JÉRÔME ALTEYRAC

INFLUENCE DE LA DENSITÉ DE PEUPLEMENT ET DE LA HAUTEUR DANS L'ARBRE SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DU BOIS D'ÉPINETTE NOIRE (*PICEA MARIANA* (MILL.) B.S.P.)

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en sciences du bois
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

JUILLET, 2005

© Jérôme Alteyrac, 2005

Résumé

Trente-six arbres d'épinette noire ont été récoltés dans la région de Chibougamau au nord de Québec et répartis dans trois catégories de densité de peuplement après avoir déterminé leur densité de peuplement locale. Les arbres ont été débités en trois billes de 2,7 m de longueur dont la partie supérieure de 30 cm de longueur a été coupée et utilisée comme support de l'échantillonnage. Le travail a consisté à étudier les variations des propriétés du bois avec la densité de peuplement à différentes hauteurs de l'arbre. Ces propriétés, estimées comme les critères de qualité du bois les plus importants, sont la masse volumique du bois, le taux de croissance, le retrait, la résistance mécanique et la structure anatomique en coupe transversale. De plus, ces caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques ont été étudiées sur des échantillons de même provenance permettant ainsi de mettre en évidence les relations entre celles-ci.

La masse volumique du bois et la structure anatomique ont été déterminées respectivement par densitométrie aux rayons X et à l'aide du logiciel WinCell, cerne par cerne, afin d'obtenir un profil radial dépendant de l'âge cambial. L'angle des microfibrilles a été mesuré par le procédé SilviScan au CSIRO Forestry and Forest Products Department, Australie, et les propriétés mécaniques ont été mesurées par essais de flexion statique sur des éprouvettes tirées de la moelle vers l'écorce.

Les résultats montrent en premier lieu de très grandes variations radiales de la moelle vers l'écorce des principales caractéristiques du bois dont certaines (surface des cernes, masse volumique maximale des cernes, angle des microfibrilles, module d'élasticité) caractérisent la transition entre le bois juvénile et le bois mature. Ils montrent aussi que la plupart des variations significatives des caractéristiques étudiées concernent les variations en hauteur dans l'arbre plutôt que les variations causées par la densité de peuplement, et que ces variations sont très accentuées dans le bois juvénile. On constate également que la densité de peuplement a un effet plus important sur les caractéristiques de croissance de l'arbre que sur la masse volumique du bois.

L'étude de l'âge de transition du bois juvénile au bois mature, calculé à partir du profil radial de la surface des cernes et de la masse volumique maximale des cernes, met en évidence un effet significatif de la hauteur dans l'arbre dont l'effet est de raccourcir la période juvénile de 17 ans en bas de l'arbre à 12 ans en haut de l'arbre. Toutefois, la proportion en volume de bois juvénile, semble présenter peu de variations avec la hauteur dans l'arbre. L'effet de la densité de peuplement n'est pas significatif sur l'âge de transition, par contre on observe une augmentation de la proportion de bois juvénile avec la densité de peuplement.

Une analyse statistique utilisant le modèle mixte a montré qu'il y a une grande influence de l'angle des microfibrilles et de la masse volumique des cernes sur les propriétés mécaniques du bois et que la largeur des cernes n'a pas d'influence sur ces propriétés.

Abstract

Thirty-six black spruce trees were collected in the Chibougamau area, north of Québec City and assigned into three stand density groups according to their local stand density. The trees were cut into three logs of 2.7-m in length from which the upper 30-cm long bolt was sawn and used as the sampling material. The aim of the study was to determine the variations of the wood properties in relation to stand density at different sampling heights. These properties, considered as determinant for wood quality, are wood density, growth rate, shrinkage, mechanical properties and anatomical structure. Moreover, these anatomical, physical and mechanical properties were studied on the same sample in order to highlight the relations among them.

X-ray densitometry and the WinCell software were used to determine wood density and the anatomical structure, for each growth ring, in order to obtain a radial profile in relation to cambial age. The microfibril angle was measured by the SilviScan technology at CSIRO Forestry and Forest Products Department, Australia, and the mechanical properties were determined by static bending on specimens taken from pith to bark.

The results show a high radial variation of the main wood characteristics from pith to bark where some of them (ring area, maximum ring density, microfibril angle, modulus of elasticity) characterise the juvenile wood to mature wood transition. The results show that most of the significant variation of wood characteristics occurs with sampling height rather than with stand density, these variations being more important in juvenile wood. One observes that stand density has more impact on growth traits than on wood density traits.

The study of the transition age from juvenile wood to mature wood calculated from the radial pattern of ring area and maximum ring density, highlights a significant effect of sampling height. This effect results in a reduction of the juvenile period from 17 to 12 years at the top of the tree. Nevertheless, the juvenile wood volume proportion seems to present little variation with sampling height. The effect of stand density on transition age is not significant but it seems that the proportion of juvenile wood is higher in the high stand density group.

A statistical analysis by a mixed model showed a strong effect of microfibril angle and ring density on mechanical properties but no significant effect of ring width.

Avant-Propos

Le présent travail a été réalisé sous la direction d'Alain Cloutier, professeur titulaire au Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval et sous la co-direction de Tony Zhang, chercheur à Forintek Canada Corp. au Département de fabrication du bois de sciage, ainsi que celle de Jean-Claude Ruel, professeur titulaire au Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval.

Une partie des travaux a été effectuée dans les locaux de Forintek où se trouvent un densitomètre aux rayons X et un banc d'essais de flexion. L'autre partie, concernant l'étude anatomique, a été effectuée à l'Université Laval au pavillon Abitibi-Price où l'on dispose, entre autres, d'une chambre de conditionnement, de microtomes et du logiciel WinCell.

Le présent document se compose de trois articles, écrits en anglais, qui constituent les chapitres 3, 4 et 5, et contiennent l'essentiel des résultats de cette étude. Le reste du document présente, en français, la problématique et les objectifs de l'étude, ainsi que la revue de littérature, le matériel de l'étude, les méthodes et d'autres résultats. Le premier article est publié, et les deux autres articles sont soumis. Pour les trois articles, je suis l'auteur principal et les co-auteurs sont Tony Zhang, Alain Cloutier, Jean-Claude Ruel (uniquement pour le premier article) et Chhun-Huor Ung (uniquement pour le troisième article). Mes directeur et co-directeur, Alain Cloutier et Tony Zhang, m'ont apporté une aide importante pour la correction, la validation des résultats et surtout pour la rédaction en anglais de ces trois articles.

Premier article. Influence of stand density on ring width and wood density at different sampling heights in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). J. Alteyrac, S.Y. Zhang, A. Cloutier, J-C. Ruel. Wood and Fiber Science 2005, 37(1) 83-94.

Deuxième article. Characterization of juvenile wood to mature wood transition in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights. J. Alteyrac, A. Cloutier, S.Y. Zhang. Soumis, Wood Science and Technology

Troisième article. Mechanical properties in relation to selected wood anatomical and ring properties of black spruce. J. Alteyrac, A. Cloutier, C-H Ung, S.Y. Zhang. Soumis, Wood and Fiber Science.

Remerciements

J’aimerais tout d’abord remercier Alain Cloutier, mon directeur, pour plusieurs raisons. En premier lieu, c’est grâce à lui que j’ai eu la chance de venir m’installer temporairement au Canada et de découvrir ce pays. En deuxième lieu, il m’a accordé un financement du début à la fin du projet de doctorat ce qui m’a permis d’aborder ces 6 années d’études sans soucis financiers. Enfin je lui dois beaucoup de reconnaissance pour le temps qu’il a consacré à la correction des trois articles qui constituent cette thèse.

Je remercie aussi Tony Zhang pour ses conseils concernant la rédaction des articles. Il m’a également procuré un espace de travail à Forintek et m’a encouragé à participer à de nombreux congrès et conférences.

Gilles Chauret a été l’un des premiers interlocuteurs dans le cadre de ce projet et il a été un précieux conseiller au début de mes travaux. Je lui suis très reconnaissant pour tout ce qu’il a fait pour moi, le temps qu’il a consacré à m’orienter dans mes recherches, à m’écouter et à m’aider. Je souhaite également rendre hommage à Carole.

Je remercie Jean-Claude Ruel pour les renseignements qu’il m’a donnés concernant le peuplement dont sont issus les arbres échantillons de ce projet et pour ses commentaires et conseils à propos du premier article.

Je remercie Chhun-Huor Ung pour son aide concernant l’analyse statistique et la rédaction du troisième article.

Je remercie sincèrement Roger Hernandez pour sa rapidité lors de la prélecture de ma thèse ainsi que pour la qualité et la pertinence des corrections qu’il a suggérées pour améliorer celle-ci.

Plus généralement, je remercie les professeurs du Département des sciences du bois et de la forêt de l’Université Laval pour leur assistance.

Je remercie aussi tous les techniciens du Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval pour leur aide.

Merci aussi aux stagiaires de l'École Supérieure du Bois (Nantes, France) qui sont venus, chaque été, me prêter main-forte au cours de la partie expérimentale du projet.

Je remercie Forintek, personne morale, et le personnel de Forintek (Odile, Marielle, …) pour leur accueil, leur aide et les cours d'anglais auxquels j'ai pu assister.

Sébastien Meunier et moi avons passé deux longues semaines, quelques kilomètres au sud de Chibougamau (Québec) au milieu de la forêt, sous l'assaut incessant des moustiques et des mouches noires pour récolter les arbres qui constituent le matériel de base de l'étude. Je remercie donc Sébastien de m'avoir accompagné, aidé et encouragé.

Je remercie, au nom des participants à ce projet, les organismes de financement qui ont apporté leur contribution à cette recherche. Il s'agit du CRSNG, du Service Canadien des Forêts et de Forintek Canada Corp.

Un remerciement spécial pour Robert Guy et sa famille. J'ai, grâce à eux, eu l'occasion de visiter le laboratoire de Forintek à Vancouver (BC).

Je remercie cordialement Denis Cossette et Yann Mainville de m'avoir fait visiter les Chantiers Chibougamau où l'épinette noire est utilisée dans les produits à valeur ajoutée.

Je remercie ma petite famille en France pour leur soutien, leur patience et leurs encouragements.

Muchas gracias a Marcia. Je souhaite rendre hommage à celle qui partage ma vie et me donne beaucoup d'amour, d'assurance et de motivation pour franchir les obstacles.

A mon petit Guillaume.

De bois noué courent grandes vendanges.
Proverbe français

Table des matières

Résumé ..... **ii**

Abstract ..... **iv**

Avant-Propos ..... **vi**

Remerciements ..... **viii**

Introduction **1**

Chapitre 1. Revue de literature **3**

1.1. Généralités 3

1.1.1. L'épinette noire (Picea mariana (Mill.) B.S.P.) *3*

1.1.2. Densité de peuplement *5*

1.1.3. Qualité du bois *8*

1.2. Effet de la densité de peuplement sur la qualité du bois 16

1.2.1. Effet sur la croissance de l'arbre *16*

1.2.2. Effet sur les caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques *17*

1.3. Relations entre les caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques du bois 21

1.3.1. Relations entre la structure anatomique et les propriétés physiques *21*

1.3.2. Relations entre la structure anatomique et les propriétés mécaniques *24*

1.3.3. Relations entre la masse volumique du bois et les propriétés mécaniques *25*

1.4. Transition du bois juvénile au bois mature 26

1.4.1. Définition *26*

1.4.2. Effet de l'espacement entre les arbres sur l'âge de transition *27*

1.4.3. Effet de la hauteur dans l'arbre sur l'âge de transition *28*

1.5. Objectifs de l'étude 28

1.5.1. Objectif général *28*

1.5.2. Objectifs spécifiques *29*

Chapitre 2. Matériel et méthodes **30**

2.1. Matériel 30

2.1.1. Choix des arbres *30*

2.1.2. Découpage des billes *33*

2.1.3. Préparation des échantillons pour la densitométrie *34*

2.1.4. Préparation des coupes minces *35*

2.1.5. Préparation des éprouvettes *36*

2.2. Méthodes 37

2.2.1. Mesure des caractéristiques anatomiques *37*

2.2.2. Mesure de l'angle des microfibrilles *37*

2.2.3. Densitométrie aux rayons X *38*

2.2.4. Mesure du retrait *40*

2.2.5. Essais de flexion *41*

2.2.6. Analyses statistiques *41*

2.3. Conclusion 42

Chapitre 3. Influence of Stand density on ring width and wood density at different sampling heights in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) **44**

Résumé **44**

Abstract **45**

3.1. Introduction 46

3.2. Materials and methods 47

3.2.1. Materials *47*

3.2.2. Sample preparation *48*

3.2.3. Sample analysis *48*

3.3. Results and discussion 49

3.3.1. Patterns of radial variation for growth and density features *49*

3.3.2. Juvenile wood-mature wood transition *54*

3.3.3. Variations with sampling height *55*

3.3.4. Juvenile and mature wood properties *58*

3.3.5. Variation with stand density *60*

3.4. Conclusion 63

Acknowledgements 64

Chapitre 4. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights 65

Résumé 65

Abstract 66

4.1. Introduction 67

4.2. Material and Methods 69

4.2.1. Material *69*

4.2.2. Methods *69*

4.3. Results and discussion 74

4.4. Conclusion 85

Acknowledgments 86

Chapitre 5. Mechanical properties in relation to selected wood characteristics of black spruce 87

