural networks. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17 :72-78.

Oja, J. 1999. X-ray measurements of properties of sawlog. Thèse de doctorat, Division de technologie du bois, Lulea University of Technology, Skelleftea, 32 pp.

Oyen, O. Hoibo, O.A. Vestol, G. 1999. Modeling the yield of sound knot timber from Norway spruce. Prediction of sound knot cylinder on single tree level in old stands of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). Compte-rendu, IUFRO WP S5.01-04 Third workshop-Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software. France. 645 p.

Panshin, A.J. de Zeeuw, C. 1980. Textbook of Wood Technology. 4th edition. McGraw-Hill Book Co. New York.

Parrott, D.L. Brinks, J.S. Lhotka, J.M. 2012. Designing Nelder wheel plots for tree density experiments *New For.* 43, 245-254.

Petro, F.J. Calvert, W.W. 1976. How to grade hardwood logs for factory lumber. Forintek Canada Corp., Eastern Laboratory, Ottawa. 64 pp.

Pfister, O. Wallentin, C. Nilsson, U. Eko, P.M. 2007. Effect of wide spacing and thinning strategies on wood quality in Norway spruce stands in southern Sweden, *Scan. Jour. For. Res.* (22): 333-343

Pinto I (2004) Raw material characteristics of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) and their influence on simulated sawing yield, PhD thesis, Helsinki University of Technology.

Polge, H. Illy, G. 1967. Observations sur l'anisotropie du pin maritime des Landes. *Ann Sci For* 24(3):205-231.

Polge, H. 1978. Fifteen years of wood radiation densitometry. *Wood Sci Technol* 12:187-196.

Pribec. 2011. The yearbook, the directory of the lumber market indicator, data compiled by QFIC, Economic and Market Department.

Radi, M. Castera, P. 1992. Qualification de la forme de deux pins maritimes en liaison avec la structure de leur bois. *Ann Sci For* 49:185-200.

Radon, J. 1917. On determination of functions from their integrals along certain manifolds. *Ber Sach Akad Wiss* 29:262-277.

Rast, E.D. Sonderman, D.L. Gammon, G.L. 1973. A guide to hardwood log grading. USDA Forest Service General Technical Report NE-1, 32 p.

Raulier, F. Ung, C.-H. Ouellet, D. 1996. Influence of social status on crown geometry and volume increment in regular and irregular black spruce stands. *Can. J. For. Res.* 26, 1742-1753.

Rojas Espinoza, G. 2005. Détection des défauts internes dans les billes d'érable à sucre à l'aide d'un scanner à rayon X. Thèse de doctorat Université Laval, Québec, Canada, 93 pages.

- Rondeux, J. 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les Presses agronomiques de Gembloux, Belgique.
- Rycabel, T. 2007. Qualité et rendement en sciages selon les conditions de croissance des tiges d'épinette noire (*Picea mariana* MILL.), Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 167 p.
- Schmoldt, D.L. He, J. Abbot, A.L. 2000. Automated labeling of log feature in CT imagery of multiple hardwood species. Wood and Fiber Science 32(3) : 87-300.
- Seeram, E. 2001. Computed tomography physical principles, clinical applications and quality control. W.B. Saunders Company. Philadelphia, PA, U.S.A. ISBN 0-7216-8173-5. 423 p.
- Sharma, M. Zhang, S.Y. 2004. Variable exponent taper equation for jack pine, black spruce and balsam fir in eastern Canada. Forest Ecol. Manage. 198 :39-53.
- Sharma, M. Parton, J. 2009. Modeling stand density effects on taper for jack pine and black spruce plantations using dimensional analysis, Forest Science 55(3):268-282.
- Sierra-de-Grado, R. Moulia, B. Fournier, M. Alia, R. Diez-Barra, R. 1997. Genetic control of stem form in *Pinus pinaster* Ait. seedlings exposed to lateral light. Trees 11: 455-461.
- Spicer, R. Gartner, B.L. Darbyshire, R.L. 2000. Sinuous stem growth in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) plantation: growth patterns and wood-quality effects. Can. J. For. Res. 30:761-768.
- Stape, J.L. Binkley, D. 2010. Insights from full-rotation Nelder spacing trials with *Eucalyptus* in São Paulo, Brazil. South. For. 72(2), 91-98.
- Sjolte-Jorgensen, J. 1967. The influence of spacing on the growth and development of coniferous plantations. Int. Rev. For. Res. 2:43-94
- Taylor, F.W. Wagner, F.G., Jr, Mcmillin, C.W. 1984. Locating Knots by industrial tomography-A feasibility study. Forest Product Journal 34(5) :42-46.
- Thiffault, N. Roy, V. Prigent, G. Cyr, G. Jobidon, R. Ménétrier, J. 2003. La sylviculture des plantations résineuses au Québec. Le naturaliste Canadien, Vol.127, 63-80.
- Tong, Q.J. Zhang, S.Y. Thompson, M. 2005. Evaluation of growth response, stand value and financial return for precommercial thinned jack pine stands in northwest Ontario, Forest Ecology and Management, Vol. 209, n°3, p.225-235.
- Tong, Q.J. Zhang, S.Y. 2005. Impact of initial spacing and precommercial thinning on jack pine tree growth and stem quality. The Forestry Chronicle 81(3): 418-428.
- Tong, Q.J. Zhang, S.Y. 2008. A correction model for estimating jack pine tree-level lumber recovery accurately using forest inventory data. Forest Prod. J. 2008, 58(3):65-70.
- Tong, Q.J. Duchesne, I. Belley, D. Beaudoin, M. Swift, E.D. 2013. Characterization of knots in white spruce tree grown in a Nelder spacing wheel. Wood and fiber science. 45(1):1-14.

Ung, C.-H. Raulier, F. Ouellet, D. Dhôte, J.-F. 1997. L'indice de compétition interindividuelle de Schütz. *Can. J. For. Res.* 27, 521-526.

Vallerand, S. Belley, D. Duchesne, I. Beaudoin, M. 2011. Utilisation d'image CT pour la modélisation 3D de billes réelles avec caractéristiques internes. Note de recherche ForValueNet, <http://www.forvaluenet-foretvaleur.ca>.

Yanchuk, A.D. Kiss, G.K. 1993. Genetic variation in growth and wood specific gravity and its utility in the improvement of interior spruce in British-Columbia, *Silvae Genetica*, vol. 42, n°2-3, p. 141-148.

Ying, C.C. Morgenstern, E.K. 1979. Correlation of height growth and heretabilities at different ages in white spruce, *Silvae Genetica*, vol 28, n°5-6, p. 181-185.

Zakrzewski, W.T. 1999. A mathematically tractable stem profile model for jack pine in Ontario. *North. J. Appl. For.* 16: 138–143.

Zhang, S.Y. Chauret, G. 2001. Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (*Picea mariana*). Canadian Forest Service Report. No. 35, Forintek Canada Corp.

Zhang, S.Y. Chauret, G. Duchesne, I. Schneider, R. 2005. Maximizing the value of jack pine resource, Sainte-Foy, Québec, Forintek Canada Corp., 161 p.

Zhang, S.Y. Chauret, G. Swift, D.E. Duchesne, I. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Can. J. For. Res.* 36, 945–952.

Zobel, B.J. van Buijtenen, J.P. 1989. *Wood Variation, Its Causes and Control*. Springer-Verlag, Berlin.