Résumé 87

Abstract 88

5.1. Introduction 89

5.2. Material and methods 90

5.2.1. Material *90*

5.2.2. Methods *91*

5.3. Results and discussion 93

5.3.1. Results *93*

5.3.2. Discussion *98*

5.4. Conclusion 99

Acknowledgments 100

Chapitre 6. Autres résultats 101

6.1. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur le MOE et MOR 101

6.2. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur le retrait 103

6.3. Profil radial de propriétés anatomiques 106

6.4. Conclusion 108

Conclusion générale 109

Perspectives 112

Appendice 1 127

Appendice 2 129

Appendice 3 133

Liste des tableaux

Tableau 1-1. Quelques caractéristiques anatomiques de l'épinette noire (Panshin et DeZeeuw 1980). *12*

Tableau 1-2. Caractéristiques physico-mécaniques moyennes du bois d'épinette noire (Jessome 1977). *14*

Tableau 2-1. Données sur la parcelle établies en 1996 (Horvath 2002). *32*

Tableau 2-2. Description des trois groupes de densité de peuplement. Les groupes sont statistiquement différents au seuil de probabilité de 1%. *32*

Table 3-1. Average ring width (mm) in relation to sampling height and stand density group. (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column). *56*

Table 3-2. Average ring area (mm²) in relation to sampling height and stand density (data at 2.4-m high only), in juvenile wood (JW) and mature wood (MW). (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column). *57*

Table 3-3. Average earlywood proportion (%) as a function of sampling height and stand density (data at 2.4-m high only) in juvenile wood (JW) and mature wood (MW). (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column). *58*

Table 3-4. Average ring density (kg/m³) in relation to sampling height, in juvenile wood (JW) and mature wood (MW), and in relation to stand density group. (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column). *59*

Table 3-5. Average maximum ring density (kg/m³) in relation to sampling height and stand density (data at 2.4-m high only) in both juvenile wood (JW) and mature wood (JW). (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column). *61*

Table 3-6. Average earlywood density (kg/m³) in relation to sampling height, in juvenile wood (JW) and mature wood (MW), and in relation to stand density group. (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column). *61*

Table 3-7. Average latewood density (kg/m³) in relation to sampling height and stand density (data at 2.4-m high only) in both juvenile wood (JW) and mature wood (JW). (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column). *62*

Table 4-1. ANOVA of transition age at a sampling height of 2.4 m. Comparison of four approaches (MOD) (2 traits x 2 methods) and three stand density groups (SD). *77*

Table 4-2. Average transition age estimated by third-order polynomial, segmented linear regressions and derivative function, for three stand density groups at 2.4 m sampling height. Ring area (RA), maximum ring density (MD) and microfibril angle (MFA) profiles are used. Results with different letters are statistically different (Duncan test, 0.05 probability level). *78*

Table 4-3. ANOVA of transition age at three stand densities (SD) and at three sampling heights (SH). *81*

Table 4-4. Average transition age at three sampling heights and in three stand density groups. Results with different letters are significantly different at 0.05 probability level (Duncan test, read in column). *82*

Table 4-5. Estimation of average juvenile wood (JW) proportion that trees would have had in 1980 (about 60 years old). *84*

Table 5-1. Variation of MOE explained by MFA and random effect of trees. *95*

Table 5-2. Variation of MOR explained by MFA and RD, and random effect of trees. *96*

Tableau 6-1. Module d'élasticité et de rupture en flexion statique (H=12 %) à différentes hauteurs et densités de peuplement. *102*

Tableau 6-2. Retraits partiels radial et tangentiel. *105*

Tableau 6-3. Exemple de description des arbres voisins de l'arbre 1. ..... *129*

Tableau 6-4. Identification des 36 arbres. *131*

Liste des figures

Figure 1-1. Localisation géographique de l'épinette noire (Viereck et Johnston 1990). 3

Figure 2-1. Indice de compétition de Schütz (D'après Ung et al. 1997) 31

Figure 2-2. Découpage des arbres en trois billes de 2,7 m de longueur. 33

Figure 2-3. Préparations des échantillons pour a) les essais de flexion, b) l'anatomie et c) la densitométrie. 34

Figure 2-4. Photo d'un échantillon pour la densitométrie. 34

Figure 2-5. Exemple de coupes minces montées sur lame. 36

Figure 2-6. Photo d'une coupe transversale à cheval sur deux cernes, grossissement 100x. 37

Figure 2-7. Schéma du système de mesure de l'angle des microfibrilles (SilviScan ®). 38

Figure 2-8. Exemple d'un profil brut de masse volumique basale. 39

Figure 2-9. Décomposition du profil brut de densité en cernes individuels et détermination de la transition du bois initial (BI) au bois final (BF). 40

Figure 3-1. Average ring width for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only). 49

Figure 3-2. Average ring area for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only). 50

Figure 3-3. Average earlywood proportion for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4- m high only). 51

Figure 3-4. Average ring density for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only). 52

Figure 3-5. Average maximum ring density for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4- m high only). 53

Figure 3-6. Average earlywood density for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only). 53

Figure 3-7. Average latewood density for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only). 54

Figure 4-1. Estimation of JW proportion from the juvenile wood radius (JWR) and area (JWA), the tree radius (TR) and cross section area (total area), and length of the log (L). 74

Figure 4-2. Average maximum ring density (MD) and ring area (RA) profiles at 2.4 m sampling height. 75

Figure 4-3. Average ring width (RW), ring density (RD) and microfibril angle (MFA) profiles at 2.4 m sampling height. 76

Figure 4-4. Similar radial patterns for maximum ring density and ring area at the following sampling heights (a) 2.4 m, (b) 5.1 m, and (c) 7.8 m. 80

Figure 4-5. Estimation of the juvenile wood proportion at three sampling heights (% of area) and in the two logs (% of volume). 83

Figure 5-1. Preparation of specimens for a) mechanical features, b) anatomical characteristics and c) densitometry. 90

Figure 5-2. Radial variation from pith to bark of a) MOE and b) MOR as a function of cambial age. 94

Figure 5-3. Radial variation of a) MFA ,b) RD and c) RW as a function of cambial age. *94*

Figure 5-4. Relation between a) MFA and MOE , b) MFA and MOR, c) RD and MOE, d) RD and MOR, e) RW and MOE, and f) RW and MOR. *97*

Figure 6-1. Profil radial de la moelle vers l'écorce du module d'élasticité (H=13.6%) à différentes hauteurs et densités de peuplement. *103*

Figure 6-2. Variation radiale du retrait partiel longitudinal : effet de la densité de peuplement. *104*

Figure 6-3. Variation de la moelle vers l'écorce des retraits partiels tangentiel et radial : effet de la densité de peuplement. *105*

Figure 6-4. Variation radiale du pourcentage de paroi cellulaire dans les bois initial et final en fonction de l'âge cambial. *107*

Figure 6-5. Utilisation du logiciel SDMD dans le cas de notre peuplement. *127*

Figure 6-6. SDMD montrant la limite entre production maximale et mortalité du peuplement étudié. *128*

Figure 6-7. Schéma de répartition des arbres voisins dans un rayon de 4 m autour de l'arbre 1. ..... *130*

Figure 6-8. Effet de l'âge de la moelle calculé à 2,4 m sur la hauteur de l'arbre et le diamètre à hauteur de poitrine. *132*

Introduction

Dans un contexte mondial où il devient nécessaire de cultiver le bois et de concilier les demandes des différents utilisateurs de la forêt, la forêt vierge du Québec laisse place progressivement aux forêts de seconde venue et à la sylviculture intensive. Cette transition, dont le but est d'augmenter le rendement en bois, se fait parfois aux dépens de la qualité du bois; nœuds plus gros, masse volumique plus faible, proportion de bois juvénile plus importante et plus grande proportion de fibres courtes.

Les utilisateurs sont contraints d'aller chercher le bois de plus en plus loin vers le nord où se trouvent encore des forêts vierges mais, dans un avenir proche, la seule ressource sera la forêt de seconde venue. Parmi cette ressource, l'épinette noire est l'une des espèces commerciales les plus importantes du Canada et est principalement utilisée dans la fabrication de pâte à papier, de panneaux MDF et comme matériau de construction. Il devient donc important, voire primordial, d'étudier les différentes conditions de croissance et leurs conséquences sur le volume de bois et la qualité du bois.

La qualité du bois est une notion plutôt subjective qui réfère essentiellement à l'utilisation du produit final. Dans un contexte scientifique, l'étude de la qualité du bois concerne aussi bien le niveau microscopique que le niveau macroscopique, et fait interagir plusieurs domaines de recherche comme la physique du bois, l'anatomie du bois, la mécanique du bois et la chimie du bois. La proportion de bois juvénile, les noeuds et la masse volumique du bois, en tant que données importantes dans la commercialisation et la transformation du bois, sont des facteurs déterminants de la qualité du bois. Ils dépendent des conditions de croissance de l'arbre dont les composantes sont la qualité du site, la concurrence, le climat et les traitements sylvicoles. D'autre part, les facteurs déterminant la qualité du bois dépendent des variations internes dans l'arbre. L'anisotropie du bois démontre à quel point les propriétés et les caractéristiques du bois changent selon la direction considérée, et les variations radiales, en hauteur ou intra cernes témoignent de la grande hétérogénéité du matériau bois.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'effet de la densité de peuplement sur la qualité du bois de l'épinette noire, en particulier sa masse volumique et la quantité de bois juvénile, à différentes hauteurs dans l'arbre et à partir d'un site unique constituant une forêt naturelle issue d'un feu. L'étude consiste aussi à mettre en évidence les relations entre les différentes propriétés anatomiques, physiques et mécaniques étudiées.

Une première implication de cette étude, sur le plan économique, est la détermination, en terme de probabilité ou de proportion, du volume de bois juvénile présent dans un arbre ou dans un peuplement. Etant donné que le bois juvénile et le bois mature ont des caractéristiques et des propriétés différentes, leur utilisation et le prix d'achat du bois devraient être déterminés en considérant la proportion de bois juvénile.

Une deuxième implication concerne la simulation du sciage. Actuellement on cherche beaucoup à augmenter le rendement en volume en utilisant des logiciels tels qu'Optitek qui permettent de calculer le nombre de pièces que l'on peut débiter dans une bille. Toutefois, le mode de calcul ne prend pas en compte la présence du bois juvénile. Pourtant, les études ont montré que les conséquences du bois juvénile sur les propriétés mécaniques ou sur le séchage du bois peuvent être significatives.

Sur le plan fondamental, l'étude apporte, des précisions sur les liens entre la structure anatomique, la masse volumique du bois, et les propriétés mécaniques de l'épinette noire afin de mieux connaître les particularités de cette espèce et éventuellement d'améliorer ses caractéristiques par la sélection génétique ou les traitements sylvicoles.

Chapitre 1. Revue de literature

1.1. Généralités

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

1.1.1.1. Localisation et importance pour le reboisement

On trouve l'épinette noire dans le nord du Canada d'est en ouest, du nord du Massachusetts au nord du Labrador sur la côte Est, et du sud de la Colombie Britannique jusqu'en Alaska sur la côte Ouest (Figure 1-1) (Viereck et Johnston 1990).

L'épinette noire est un conifère abondant dans le nord du continent américain et l'espèce la plus utilisée en matière de reforestation dans l'Est du Canada. Chaque année, ce sont plus de 100000 ha d'épinette noire qui sont plantés. Généralement on trouve cette espèce sur des sols organiques humides et la plupart du temps elle constitue un peuplement pur (surtout au nord), mais on peut la trouver aussi associée à d'autres espèces (plutôt au sud) comme l'épinette blanche (*Picea glauca*), le sapin baumier (*Abies balsamea*), le pin gris (*Pinus banksiana*), et le bouleau blanc (*Betula papyrifera*).

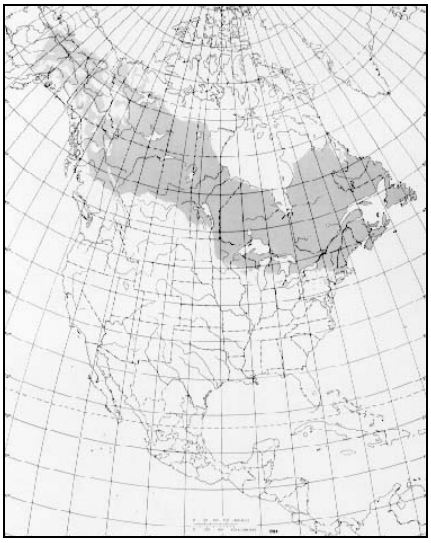


Figure 1-1. Localisation géographique de l'épinette noire (Viereck et Johnston 1990).

À maturité, l'arbre atteint environ 20 m de hauteur pour un diamètre moyen à hauteur de poitrine de 23 cm. Un peuplement de 80 à 100 ans permet de récolter environ 200 m³ de bois par hectare. Son houppier est généralement de petite taille, situé au sommet, laissant ainsi apparaître de nombreuses branches mortes sur le tronc.

La particularité de cette espèce est son aptitude à se développer en premier sur des sites détruits par les incendies (Filion et Morin 1996). C'est le cas de notre site d'étude dont l'incendie à l'origine de la régénération est daté de 1906.

Ces dernières années, de nombreuses améliorations ont été apportées aux plantations, aux semis et sur les périodes de rotation mais on a constaté qu'elles ont un plus grand impact économique pour le pin gris que pour l'épinette noire (McKenney et al. 1992). Actuellement, il semble que l'on soit arrivé à un optimum, pour l'épinette noire, en matière de sélection des graines destinées à l'ensemencement (Cornelius et Morgenstern 1986).

1.1.1.2. Domaine d'utilisation

L'épinette noire est l'espèce la plus importante sur le plan commercial dans l'Est du Canada. Elle est utilisée principalement pour la pâte à papier mais aussi en construction. Dans le cas du bois de dimension, l'espèce est commercialisée dans la même catégorie que le sapin baumier et le pin gris sous la désignation S-P-F (Mullins et McKnight 1981).

Lorsque les arbres sont de petit diamètre, ce qui est souvent le cas pour l'épinette noire, la transformation est difficile, néanmoins l'industrie s'adapte en modifiant et adaptant spécifiquement les équipements (Corneau 1994).

Depuis peu, l'épinette noire est de plus en plus utilisée au Québec dans les produits à valeur ajoutée comme par exemple les poutres Nordic Lam® des chantiers Chibougamau, les panneaux MDF et le bois jointé (Bustos 2003).

1.1.2. Densité de peuplement

1.1.2.1. Définition

Selon la définition du programme national des données sur les forêts (http://nfdp.ccfm.org/) la densité de peuplement est une mesure quantitative du couvert forestier sur une superficie donnée. Elle s'exprime en fonction de la biomasse, de la fermeture du couvert, du nombre d'arbres, de la surface terrière, ou du volume par hectare. Dans le cas de l'épinette noire, on a généralement des plantations dont l'espacement initial est de 2 m x 2 m, ce qui correspond à environ 2500 arbres/ha (McClain et al. 1994).

La densité de peuplement réfère à la notion de compétition entre les arbres c'est-à-dire, à la demande exercée par deux ou plusieurs organismes pour une ressource commune, dans un milieu où ces ressources sont réellement ou potentiellement limitées. Fonctionnellement la compétition ne fait pas seulement intervenir la distance de tronc à tronc. Elle concerne l'accès aux ressources telles que l'eau, les substances nutritives et la lumière, ce qui induit une participation des parties aérienne et souterraine de l'arbre dans ce processus (Ung et al. 1997). La largeur du houppier et sa hauteur jouent donc un rôle important sur la compétition. Ainsi, la totalité de l'espace dans lequel l'arbre pousse est un déterminant important du taux de croissance et par conséquent des caractéristiques du bois. L'espacement entre les arbres et la végétation environnante définissent le degré de compétition pour les éléments critiques de croissance tels que les nutriments, l'eau et le soleil. Quand la population est dense, l'arbre entre en compétition pour les éléments nécessaires à sa croissance. À mesure que la compétition augmente pour ces éléments, la croissance des arbres diminue dans toute la parcelle. Un espacement large des arbres favorise donc une croissance rapide tandis que les peuplements trop denses ont tendance à produire des arbres plus petits (Zobel et Van Buijtenen 1989).

La densité de peuplement est une notion dynamique. Les arbres dans une parcelle croissent plus ou moins vite en raison de la compétition et meurent, ce qui modifie constamment la densité de peuplement et la compétition. La densité de peuplement initiale est modifiée au

cours des années par la mort naturelle de certains arbres ou artificiellement par l'action de l'homme.

Dans le cas présent, l'étude porte sur les pessières noires régénérées après incendie, sans intervention humaine. L'espacement entre les arbres y est relativement faible, mais il est aussi très variable du fait que les arbres sont répartis aléatoirement sur la parcelle. La particularité de l'étude réside donc dans la détermination, pour chaque arbre, d'une densité de peuplement locale.

L'indice de Schütz permet de déterminer la distance entre deux arbres pour laquelle ceux-ci sont considérés comme compétitifs. Bien qu'il existe d'autres formulations de la compétition entre les arbres (Arney 1973, Monserud et Ek 1977), l'indice de Schütz s'avère très pratique à utiliser en forêt car il présente l'avantage de ne pas faire intervenir le diamètre de l'arbre concurrent (Ung et al. 1997).

1.1.2.2. Sylviculture intensive

Les conditions économiques actuelles poussent les forestiers à avoir de plus en plus recours à la sylviculture intensive. Au Canada on a recours à ces méthodes pour des raisons d'approvisionnement car le bois provenant des forêts vierges est de moins en moins disponible. Pendant de nombreuses années les utilisateurs de bois se sont peu souciés du reboisement, or le maintien de la ressource s'avère aujourd'hui une question primordiale pour toute l'industrie du bois.

À partir de quelques traitements sylvicoles de base, on obtient une grande variété de combinaisons selon la date à laquelle ils sont appliqués et leur intensité. Les traitements sylvicoles agissent sur la croissance de l'arbre en modifiant son environnement et en particulier le volume du houppier (Zobel et Van Buijtenen 1989). Or le houppier est le moteur de croissance de l'arbre où sont synthétisées toutes les molécules organiques nécessaires à son développement. Tous les traitements qui tendent à modifier la taille du

houppier ont donc pour conséquence de modifier la croissance de l'arbre et la qualité du bois.

Ces traitements sont de quatre types: éclaircie, élagage, irrigation, fertilisation. Néanmoins, les traitements sylvicoles les plus employés aujourd'hui pour la gestion forestière sont l'éclaircie, la fertilisation et l'élagage. L'éclaircie consiste à éliminer les arbres excédentaires de moins bonne qualité. Les arbres issus d'éclaircies peuvent être utilisés dans l'industrie des pâtes contrairement à l'éclaircie pré-commerciale où les arbres coupés ne sont pas utilisés. L'élagage consiste à éliminer les branches inférieures de l'arbre afin d'obtenir du bois sans nœud. Enfin, la fertilisation sert à apporter des substances chimiques afin de favoriser la croissance des arbres, elle est parfois pratiquée après une éclaircie pré-commerciale ou commerciale.

L'industrie forestière canadienne adopte de plus en plus la sylviculture intensive et par conséquent, les pratiques d'éclaircies commerciales sont de plus en plus fréquentes et permettent de raccourcir les rotations et d'accélérer la croissance des arbres (Zhang et Chauret 2001). De nombreuses espèces ont fait l'objet d'études de l'impact des traitements sylvicoles sur la croissance des arbres et les caractéristiques du bois (Chui et al. 1997, Nicholls 1971).

Devant la complexité de la croissance de l'arbre, l'utilisation et la combinaison de ces traitements sylvicoles ne peuvent se faire qu'après avoir bien étudié les conséquences sur la vitesse de croissance, le volume de bois produit, l'âge de récolte, et la qualité du bois. Cette complexité est par exemple mise en évidence par Cown et McConchie (1981) qui ont montré qu'une combinaison de l'éclaircie et de la fertilisation apportait des meilleurs résultats sur la croissance de l'arbre que chaque traitement appliqué seul.

Les traitements sylvicoles doivent aussi prendre en compte l'état initial du peuplement. En effet, l'influence de l'éclaircie sur les arbres résiduels peut dépendre de la qualité du site, de l'espacement initial et de l'âge du peuplement (Nicholls 1971). L'espacement initial constitue le point de départ du peuplement et évolue ensuite en espacement entre les arbres, qui lui-même varie au gré de la mortalité dans le peuplement.

1.1.2.3. Diagrammes de gestion de la densité de peuplement

Les diagrammes de gestion de la densité de peuplement sont une façon pratique de lire et de déterminer le volume de bois produit en tenant compte de l'espacement entre les arbres, que cet espacement résulte de mortalité naturelle ou d'éclaircie.

De tels diagrammes ont été développés pour le pin gris (Archibald et Bowling 1995) et l'épinette noire (Newton 1997). Ils concernent aussi bien des peuplements naturels que des peuplements aménagés. L'intérêt de ces diagrammes est de permettre au forestier d'atteindre ses objectifs en contrôlant la densité de peuplement par l'organisation dans le temps des éclaircies et de leur intensité. Ces objectifs portent principalement sur le volume de bois, et dans le contexte économique actuel, sur le temps nécessaire pour atteindre ce volume (âge de révolution).

L'ajout dans ces diagrammes d'une valeur marchande au volume de bois produit, en particulier en connaissant les caractéristiques du bois (masse volumique, proportion de bois juvénile, résistance mécanique), constitue un enjeu de taille car cela permettrait au forestier d'avoir une vision encore plus proche de la réalité économique.

Bien que les diagrammes restent un bon moyen de prévoir le volume de bois à partir de plusieurs scénarios sylvicoles, ils ne permettent pas d'avoir actuellement une information sur la structure interne du peuplement comme les classes de hauteur ou de diamètre (Archibald et Bowling 1995).

1.1.3. Qualité du bois

1.1.3.1. Définition

Il s'avère difficile, a priori, de définir précisément la qualité du bois en raison du fait qu'il s'agit d'une notion assez vaste et faisant intervenir de nombreux aspects. Néanmoins on peut citer comme définition celle donnée par Jozsa et Middleton (1994); ils définissent la qualité du bois comme son aptitude à être utilisé pour un usage précis. Ainsi, dans

certains cas une propriété particulière du bois sera bien adaptée à la situation (exemple: faible masse volumique du bois pour l'isolation thermique) alors que dans d'autres cas c'est la propriété opposée qui sera sollicitée (forte masse volumique pour les parquets). Vraisemblablement, chaque caractéristique du bois contribue ou peut contribuer à sa qualité du moment qu'on peut lui associer une application. Il est important de définir la qualité du bois car elle est perçue différemment par les forestiers, les manufacturiers et les consommateurs (Zhang 1997b).

Étant donné les multiples utilisations du bois, toutes les caractéristiques chimiques, anatomiques, physiques et mécaniques du bois peuvent être considérées comme des facteurs de qualité du bois. Ainsi, les facteurs de qualité du bois sont relativement nombreux :

- la masse volumique du bois
- la proportion de bois juvénile et de bois mature
- la proportion de bois de duramen et d'aubier
- le bois de compression et le bois de tension
- la longueur des fibres et leur masse linéique
- l'angle des microfibrilles dans la couche S2
- le pourcentage de lignine et cellulose
- le retrait (radial, tangentiel et longitudinal)
- les propriétés mécaniques
- la pente du fil
- les nœuds, la couleur
- la quantité d'extractibles

Certains facteurs sont liés à la structure même du bois (anatomie, composition chimique) et d'autres sont l'expression de ces facteurs intrinsèques (propriétés physiques et mécaniques). De plus, de nombreuses caractéristiques du bois sont héréditaires mais elles sont souvent contrôlées par les conditions de croissance. Dans le cadre des améliorations génétiques, on s'est basé principalement sur la masse volumique du bois, mais on note qu'il serait préférable d'étudier, parmi les nombreux critères de qualité, les effets déterministes plutôt que les corrélations qui les lient (Dickson et Walker 1997).

De nombreux auteurs se sont intéressés à la question de la qualité du bois de manière générale (Zobel et Van Buijtenen 1989, Panshin et deZeeuw 1980) ou de manière ciblée concernant des espèces particulières comme l'épinette noire (Zhang 1997a, Antal et Micko 1994, Weetman 1971, Zhang et Morgenstern 1995) ou encore en relation avec les conditions de croissance (Barbour 1991, Cregg et al. 1988, Keith 1985, Tsoumis et Panagiotidis 1980) et les pratiques sylvicoles dans le cas d'espèces feuillues (Kellison et al. 1983).

Il est admis, généralement et dans la plupart des cas, que la qualité du bois est associée à sa masse volumique car elle permet d'expliquer de nombreuses autres propriétés du bois (Zhang et al. 1992). Néanmoins, la masse volumique du bois n'est qu'une expression de sa structure anatomique (Walker et Woollons 1998) puisque la masse volumique du bois peut être estimée par la structure des trachéides (Wimmer 1995). Par conséquent, comme la structure anatomique du bois peut être utilisée pour expliquer la variation de la masse volumique, elle peut être considérée comme un indicateur de la qualité du bois.

Dans l'industrie du sciage, la mise en place de critères de qualité du bois présente un grand intérêt lors de la classification des produits. Celle-ci se fait visuellement et ne concerne donc qu'une partie des caractéristiques présentées plus haut. Habituellement il s'agit de la grosseur, de l'emplacement et de la fréquence des nœuds. La flache est aussi un critère observé lors du classement. Il existe également les classements mécaniques (MSR) appliqués sur les produits destinés à la construction.

1.1.3.2. Caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques

Caractéristiques anatomiques

Les caractéristiques anatomiques peuvent être réparties en trois niveaux. À l'œil nu, les caractéristiques anatomiques concernent les différents tissus constitutifs du bois (parenchyme, trachéides) et les divers plans (transversal, radial et tangentiel) auxquels ils sont associés. À l'échelle du cerne, on trouve tout ce qui concerne leur largeur, ainsi que la largeur et la proportion du bois initial ou du bois final. Enfin au niveau de la cellule, les caractéristiques anatomiques concernent la longueur des trachéides, leur masse linéique (masse/longueur), l'angle des microfibrilles dans la paroi secondaire, mais aussi leur diamètre en coupe transversale ainsi que l'épaisseur des parois. Dans le cadre des applications en préservation, les ponctuations peuvent aussi être considérées comme critère de qualité (Koran 1991).

Généralement, ce sont la longueur des trachéides, la masse linéique, l'angle des microfibrilles, le diamètre en section transversale des trachéides, l'épaisseur des parois et la surface des rayons ligneux en coupe tangentielle qui sont les principales données de qualité du bois en raison de leur application dans le domaine des pâtes et papiers. La longueur des trachéides ainsi que l'épaisseur des parois sont des critères importants car ils influencent beaucoup le procédé de fabrication de la pâte et la résistance du papier (Law et Valade 1997).

L'angle que les microfibrilles de la paroi secondaire S2 forment par rapport à l'axe de la cellule est beaucoup étudié pour son rôle sur le retrait et les propriétés mécaniques (Booker et al. 1998, Harris 1977, Megraw et al. 1998, Zhang et Zhong 1992).

De nombreuses caractéristiques anatomiques diffèrent du bois juvénile au bois mature dont parmi elles l'orientation des microfibrilles et la longueur des fibres, ce qui permet d'apprécier la limite entre ces types de bois.

Tableau 1-1. Quelques caractéristiques anatomiques de l'épinette noire (Panshin et DeZeeuw 1980).

Canaux résinifères	Rayons ligneux	Ponctuations	Autres caractères
Longitudinaux	Trachéides transversales lisses	picéoïdes	transition graduelle du bois initial au bois final
Transversaux	parenchymes à paroi terminale noduleuse	cupressoïdes	
cellules épithéliales à paroi épaisse			
diamètre moyen inférieur à 70µm			

Chez l'épinette noire, la transition du bois initial au bois final se fait graduellement (Tableau 1-1). Il s'agit d'une particularité qui rend plus complexe l'étude des profils intra cerne. En effet, chez les espèces à transition brusque, la délimitation du bois initial et du bois final est facile à déterminer, tandis que chez les espèces à transition graduelle il est nécessaire de choisir arbitrairement une limite dans une zone qui s'étend sur plusieurs rangées de cellules et où la masse volumique et le diamètre radial des cellules varient.

Caractéristiques physiques

La masse volumique du bois est beaucoup étudiée en tant qu'élément déterminant de la qualité du bois (Barbour et al. 1994, Zhang et al. 1992). Elle est une caractéristique très variable du bois. Elle peut varier selon l'espèce, selon les conditions de croissance, de la moelle vers l'écorce, en fonction de la hauteur dans l'arbre, selon la teneur en humidité

du bois et selon le type de bois (juvénile, mature, normal, réaction) (Panshin et deZeeuw 1980).

La masse volumique du bois peut-être mesurée de différentes façons selon l'importance que l'on accorde à la variabilité intra-arbre ou intra-cerne. Par exemple certaines méthodes comme la densitométrie aux rayons X, la photométrie ou la morphométrie sont privilégiées par rapport à la méthode gravimétrique pour tenir compte de cette variabilité (Ivkovich et Koshy 1997).

Les premières études de la masse volumique du bois qui dérivaient d'une méthode semblable aux rayons β (Cameron et al. 1959) et réalisées aux rayons X (Polge 1978) ont permis d'obtenir des profils de variation de la moelle vers l'écorce. Ces méthodes permettent de mettre en évidence la variabilité radiale inter cerne et intra cerne de la masse volumique. L'étude de la masse volumique aux rayons X présente un grand intérêt pour la détermination du passage du bois juvénile au bois mature, en particulier par la visualisation du profil de masse volumique du bois final (Sauter et al. 1999).

Chez l'épinette noire, la masse volumique basale est de 406 kg/m³ en moyenne (Tableau 1-2) et représente une caractéristique importante de la qualité du bois (Barbour et al. 1996) dont la variation radiale de la moelle vers l'écorce peut-être établie (Zhang 1997a). Elle a aussi une influence sur le traitement mécanique des pâtes (Rudie et al. 1994).

La détermination de la masse volumique du bois dépend beaucoup de l'effet d'échelle, ce qui entraîne une grande variabilité lorsqu'on la mesure. À l'échelle d'une bille, la masse volumique mesurée est une moyenne comprenant celle du bois juvénile, du bois mature et des nœuds. A une échelle plus petite, les éprouvettes d'essai par exemple, la valeur mesurée est une moyenne de la masse volumique de plusieurs cernes. Et à l'échelle du cerne, celle-ci correspond à la masse volumique moyenne du bois initial et du bois final. Finalement, la masse volumique de la matière ligno-cellulosique, c'est à dire le constituant de la paroi cellulaire, est constante et égale à environ 1,50 chez les résineux.

Tableau 1-2. Caractéristiques physico-mécaniques moyennes du bois d'épinette noire (Jessome 1977).

Masse volumique (kg/m^3)	Module d'élasticité en flexion statique (MPa)	Module de rupture en flexion statique (MPa)	Retrait radial (%)	Retrait tangentiel (%)
406 (basale)	9100 (état vert)	40,5 (état vert)	3,8 (total)	7,5 (total)
480 (12%)	10400 (12%)	78,3 (12%)	1,7 (partiel)	4,0 (partiel)

Le retrait volumique est quant à lui l'une des caractéristiques les plus importantes dont on doit tenir compte lors du séchage du bois. D'une part l'anisotropie du bois entraîne un retrait différent dans les sens longitudinal, tangentiel et radial, d'autre part le retrait longitudinal présente des variations entre le bois juvénile et le bois mature, qui sont à l'origine des déformations importantes du bois.

Le ratio T/R, rapport entre le retrait tangentiel et le retrait radial, est de 1,95 pour l'épinette noire (Tableau 1-2). Le retrait consiste en une diminution des dimensions du bois et trouve son origine dans la structure même des cellules. En effet, le retrait volumique, qui regroupe les trois types de retrait, est lié à l'épaisseur des parois de la cellule tandis que le retrait longitudinal dépend essentiellement de l'angle des microfibrilles (Harris et Meylan 1965).

Propriétés mécaniques

Les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) en flexion (Tableau 1-2) sont les deux caractéristiques mécaniques les plus utilisées pour la détermination de la qualité du bois bien qu'il en existe de nombreuses autres (Jessome 1977). Le module d'élasticité, que l'on peut appeler la rigidité, est une mesure de l'aptitude d'une pièce à résister à la déformation sous l'effet d'une charge. Le module de rupture ou résistance, est une mesure

de la capacité maximale de charge supportable par la pièce. Les autres propriétés mécaniques concernent le cisaillement, la compression ou la traction, lesquelles sont principalement mesurées suivant deux directions par rapport au grain; perpendiculaire et parallèle. Chaque caractéristique est importante en raison de l'usage final que l'on fait de la pièce de bois (barreau de chaise, poteau, poutre) et de la direction dans laquelle a été sciée la pièce (orientation radiale, tangentielle ou longitudinale).

Les essais de flexion statique réalisés sur les solives (c'est le cas du classement MSR, *Machine Stress Rating*, bois classé par machine dans les usines de sciage) permettent de déterminer le MOE et d'estimer le MOR rapidement de manière non destructive. D'autres méthodes par propagation d'onde ou vibration sont également utilisées pour la mesure du MOE (Ross et al. 2000). Toutefois, on a noté que, dans le cas des jeunes arbres chez le pin gris, la méthode de propagation d'onde n'est pas fiable en raison des fortes variations radiales d'humidité et de masse volumique (Chui et Zhang 1997).

Le MOE et le MOR sont influencés différemment par la présence des nœuds et cela peut être mis en évidence par l'étude des corrélations existant entre ces deux paramètres (Middleton et al. 1995).

Concernant le bois de dimension, on constate chez l'épinette noire une augmentation du bas vers le haut de l'arbre du MOE et du MOR (Zhang et Chauret 2001). De plus, les variations de MOE et MOR en fonction de la position en hauteur dans l'arbre laissent apparaître une diminution de la corrélation entre ces deux variables. Cette particularité s'explique par la variation en hauteur de la masse volumique du bois mais aussi par la présence plus importante des nœuds en hauteur. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation d'éprouvettes de petite dimension sans nœuds devrait favoriser l'obtention de meilleures corrélations entre le MOE et le MOR.

Certaines propriétés mécaniques comme le cisaillement ou la compression perpendiculaire au fil sont influencées par la proportion de bois juvénile. Sur des petites éprouvettes de bois sans défaut, les facteurs de variation des propriétés mécaniques font plutôt intervenir la microstructure du bois comme l'angle des microfibrilles et la masse volumique. Dans le cas

du bois de structure, Kretschmann (1997) a montré que le bois juvénile est un facteur important d'affaiblissement des propriétés mécaniques.

1.2. Effet de la densité de peuplement sur la qualité du bois

1.2.1. Effet sur la croissance de l'arbre

De nombreuses études réalisées sur différentes espèces montrent que la densité de peuplement joue un rôle sur la croissance de l'arbre, en agissant sur la compétition entre les arbres d'un même peuplement. Lorsque les arbres poussent en peuplement, une compétition s'engage entre ceux-ci pour l'accès aux ressources nécessaires à leur croissance: lumière et substances nutritives. Par conséquent, la croissance du houppier et du tronc pour l'accès à la lumière et celle des racines, pour l'accès aux substances nutritives, sont contrôlées par la densité de peuplement (Zobel et van Buijtenen 1989). Il est également admis que le volume du houppier dépend de la compétition avec les arbres voisins (Raulier et al. 1996). Ainsi, le diamètre du tronc, la hauteur des arbres, leur défilement, la localisation des branches, sont autant d'éléments affectés par l'espacement entre les arbres.

Le diamètre du tronc, la taille du houppier et le diamètre des branches augmentent quand la densité de peuplement diminue. Cela a pour conséquence de réduire le facteur de transformation en sciage de la bille (Zhang et Chauret 2001) par la présence de gros nœuds et d'une plus grande proportion de bois juvénile. Le facteur de transformation en sciage est le rendement en sciage que l'on peut obtenir à partir d'une bille. On note aussi que la présence des nœuds, leur dimension et leur emplacement peuvent affecter beaucoup le classement des sciages (Lemieux et al. 2000).

La diminution du taux de croissance entraîne une augmentation de la longévité des arbres mais cela ne semble pas affecter leur hauteur (Robichaud et Methven 1993). De façon générale, un espacement large entre les arbres favorise une croissance importante des branches, ce qui peut nuire à la qualité du bois (Alazard 1994). En particulier sur des sites pauvres, on privilégie souvent un espacement faible afin d'obtenir du bois de plus grande

valeur (Schonau et Coetzee 1989). Selon ces mêmes auteurs, les effets de l'espacement entre les arbres ont des répercussions sur la mortalité, la hauteur, le diamètre, le volume, la forme de l'arbre et la qualité du bois.

Les contraintes économiques obligent les forestiers à s'interroger sans cesse sur les priorités à accorder entre la qualité du bois et le volume de bois. Parmi les éléments de réponse on peut citer la recherche concernant l'amélioration de la qualité du bois et du volume par la sélection des tiges (Barbour 1991).

1.2.2. Effet sur les caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques

1.2.2.1. Effet sur les caractéristiques anatomiques

Les conditions de croissance agissent sur de nombreuses caractéristiques anatomiques du bois (Makinen et al. 2002, Lu et al. 1997). Ainsi, la longueur des trachéides augmente du bois initial au bois final, car ces deux types de bois correspondent à deux types de périodes de croissance distinctes. Sur le peuplier par exemple, Kasir (1990) note une forte influence de la densité de peuplement sur la longueur des fibres, le diamètre et l'épaisseur de la paroi des fibres, la longueur des vaisseaux et leur diamètre.

Contrairement à la longueur des trachéides, on trouve moins d'informations concernant l'influence de la densité de peuplement sur le diamètre des trachéides et l'épaisseur des parois bien que ces données soient importantes pour l'évaluation de la masse volumique et de la masse linéique des fibres. Sur l'épinette noire, Yang et Hazenberg (1994) ont mis en évidence que les trachéides atteignent leur longueur maximale pour un espacement intermédiaire d'environ 1400 arbres/ha (2,7 m x 2,7 m). Les trachéides les plus courtes appartenaient au peuplement le plus espacé (3,6 m x 3,6 m, environ 770 arbres/ha), c'est-à-dire à croissance plus rapide. Selon la même étude, les peuplements naturels semblent donner des trachéides plus longues que les peuplements aménagés. Par contre, sur l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis*) aucune différence significative de la longueur des trachéides n'a été mise en évidence face à l'augmentation de la densité de peuplement

(Ward et Gardiner 1976). L'effet des conditions de croissance a aussi été mis en évidence chez le pin noir (*Pinus nigra* Arn.) pour lequel on a noté que la longueur des trachéides varie avec la localisation géographique et le statut social de l'arbre (Tsoumis et Panagiotidis 1980). Ainsi, les arbres dominants ont généralement des trachéides plus longues et une plus faible proportion de bois final. Chez l'épinette de Norvège (*Picea abies*) (Herman et al. 1998) il n'a pas été possible de mettre en évidence une influence du taux de croissance sur la longueur des fibres et l'angle des microfibrilles.

Il semble qu'une densité de peuplement élevée pourrait favoriser un passage du bois initial au bois final plus tôt dans la saison. Une étude réalisée chez le pin à encens (*Pinus taeda* L.) montre que la transition du bois initial au bois mature est avancée de deux semaines pour les peuplements qui n'ont pas été éclaircis (Cregg et al. 1988).

La largeur et la surface des cernes sont considérées souvent comme un moyen de quantifier le taux de croissance. On note une influence de la densité de peuplement sur ces deux paramètres (Wang et al. 2000, Zahner et al. 1989) qui tendent à diminuer lorsque la densité de peuplement augmente.

1.2.2.2. Effet sur les caractéristiques physiques

Effet sur la masse volumique du bois

Des études ont montré, comme pour les propriétés anatomiques, que la densité de peuplement affecte les propriétés physiques du bois en particulier sa masse volumique (Bues 1985, Zhang et Chauret 2001, Yang et Hazenberg 1994, Middleton et al. 1996). Il s'agit d'un problème important pour les forestiers car il concerne la stratégie à adopter pour produire du bois dans un temps minimal (densité de peuplement et traitements sylvicoles) tout en préservant sa qualité (masse volumique du bois).

La masse volumique du bois présente une grande variabilité: entre les espèces, entre les arbres d'une même espèce, en hauteur dans l'arbre, de la moelle vers l'écorce, et du bois initial au bois final (Zobel et van Buijtenen 1989, Jozsa et Middleton 1994). Cette

variabilité peut s'expliquer par des facteurs génétiques, mais aussi par les conditions de croissance. L'espacement entre les arbres, en tant que composante des conditions de croissance, agit sur la masse volumique du bois. Les traitements sylvicoles comme l'éclaircie affectent également la masse volumique du bois, c'est le cas par exemple du pin radiata où l'on constate une diminution de masse volumique l'année qui suit une forte éclaircie (Bues 1985).

L'impact de l'espacement entre les arbres sur les caractéristiques du bois et en particulier sur la masse volumique du bois de l'épinette noire a été mis en évidence mais nécessite des recherches complémentaires. En dessous de 1400 arbres/ha, la masse volumique du bois diminue significativement lorsque la densité de peuplement diminue, par contre pour des densités de peuplement plus fortes il n'y a pas de différence de masse volumique du bois (Zhang et Chauret 2001). Selon une étude de Yang et Hazenberg (1994), la masse volumique du bois la plus élevée trouvée sur l'épinette noire correspondait à un peuplement dont l'espacement entre les arbres était 1,8 m x 1,8 m, que l'on peut considérer comme dense (environ 3000 arbres/ha). Sur l'épinette de Sitka également, la densité de peuplement la plus forte correspondant à un espacement de 2,4 m x 2,4 m (environ 1730 arbres/ha) a donné le bois de masse volumique la plus élevée (Ward et Gardiner 1976). On aboutit aux mêmes conclusions sur l'épinette de Norvège pour laquelle on note que le bois le plus dense provient d'un peuplement faiblement espacé (1,5 m x 1,5 m) et dont les arbres dominés ont la masse volumique la plus élevée (Johansson 1993). On note que la relation entre la densité de peuplement et la masse volumique du bois reste très variable d'une espèce à l'autre.

Effet sur le retrait

Il existe des liens entre la masse volumique du bois et le retrait du bois (Mazet et Nepveu 1991, Zhang et al. 1994). Donc, du fait que la densité de peuplement a une influence sur la masse volumique du bois, on peut s'attendre à un effet de la densité de peuplement sur le retrait, en particulier sur les retraits radial et tangentiel qui dépendent en partie de la masse volumique du bois.

Une étude réalisée par Koshy et Lester (1997) a établi que sur des sapins Douglas de dix-huit ans, les corrélations entre le taux de croissance et le retrait étaient faibles sauf pour le retrait longitudinal près de la moelle. Enfin, chez le pin d'Elliott (*Pinus elliottii*) il apparaît que l'espacement large entre les arbres favorise non seulement une augmentation du retrait, mais aussi il favorise l'augmentation du ratio T/R (Xu et al. 2002).

1.2.2.3. Effet sur les caractéristiques mécaniques

De manière générale, on peut considérer que la densité de peuplement affecte les modules d'élasticité et de rupture. D'une part, on a trouvé chez le pin tordu (*Pinus contorta*) que les MOE et MOR diminuent si le diamètre des arbres à hauteur de poitrine augmente (Middleton et al. 1995). D'autre part, l'étude a montré que les arbres provenant de la classe de densité de peuplement intermédiaire (1100 arbres/ha) procuraient le meilleur classement pour le bois de dimension.

Chez le pin à encens (*Pinus taeda*), Clark et al. (1994) ont trouvé que l'effet de l'éclaircie sur l'amélioration de la qualité du bois de dimension était meilleur pour des peuplements peu espacés (1,8 m x 1,8 m, soit 3000 arbres/ha). Dans ce cas particulier, l'effet combiné de l'espacement initial et de l'éclaircie montre que les densités de peuplement élevées donnent un bois de plus grande résistance mécanique.

Chez l'épinette noire, on a démontré que les arbres provenant d'un peuplement peu dense procuraient du bois de dimension dont le module de rupture était plus faible que pour les arbres récoltés dans des peuplements plus denses (Zhang et Chauret 2001). De plus, selon la même étude, on a montré que le MOR est plus faible si la classe de diamètre à hauteur de poitrine est élevée. Pour la classe de densité 1400 arbres/ha on obtient, selon les données de cette étude, un MOR moyen de 37 MPa et un MOE de 8200 MPa à 12% d'humidité d'équilibre hygroscopique. Au-delà de 2000 arbres/ha le MOR et le MOE se stabilisent respectivement à 47 MPa et 9600 MPa.

Enfin, il a été démontré sur le pin jaune que la densité de peuplement avait une influence significative sur le module d'élasticité (MOE) (Biblis et al. 1995), mais n'avait pas d'influence sur le module de rupture (MOR) (Biblis et al. 1997).

1.3. Relations entre les caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques du bois

1.3.1. Relations entre la structure anatomique et les propriétés physiques

1.3.1.1. Deux approches pour la transition du bois initial au bois final

On peut utiliser deux approches pour déterminer la transition du bois initial au bois final. La première fait intervenir la structure anatomique et la deuxième concerne la masse volumique. Plusieurs caractéristiques anatomiques comme l'angle des microfibrilles dans la paroi cellulaire, la longueur des trachéides, le diamètre des cellules en coupe transversale, présentent un profil intra cerne particulier du bois initial au bois final. Ainsi, selon Mork (1928), on peut définir le passage du bois initial au bois final en étudiant l'épaisseur radiale de la paroi des trachéides (Denne 1989). Cette transition a été définie comme le moment où l'épaisseur de la paroi commune à deux trachéides est supérieure à la moitié de la largeur du lumen. La détermination de la transition est plus difficile dans le cas des espèces à transition graduelle que pour les espèces à transition abrupte. La détermination de cette transition est très importante afin d'étudier séparément le bois initial et le bois final dont les propriétés sont différentes.

A partir des profils de masse volumique aux rayons X, le point de transition a été défini comme le point d'inflexion sur la courbe de masse volumique (Koubaa et al. 2002). Ce point est souvent défini comme le moment où la masse volumique atteint une valeur fixe, comprise entre 400 et 550 kg/m³ dépendant de l'espèce considérée, 540 kg/m³ chez l'épinette noire (Koubaa et al. 2002, Jozsa et al. 1987), ou bien une valeur moyenne entre la masse volumique maximale et la masse volumique minimale du cerne (Sauter et al. 1999).

1.3.1.2. Effet de l'angle des microfibrilles sur le retrait

Le rôle de l'angle des microfibrilles sur le retrait a été mis en évidence très tôt, et il a été montré qu'il est un déterminant de l'anisotropie du retrait (Harris et Meylan 1965). Dans le bois juvénile, le retrait longitudinal diminue de la moelle jusqu'au dixième cerne chez l'épinette de Norvège (Saranpaa et Karkainen 1990). Généralement, le retrait longitudinal est associé à l'angle des microfibrilles (Harris et Meylan 1965) en particulier pour le bois de compression (Harris 1977). Mais il a également été suggéré que d'autres facteurs autres que l'angle des microfibrilles dans la couche S2 pouvaient influencer le retrait longitudinal (Megraw et al. 1998). De façon générale, on montre qu'il y a une bonne relation entre l'angle des microfibrilles et le retrait longitudinal et que ce dernier dépend de la position du cerne et de la hauteur. On note par exemple sur l'épinette de Sitka, une diminution parallèle de l'angle des microfibrilles et du retrait longitudinal de la moelle vers l'écorce (Cowdrey et Preston 1966).

1.3.1.3. Dimension des trachéides et masse volumique

Denne et Hale (1999) ont montré que l'augmentation de la masse volumique dans le bois juvénile est associée à une augmentation de la proportion massique des tracheides. De plus, il ressort de leur étude que la masse volumique dans le bois mature est soumise aux variations du pourcentage de paroi cellulaire et de lumen. Il a également été mis en évidence chez le sapin Douglas des corrélations entre la masse volumique, le pourcentage de paroi cellulaire et le pourcentage de bois final (Kort-de et al. 1991).

Nicholls (1984) a également remarqué la présence d'une forte corrélation entre la masse volumique du bois, mesurée par rayons X, et la proportion de paroi cellulaire mesurée sur des sections transversales. La masse volumique maximale et minimale du cerne est liée à la dimension transversale des trachéides, en particulier la masse volumique minimale est liée à la largeur de la trachéide et la masse volumique maximale est liée à l'épaisseur de la paroi (Nicholls 1984). De plus on constate que la masse volumique est plutôt affectée par les

changements de dimension radiale de la largeur des trachéides et de la paroi des trachéides que par les changements en direction tangentielle.

1.3.1.4. Effet des rayons sur le retrait

L'importance de l'effet des rayons sur le retrait radial a été mise en évidence très tôt pour certaines espèces feuillus (Morschauser et Preston 1954). Il ressort de ces études que le retrait radial est partiellement bloqué par la présence des rayons, d'où la faiblesse du retrait radial par rapport au retrait tangentiel. Néanmoins, quelques théories incluant la structure des cellules peuvent expliquer l'anisotropie du retrait (Koponen et al. 1991, Gu et al. 2001).

1.3.1.5. Liens entre la largeur des cernes, la longueur des trachéides et la masse volumique du cerne

Il semble y avoir une corrélation négative entre la largeur des cernes et la longueur des fibres (Dutilleul et al. 1998, Ward et Gardiner 1976). Donc plus la croissance est rapide, plus les fibres sont courtes. On constate que les relations entre la masse volumique du bois, la masse linéique des fibres et l'épaisseur des parois sont très fortes dans le bois initial, mais plus faibles dans le bois final (Evans 1994). De manière générale, selon le même auteur, la masse linéique des trachéides n'est pas bien corrélée à la masse volumique du bois. Pourtant, il semble que la longueur des fibres soit liée à la masse volumique du bois chez le pin sylvestre (Babos 1973) de même que l'épaisseur des parois et que ces deux paramètres augmentent avec l'âge cambial. Diaz-Vaz-Olmedo et al. (1975) ont réalisé des travaux chez le sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et le pin lodgepole (*Pinus contorta*) montrant ce genre de corrélations entre la masse volumique et la paroi cellulaire dans le bois initial et le bois final.

La plus grande importance que l'on peut accorder à la largeur des cernes est son lien avec la masse volumique du bois (Dutilleul et al. 1998, Kort-de et al. 1991, Parker et al. 1978,

Zhang 1997a, Koga et Zhang 2002). La corrélation est négative et significative pour les arbres à croissance lente mais non significative pour les arbres à croissance rapide (Dutilleul et al. 1998). De plus, les relations entre la masse volumique du bois et la largeur des cernes dépendent de l'âge cambial (Koga et Zhang 2002).

1.3.2. Relations entre la structure anatomique et les propriétés mécaniques

1.3.2.1. Importance de l'angle des microfibrilles

On constate que c'est la structure même de la paroi cellulaire qui a l'effet le plus important sur les propriétés mécaniques. En effet, Booker et al. (1998) ont trouvé de fortes relations entre l'angle des microfibrilles et la résistance mécanique du bois. En fait, les propriétés mécaniques des fibres du bois sont elles-mêmes étroitement liées à l'angle des microfibrilles (Sahlberg et al. 1997). Dans le cas du bois de compression, l'effet conjugué de l'angle des microfibrilles élevé et la masse volumique élevée entraîne un module d'élasticité plus faible qu'il ne le serait dans du bois normal.

Certains travaux ont été conduits afin de modéliser la structure anatomique et expliquer le comportement mécanique du bois (Guitard et Gachet 2004, Perkins 1973). Il ressort d'une étude que l'angle des microfibrilles et l'épaisseur des parois expliquent mieux la variation des propriétés mécaniques que si l'on considère seulement l'angle des microfibrilles (Cave 1976).

1.3.2.2. Importance des autres facteurs

Le bois présente une structure anatomique complexe dans laquelle les tissus sont orientés longitudinalement et radialement formant, par accumulation, des cernes annuels concentriques. Celle-ci peut avoir une influence sur les propriétés mécaniques du bois selon le plan considéré, transversal, tangentiel ou radial. Les contraintes en compression ou en traction par exemple ne sont pas les mêmes dans les différents plans. Le module d'élasticité

également n'est pas le même selon que l'essai a lieu dans le sens des fibres ou non. Ces considérations montrent à quel point la structure a plus d'importance que le matériau lui-même pour expliquer les propriétés mécaniques du bois (Schniewind 1962). On peut citer d'autres travaux sur les épiceas (Iablokoff 1955) qui montrent l'importance des relations entre les caractéristiques anatomiques et les propriétés mécaniques du bois. Toutefois, certaines propriétés mécaniques, comme le MOE, sont mieux expliquées par la masse volumique du bois que par la structure anatomique elle-même (Beery et al. 1983).

Parmi les autres facteurs influençant les propriétés mécaniques du bois on trouve les substances extractibles (Arevalo 2002, Pizzi et Cameron 1986), mais aussi le rôle des rayons sur les propriétés mécaniques et sur le retrait radial (Keller et Thiercelin 1975, Beery et al. 1983). Le bois juvénile, caractérisé par une structure anatomique différente de celle du bois mature, a également une influence sur les propriétés mécaniques du bois chez le pin lodgepole (Kretschmann 1997).

1.3.3. Relations entre la masse volumique du bois et les propriétés mécaniques

Koubaa et al. (1997) ont montré qu'il existe chez le peuplier hybride des corrélations entre diverses caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques, et en particulier ils ont mis l'accent sur l'importance de la masse volumique pour prédire les autres caractéristiques. De manière générale, les relations entre la masse volumique du bois et les propriétés mécaniques varient beaucoup selon l'espèce étudiée, et le type de bois étudié (Zhang 1994). On constate néanmoins que la masse volumique du bois est liée positivement à sa résistance (Keller 1968), et on considère même que la masse volumique du bois est l'indicateur de base des propriétés mécaniques du bois (Yang et Lu 1997). Chez le pin lodgepole par exemple, on a mis en évidence la relation existant entre la masse volumique moyenne des arbres et le classement MSR que l'on peut obtenir de leurs sciages (Gonzalez et al. 1997).

Les corrélations entre la masse volumique du bois et sa rigidité établies dans une étude sur les bois de dimension concernant le pin de Murray (Middleton et al. 1995) ont montré un coefficient de détermination variant de 0,36 à 0,64 en fonction de la densité de peuplement. L'étude dévoile que la densité de peuplement la plus élevée permet d'obtenir une corrélation entre MOE et MOR plus forte et un MOE plus fort. Selon l'auteur cela peut s'expliquer par le volume moindre des nœuds présents dans les arbres des peuplements denses.

1.4. Transition du bois juvénile au bois mature

1.4.1. Définition

Le bois juvénile, que l'on oppose au bois mature, est le bois formé dans la cime vivante. Lorsque la croissance est rapide ou lorsque l'arbre est isolé (arbre de champ), il se forme une plus grande proportion de bois juvénile due au développement de la cime vivante.

Il diffère du bois mature pour de nombreuses propriétés (Bao et al. 2001, Barbour 1987). Ainsi, la longueur des fibres, l'angle des microfibrilles, la masse volumique, le retrait longitudinal, la largeur des cernes, la résistance mécanique, sont autant de facteurs qui marquent une différence entre le bois juvénile et le bois mature. On note par exemple que sa masse volumique est plus faible, que les fibres sont plus courtes et que la quantité de cellulose est légèrement plus faible.

Mais parmi ces propriétés, seules quelques unes permettent de trouver de manière précise l'âge cambial où a lieu la transition. Ainsi, si l'on utilise les profils de masse volumique de la moelle vers l'écorce, c'est la masse volumique du bois final qui va donner les meilleurs résultats (Sauter et al. 1999). On trouve un exemple particulier de détermination de la transition du bois juvénile au bois mature chez le frêne en utilisant la courbe de variation radiale du diamètre des vaisseaux dans le bois initial (Helinska-Raczkowska et Fabisiak 1997). Les auteurs distinguent même deux zones dans le bois juvénile, désignant ainsi l'une des principales difficultés de la détermination de la transition.

L'intérêt d'étudier l'âge de transition est de pouvoir déterminer la quantité de bois juvénile produite par l'arbre mais aussi de comprendre quels sont les processus, internes et externes, qui provoquent le passage du bois juvénile au bois mature. Pour le premier, il s'agit essentiellement d'un intérêt commercial visant à exprimer la valeur d'un arbre en fonction de sa proportion de bois juvénile du fait que ce type de bois est peu désirable. Pour le deuxième, il s'agit plutôt de considérations biologiques qui peuvent être intéressantes pour l'amélioration de la croissance des arbres.

1.4.2. Effet de l'espacement entre les arbres sur l'âge de transition

Il a été démontré que les propriétés du bois juvénile et du bois mature sont affectées différemment par l'espacement entre les arbres (Yang et Hazenberg 1994). En particulier, le taux de croissance du bois juvénile semble être le plus sensible aux variations de densité de peuplement. On note aussi que l'âge de démarcation est en partie sous contrôle génétique (Abdel-Gadir et Krahmer 1993b).

Des études ont montré que l'âge de transition du bois juvénile au bois mature se produit dans une tranche d'âge assez large (Bendtsen 1978), ce qui rend difficile la détermination d'un âge exact. Par exemple, sur le pin sylvestre, l'âge de transition a été déterminé avec une marge d'erreur de 5 à 7 ans (Sauter et al. 1999). Cela implique donc l'utilisation d'une méthode d'analyse de profils en fonction de l'âge cambial, dont les régressions linéaires segmentées constituent une technique éprouvée (Abdel-Gadir et Krahmer 1993a).

Généralement, les peuplements denses ont une proportion de bois juvénile plus faible du fait de leur faible taux de croissance, mais cela ne signifie pas que le bois juvénile se soit développé dans un temps plus court que celui d'arbres provenant de peuplements moins denses. Principalement, on note que le nombre de cernes du bois juvénile augmente lorsque l'espacement entre les arbres augmente, mais aussi que le taux de croissance dans le bois juvénile dépend beaucoup de l'espacement (Yang 1994). Mais il a été montré aussi que l'espacement initial ne semble pas avoir d'influence sur la période de production de bois juvénile (Kucera 1994, Clark et Saucier 1989) alors qu'il affecte le diamètre de celui-ci. Il

reste donc une incertitude concernant l'effet de la densité de peuplement sur la transition du bois juvénile au bois mature.

1.4.3. Effet de la hauteur dans l'arbre sur l'âge de transition

Concernant l'effet de la hauteur dans l'arbre sur l'âge de transition, peu d'information est disponible à ce sujet. Néanmoins, le fait que l'on ait, très tôt, accepté l'idée que la forme du bois juvénile serait plutôt conique que cylindrique (Zobel et al. 1959), laisse présager que la hauteur dans l'arbre a un effet sur l'âge de transition.

1.5. Objectifs de l'étude

1.5.1. Objectif général

L'objectif principal de l'étude est d'examiner l'influence de la densité de peuplement sur les caractéristiques du bois. Cela consiste à établir un profil radial de la moelle vers l'écorce des caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques du bois considérées comme critère de qualité, et de les étudier en fonction de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre. Ces caractéristiques sont :

- la proportion de paroi cellulaire dans le bois initial et le bois final
- les caractéristiques de masse volumique et de largeur des cernes
- le retrait radial et tangentiel
- le profil radial du MOE et du MOR

1.5.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont de mettre à jour les relations entre la structure anatomique, la masse volumique et les propriétés mécaniques du bois chez l'épinette noire et d'expliquer les liens entre ceux-ci. L'étude doit mettre en évidence également les différences entre le bois juvénile et le bois mature.

Enfin, on souhaite déterminer le caractère juvénile du bois par l'examen de diverses propriétés anatomiques, physiques et mécaniques, et comparer l'âge de transition du bois juvénile au bois mature pour différentes densités de peuplement et à différentes hauteurs de l'arbre.

Chapitre 2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel

2.1.1. Choix des arbres

Trente-six arbres ont été récoltés dans la région de Chibougamau, à 400 km au nord de Quebec dans un peuplement dont la densité moyenne est de 1967 arbres/ha (Horvath 2002) (Tableau 2-1). Il s'agit d'un peuplement régénéré naturellement après un incendie en 1906, n'ayant subi aucune intervention humaine, et dont les arbres ont presque le même âge et la même hauteur mais sont répartis aléatoirement sur le terrain. L'espacement entre les arbres est relativement faible mais il est aussi très variable. La superficie étudiée est d'environ un demi hectare.

L'indice de Schütz (Figure 2-1) a été utilisé pour déterminer la distance entre deux arbres pour que ceux-ci soient considérés comme compétitifs. Il s'avère très pratique à utiliser en forêt (Ung et al. 1997) et ne fait pas intervenir le diamètre de l'arbre concurrent. Les calculs préliminaires à partir de cet indice ont permis d'établir à 4 m le rayon de compétition.

L'indice de Schütz est calculé à partir de deux composantes de la compétition, l'une horizontale et l'autre verticale.

$$Schütz = \sum_{v=1}^{n} (kVer + Hor)$$

Avec $Ver = \frac{(H_v - H_c)}{D_{v,c}}$; $Hor = 0{,}5 - \frac{E_{v,c}}{D_{v,c}}$ and k=0,65

L'arbre voisin est considéré comme compétiteur si $E_{v,c} \leq 0{,}5D_{v,c} + 0{,}65(H_v - H_c)$

En considérant que les arbres ont la même hauteur (H_v=H_c) et que la cime a en moyenne un rayon de 1m ($D_{v,c}$=2) nous avons donc choisi un rayon de 4m.

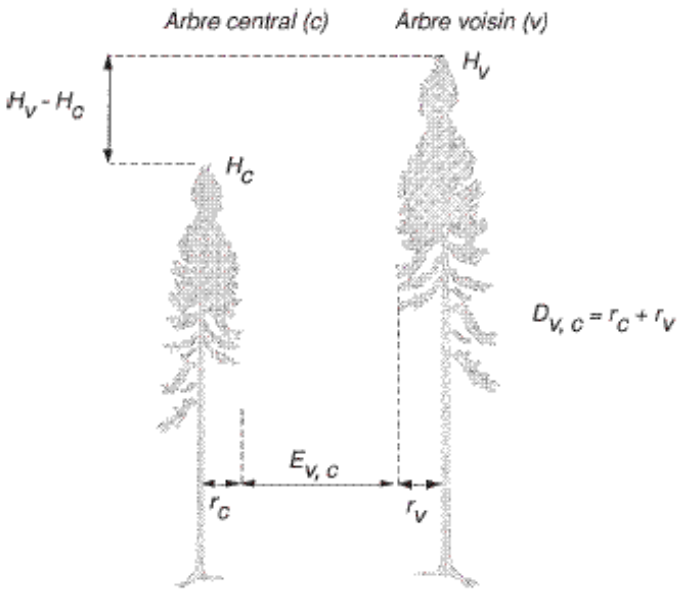


Figure 2-1. Indice de compétition de Schütz (D'après Ung et al. 1997)

Chaque arbre a été caractérisé par une densité locale de peuplement définie comme le rapport du nombre d'arbres présents dans le cercle de rayon 4 m et la superficie de ce cercle. Les arbres morts ou de moins de 8 cm de diamètre ont été écartés du décompte du fait de leur faible participation en tant que compétiteur. Les trente-six arbres de l'étude ont ensuite été répartis dans trois groupes de densité de peuplement mais, la densité locale de peuplement étant très variable, il résulte une certaine variabilité à l'intérieur de chaque groupe (Tableau 2-2).

Tableau 2-1. Données sur la parcelle établies en 1996 (Horvath 2002).

Perturbation	**Age à la souche**	**Arbres/ha**	**Hauteur moyenne des arbres**	**Diamètre à hauteur de poitrine**
Feu (1906)	79 ans	1967	13,8 m	16,3 cm
Exposition	**Drainage**	**Latitude**	**Longitude**	**Surface terrière**
Nord Est	mésique	49°21’42’’	75°05’40’’	41,3 m²

Chaque arbre voisin de l’arbre étudié dans un rayon de 4 m, a été mesuré en diamètre à hauteur de poitrine et caractérisé par sa distance et l’azimut par rapport à l’arbre central. Pour chaque arbre principal on a mesuré la hauteur totale, la hauteur et la largeur du houppier, et le diamètre à hauteur de poitrine. Le côté sud de l’arbre a été déterminé à l’aide d’une boussole et marqué sur le tronc.

Tableau 2-2. Description des trois groupes de densité de peuplement. Les groupes sont statistiquement différents au seuil de probabilité de 1%.

Densité de peuplement (t/ha)	1790	2700	3400
Moyenne	1791	2700	3405
Maximum	2189	2985	3582
Minimum	1393	2388	3184
CV (%)	14,3	8,0	5,4
Nombre d’arbres	12	12	12

La présence de nombreux arbres morts suggère que la densité de peuplement pendant toutes ces années de croissance a probablement été différente de celle que l'on a mesurée sur les lieux 83 ans après, en 1999 au moment de la récolte des arbres. Toutefois, une simulation sur le logiciel SDMD de simulation de gestion de peuplement (Stand Density Management Diagram SDMD Version 3.1 MNR Copyright (C) September 2001) (Appendice 1 : Figures 6-5 et 6-6) semble montrer que le peuplement se situe temporellement entre la phase à croissance maximale et la phase de sénescence.

Bien que les peuplements soient issus de feu, donc qu'ils aient été régénérés sur un très court laps de temps, on constate une certaine variabilité entre les arbres concernant leur hauteur, leur diamètre et la datation de la moelle à hauteur de 2,4 m (Appendice 2 : Tableau 6-3, Figure 6-7). En particulier on note une différence maximale de 10 ans entre l'arbre le plus vieux et l'arbre le plus jeune de l'échantillonnage, et l'on constate que les arbres les plus vieux ont tendance à être plus grands et plus gros (Appendice 2 : Figure 6-8).

2.1.2. Découpage des billes

Chaque arbre a été ébranché et découpé sur le terrain en trois billes de 2,7 m (Figure 2-2). La partie supérieure de chaque bille a été elle-même recoupée au sommet pour prélever un billon d'une longueur de 30 cm environ.

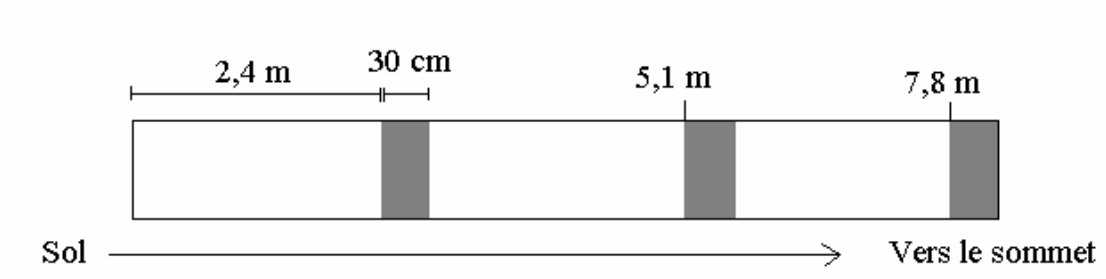


Figure 2-2. Découpage des arbres en trois billes de 2,7 m de longueur.

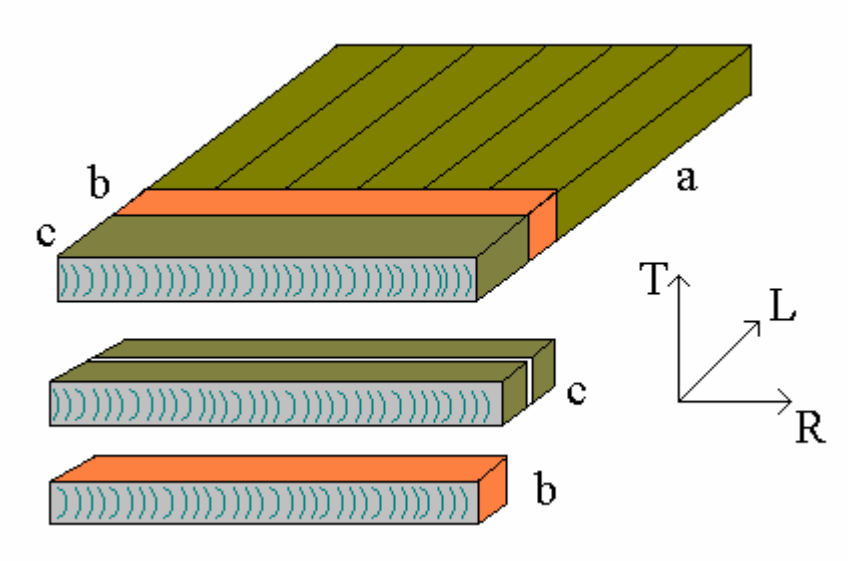


Figure 2-3. Préparations des échantillons pour a) les essais de flexion, b) l'anatomie et c) la densitométrie.

2.1.3. Préparation des échantillons pour la densitométrie

Une planche radiale d'un centimètre d'épaisseur a été prélevée, par sciage à la scie à ruban, dans le centre du billon dans la direction Sud-Nord. Celle-ci a été ensuite recoupée en trois parties, dont la partie supérieure a servi à la préparation des bandes de bois pour les mesures densitométriques (Figure 2-3).

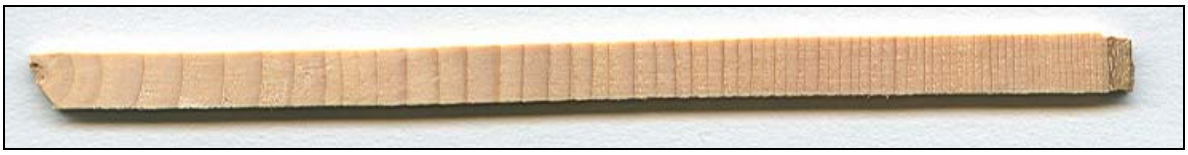


Figure 2-4. Photo d'un échantillon pour la densitométrie.

L'échantillon final est obtenu à l'aide d'une double scie qui permet d'avoir une bande régulière de 1,57 mm d'épaisseur dans la direction longitudinale (Figure 2-4). L'épaisseur constante des échantillons est une condition nécessaire à la qualité des résultats puisque la mesure de la densité s'effectue par mesure de l'absorption des rayons X qui dépend de l'épaisseur du matériau traversé par le rayon. Les échantillons ont été régulièrement mesurés au pied à coulisse.

Les échantillons sont traités dans un mélange d'alcool et cyclohexane pendant 24 heures puis 24h dans l'eau bouillante pour enlever les substances extractibles. Ils sont ensuite rincés et séchés à l'air libre sous une charge dans la chambre du densitomètre.

2.1.4. Préparation des coupes minces

Les échantillons pour l'étude anatomique sont des coupes minces découpées en laboratoire à l'aide d'un microtome. A partir de la planche radiale vue précédemment, on prélève la partie supérieure qui est découpée en cubes d'environ 1 cm de largeur dans la direction radiale. On découpe autant de cube que la longueur de l'échantillon le permet. Les cubes sont immergés et soumis à des cycles de vide atmosphère afin de les imprégner d'eau et les rendre plus faciles à couper.

Des coupes de 20 µm d'épaisseur ont été prélevées sur chaque cube dans le plan transversal. Ces coupes minces ont subi une série de traitements dans l'eau de javel, l'alcool et le toluène, avant d'être fixées sur une lame de verre avec une solution de Permount (Figure 2-5). Elles ont été réalisées en plusieurs exemplaires afin de s'assurer d'avoir la meilleure qualité de coupe lors de l'observation sous le microscope.

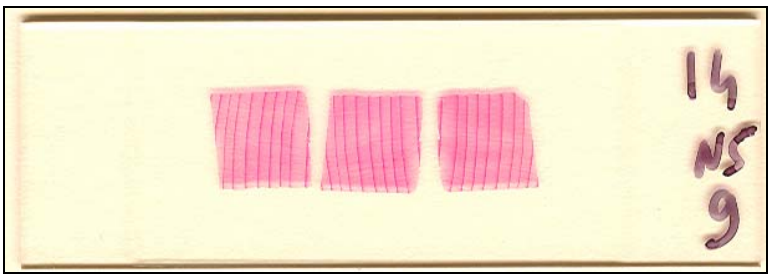


Figure 2-5. Exemple de coupes minces montées sur lame.

2.1.5. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes ont été fabriquées à partir de la planche radiale décrite au paragraphe 2-1-3 (Figure 2-2), en découpant longitudinalement celle-ci à chaque centimètre dans la direction radiale à partir de la moelle afin d'avoir autant d'éprouvettes que le diamètre de l'arbre le permet. Les éprouvettes initialement à 30 cm ont été recoupées à la longueur de 150 mm en enlevant autant que possible les défauts apparents comme les nœuds. On s'est assuré également que les cernes soient parallèles aux cotés des éprouvettes. Néanmoins, cela n'a pas été possible pour les éprouvettes situées près de la moelle dont les cernes ont un petit rayon de courbure. Les éprouvettes ont été découpées à la scie à panneaux, réglée pour obtenir des échantillons de même taille.

Ces éprouvettes de dimension 10 x 10 x 150 mm^3 à l'état vert ont été conservées dans une chambre froide jusqu'au moment des premières mesures de retrait.

Les éprouvettes ont été fabriquées à partir des 36 arbres (trois groupes de densité de peuplement) aux trois hauteurs étudiées et de la moelle vers l'écorce.

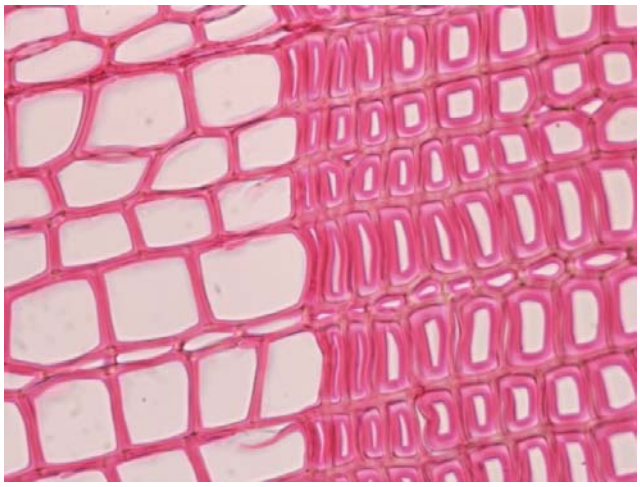


Figure 2-6. Photo d'une coupe transversale à cheval sur deux cernes, grossissement 100x.

2.2. Méthodes

2.2.1. Mesure des caractéristiques anatomiques

Les photos ont été prises à cheval sur deux cernes consécutifs (Figure 2-6). Cela permet de séparer plus facilement le bois initial et le bois final. Tous les cernes de la moelle vers l'écorce ont été photographiés à deux emplacements à l'aide d'un microscope à caméra digitale. Les analyses des photos ont été effectuées avec le logiciel WinCell de Régent Instruments® dans le bois final et le bois initial. L'analyse est basée sur les couleurs et les contrastes entre le lumen et la paroi cellulaire. Les données recueillies sont la surface moyenne des lumens, la surface totale de la paroi cellulaire et la surface totale de lumen dans le plan transversal.

2.2.2. Mesure de l'angle des microfibrilles

L'angle des microfibrilles a été mesuré sur douze échantillons seulement, au CSIRO Forestry and Forest Products Department en Australie à l'aide du procédé SilviScan®. Les échantillons qui font 1 cm² de section et ont une longueur égale à la dimension radiale, ont été traités dans l'alcool dilué, puis dans l'alcool pur, pour les déshydrater.

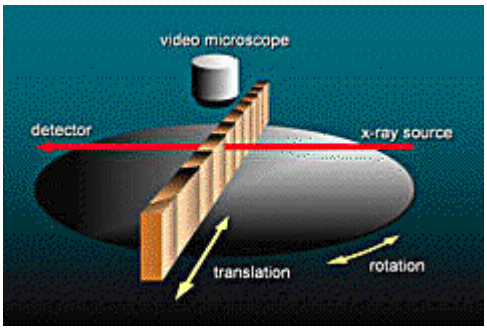


Figure 2-7. Schéma du système de mesure de l'angle des microfibrilles (SilviScan ®).

Ils ont ensuite été recoupés, au CSIRO-FFP, aux dimensions tangentielles et longitudinales respectives de 2 mm et 7 mm. L'angle des microfibrilles peut être mesuré par diffraction des rayons X ou par spectroscopie à infrarouge (Schimleck et Evans 2002). Dans le cas présent, c'est la diffraction des rayons X qui a été utilisée. L'échantillon est placé sur un goniomètre et les rayons X traversent l'échantillon perpendiculairement au plan radial-longitudinal, un système d'analyse d'image permet d'effectuer la mesure (Figure 2-7). Les mesures ont été effectuées avec une résolution de 2 mm. La valeur donnée est une moyenne de l'angle des microfibrilles sur chaque espacement de 2 mm, bois initial et bois final compris.

2.2.3. Densitométrie aux rayons X

Les échantillons ont été placés dans le densitomètre équipé d'une caméra vidéo. Les mesures commencent sur la moelle et se poursuivent vers l'écorce. Le logiciel de l'appareil permet d'enregistrer toutes les valeurs obtenues du début de l'acquisition jusqu'à la fin à chaque intervalle de 0,0025 mm. Les données brutes fournies par l'appareil (Figure 2-8) sont ensuite recalculées dans Excel à l'aide d'une macro (Appendice 3) qui permet de décomposer le profil brut en une série de cernes caractérisés par leur densité, leur largeur, leur densité et leur largeur dans le bois initial et le bois final, leur densité maximale, et leur densité minimale.

La principale raison pour laquelle on recalcule les données dans Excel est que le logiciel de l'appareil travaille à partir d'une définition de la transition du bois juvénile au bois mature qui s'avère inutilisable dans notre cas. Celle-ci est fixée arbitrairement par l'appareil à 0,54 (Jozsa et al. 1987) or la transition du bois initial au bois final a lieu dans de nombreux cas au-dessous ou au-dessus de cette valeur. La définition adoptée dans notre étude pour le point de transition est le moment où la courbe de densité intra cerne passe par un point d'inflexion (Figure 2-9) (Koubaa et al. 2002).

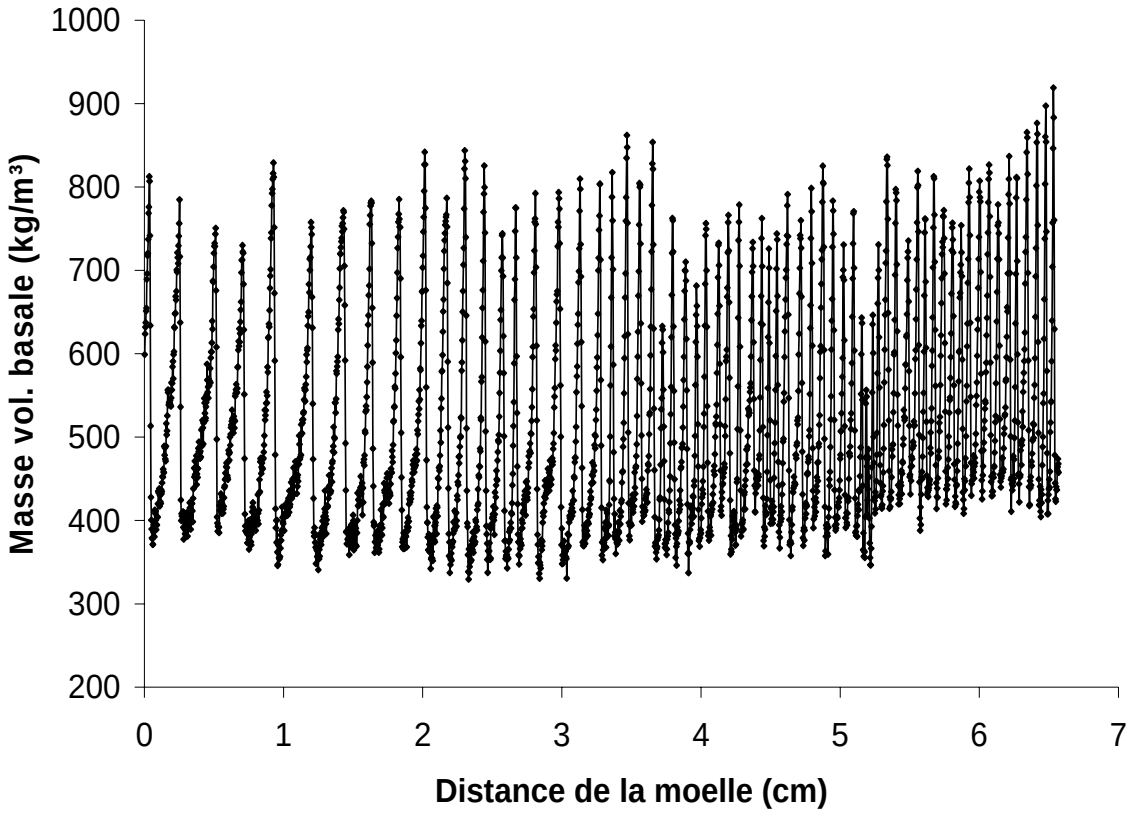


Figure 2-8. Exemple d'un profil brut de masse volumique basale.

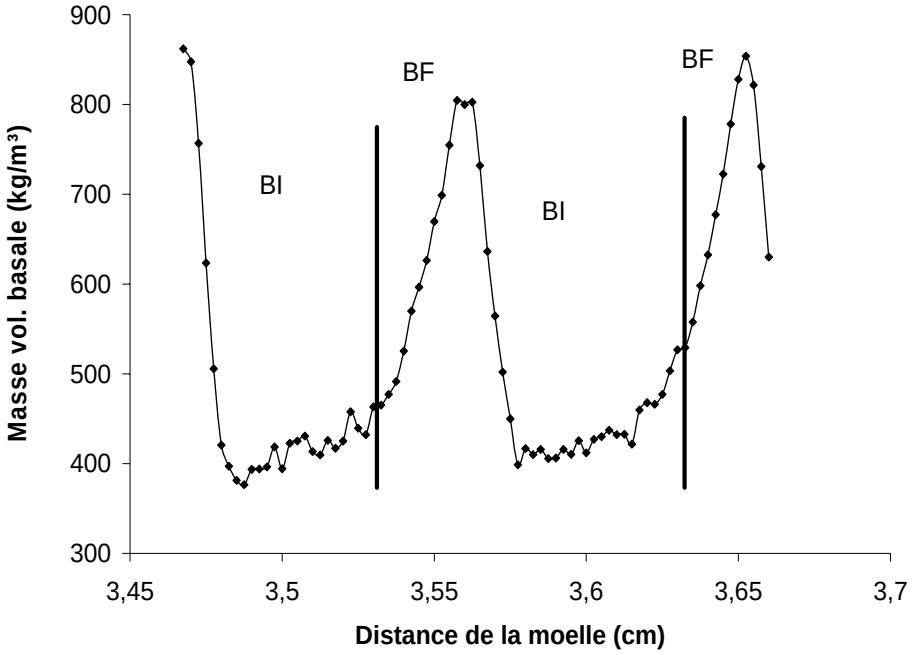


Figure 2-9. Décomposition du profil brut de densité en cernes individuels et détermination de la transition du bois initial (BI) au bois final (BF).

2.2.4. Mesure du retrait

Le retrait a été mesuré sur les éprouvettes dans une chambre de conditionnement dont le réglage (65% d'humidité relative, 20°C) permet d'obtenir une humidité d'équilibre hygroscopique de 13.6%. Les éprouvettes à l'état vert ont été placées dans cette chambre sous une charge afin de limiter les déformations et ont été mesurées chaque jour jusqu'à stabilisation de leur poids. Le retrait a été mesuré pour une variation de la teneur en humidité de l'état saturé des fibres jusqu'à 13.6%.

Les trois types de retrait, radial, tangentiel et longitudinal ont été mesurés à l'aide d'un micromètre de précision (0,001 mm) relié à un ordinateur pour une acquisition plus rapide des données. Lors de la mesure, les éprouvettes ont été placées dans un gabarit afin de réduire l'effet de la déformation.

2.2.5. Essais de flexion

Les essais de flexion ont été réalisés sur un banc de flexion trois points selon la norme ASTM D-143 des éprouvettes de petite dimension, sans défauts, à 13.6% d'humidité d'équilibre hygroscopique. Les éprouvettes ont été disposées sur le banc de flexion avec les cernes orientés horizontalement et le coté de la moelle dirigé vers le haut. Pour les éprouvettes proches de la moelle, présentant un faible rayon de courbure des cernes, il était impossible de discerner la position verticale ou horizontale des cernes. Néanmoins, il y a pas de variation significative selon que l'éprouvette est testée dans un sens ou dans l'autre pour ces éprouvettes selon des tests préliminaires. Par contre pour les autres éprouvettes, et selon les tests préliminaires il y a une plus grande valeur du MOE lorsque les cernes sont présentés verticalement. Deux séries de mesures ont été effectuées, l'une dans le domaine élastique uniquement, et l'autre allant jusqu'à la rupture.

L'appareil utilisé est un MTS de charge maximale 5 kN. Les essais ont été effectués avec une cellule de charge 1 kN et les données sont traitées automatiquement par le logiciel Testworks Version 4.02.

2.2.6. Analyses statistiques

La plus grande partie du travail a consisté à traiter statistiquement les données. Pour cela plusieurs techniques ont été utilisées à l'aide du logiciel SAS.

La première partie de l'analyse se base sur des observations des graphiques représentant les variations radiales de la moelle vers l'écorce des différentes caractéristiques étudiées en fonction de l'âge cambial. Les analyses graphiques ont permis une comparaison rapide des trois densités de peuplements et des trois hauteurs.

L'analyse de la variance a ensuite permis de renforcer nos conclusions et a été utilisée selon les cas dans le bois juvénile et le bois mature. En effet, on a constaté que pour certaines propriétés comme la densité des cernes, il valait mieux séparer dans notre analyse le bois juvénile et le bois mature afin de tirer des conclusions plus précises. Alors qu'une analyse

sur l'ensemble du profil pouvait aboutir à un résultat négatif, on a constaté qu'elle pouvait montrer un résultat significatif dans le bois juvénile ou le bois mature. De la même façon les différences entre groupes de densité de peuplements pouvaient être significatives à certaines hauteurs de l'arbre et non significatives à d'autres. Pour les différences en hauteur les groupes de densité de peuplement n'ont pas été pris en compte. En effet, on a constaté dans de nombreux cas l'absence d'interaction entre la hauteur dans l'arbre et la densité de peuplement. Cela supposait que s'il y avait une différence significative en hauteur, elle était identique quel que soit le groupe.

Dans les modèles on a utilisé l'âge cambial et la hauteur ou l'âge cambial et le groupe de densité de peuplement comme variables indépendantes, et les différentes propriétés du bois comme variables dépendantes.

Pour la détermination de l'âge de transition on a utilisé l'analyse de régression non linéaire par segment (NLIN) dans SAS. Elle permet d'obtenir rapidement l'intersection entre deux droites qui constituent une régression linéaire dans chaque partie du profil radial (bois juvénile et bois mature).

Enfin, dans la dernière partie de nos analyses statistiques, on a étudié en utilisant un modèle mixte l'effet de la densité, de la largeur des cernes et de l'angle des microfibrilles sur le module d'élasticité et le module de rupture. Les modèles linéaires mixtes trouvés permettent de mettre en relation quelques propriétés anatomiques, physiques et mécaniques. L'avantage du modèle mixte est de tenir compte à la fois de facteurs fixes (variables étudiées) et de facteurs aléatoires (arbres).

2.3. Conclusion

En conclusion de la partie consacrée à l'échantillonnage, on peut retenir les points suivants :

- Les échantillons sont destinés à trois types d'études : une partie anatomie, une partie densitométrie et une partie retrait et propriétés mécaniques.

- Tous les échantillons sont prélevés de manière à obtenir un profil radial de la moelle vers l'écorce.

- Les échantillons sont prélevés à trois hauteurs différentes (2,4; 5,1 et 7,8 m) et proviennent de 36 arbres répartis dans trois groupes de densité de peuplement (1790, 2700 et 3400 arbres/ha).

- Les échantillons sont prélevés sur une même planche découpée en section radiale afin d'établir les corrélations entre les diverses parties étudiées.

Chapitre 3. Influence of Stand density on ring width and wood density at different sampling heights in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.)

Résumé

Trente-six arbres d'épinette noire de 80 ans ont été récoltés afin d'étudier l'influence de la densité de peuplement sur certains critères de qualité du bois et leur variation avec la hauteur dans l'arbre. Le peuplement, régénéré naturellement après incendie en 1906, est situé à Chibougamau, 400 km au nord de Québec. On a assigné à chaque arbre une densité locale de peuplement allant de 1390 à 3590 arbres/ha, calculée à partir du nombre d'arbres voisins. Les arbres ont été regroupés dans trois catégories de densité de peuplement (1790, 2700 et 3400 arbres/ha). Chaque échantillon a été analysé par densitométrie aux rayons X et plusieurs caractéristiques du cerne incluant sa largeur et sa densité ont été mesurées de la moelle vers l'écorce, à trois hauteurs. La surface des cernes et la proportion de bois initial ont été calculées. Pour tous les critères étudiés, la variation due à la hauteur était plus grande que celle due à la densité de peuplement. La variation longitudinale de la masse volumique du cerne et de la masse volumique du bois initial dépend beaucoup du type de bois (bois juvénile ou bois mature). Une variation de la masse volumique du cerne avec la hauteur de 425 à 458 kg/m³ a été observée dans le bois juvénile, mais les variations avec la densité de peuplement des caractéristiques de croissance restent faibles. Notamment, il a été observé que la densité de peuplement avait plus d'influence sur la largeur des cernes que sur la masse volumique des cernes.

Abstract

Thirty-six black spruce sample trees were collected from a 80-year-old stand to examine the influence of stand density on selected wood quality attributes and their variation with sampling height. The stand, naturally regenerated from fire in 1906, was located in Chibougamau, 400-km north of Québec. Each tree was assigned a local stand density ranging from 1390 to 3590 stems/ha, calculated from the number of neighbouring trees. The trees were grouped into three stand density categories (1790, 2700 and 3400 stems/ha). Each sample tree was analyzed by X-ray densitometry and various ring features including ring width and wood density were measured for each ring from pith to bark, at three heights. Ring area and earlywood proportion were computed. For all features studied, the variation due to sampling height was larger than that due to stand density. The longitudinal variations for ring density and earlywood density depend largely upon the wood type (juvenile wood or mature wood). A variation of ring density with sampling height in the stem from 425 to 458 kg/m³ was observed in juvenile wood, but variations with stand density in all the growth ring features studied were small. Notably, it was observed that stand density had more influence on ring width features than on ring density features.

Key words: Black spruce, stand density, sampling height, ring width, ring density, variation

3.1. Introduction

Stand density management is becoming an important forest management strategy in Eastern Canada. It is intended primarily to accelerate the growth of individual trees and shorten rotation age. However, as a result of this increase in tree growth rate, wood quality may be affected. The impact of growth rate on wood quality has been a subject of great interest for decades, and numerous studies have investigated the relationship between growth rate and wood density in several commercial species (Barbour 1991; Kellison et al. 1983; Cregg et al. 1988; Ackermann 1995; Zhang 1997b).

Black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) is one of the most important commercial and reforestation species in Eastern Canada. This species is valued for both lumber and pulpwood production. In black spruce stands, growth conditions affect crown development (Raulier et al. 1996). Therefore, stand density management (e.g. thinning) affects not only tree growth but also wood quality. For example, it has been reported that precommercial thinning (Chui et al. 1997), growth rate (Barbour 1987), and initial spacing (Zhang and Chauret 2001) can all affect wood quality in black spruce. Moreover, other studies have reported considerable stand density effects on various wood properties in diverse conifers (Alazard 1994; Biblis et al. 1995; Biblis et al. 1997; Bues 1985; Cregg et al. 1988; Huuri et al. 1987; Panshin and de Zeeuw 1980). Even some anatomical properties (Kromhout 1968) and end product values (Middleton et al. 1995) are affected by stand density in some conifer species.

Wood density is one of the most important characteristics of wood quality and a major factor in paper processing (Law and Valade 1997). Variations in wood characteristic with height and radial position motivate us to study within-tree variation. It was shown that the correlations between wood features (ring density and ring width) vary from juvenile wood to mature wood (Koubaa et al. 2000; Koga and Zhang 2002). In addition, this species has also been studied for its wood physical and mechanical properties (Barbour et al. 1989), for its wood density in relation to cambial age (Zhang 1998), for tree growth and genetics (Zhang and Morgenstern 1995), and for its lumber properties in relation to growth (Zhang

and Chauret 2001). As part of a multidisciplinary project, this study was intended to provide a better understanding of the relationships between stand density, sampling height and selected wood quality features (ring density, earlywood density, latewood density, maximum ring density, ring width, ring area and earlywood proportion) in black spruce.

3.2. Materials and methods

3.2.1. Materials

The sample trees came from a stand located in the Chibougamau area, 400 km north of Quebec City, 49°21'N and 75°05'W, at an altitude of 400 m. The average stand density was 1967 trees/ha and the average basal area was 41.3 m²/ha, with an average tree height of 13.8 m at age 79 (Horvath 2002). It was a natural stand regenerated from fire. No silvicultural treatment was applied to the stand. Therefore, all the trees had comparable ages and heights, but were randomly spaced. In contrast to many previous studies where trees were collected from different stands, the sample trees were selected from the same stand to study the variability due to local stand density only. The Schütz index was used to determine the competition level for each sample tree (Ung et al. 1997). A total of 56 trees were randomly selected and studied to determine a local stand density that was calculated based on the number of surrounding trees in a 4-m ray circular sample plot. Small trees (less than 8 cm at DBH) and dead trees were not considered in the calculation because they would have had limited effects on the sample trees. Next, 36 trees were selected and were categorized into three stand density groups of the same size, namely: 1790 (1390-2190), 2700 (2390-2990) and 3400 (3190-3590) stems/ha, or low, medium and high stand densities, respectively. The 36 trees were felled and measured for diameter at breast height (DBH), total tree height, live crown width and length.

3.2.2. Sample preparation

From each sample tree, 30-cm bolts were collected at 2.4, 5.1 and 7.8-m heights, from which 2-cm thick disks were removed in order to carry out wood density profile measurements. A radial segment from pith to bark (2.0-cm longitudinal x 1.0-cm tangential x disk radius) was removed from each disk in the southernmost direction. The segments were trimmed into 1.57-mm thick (longitudinal) strips with a specially designed pneumatic-carriage twin-blade saw. The sawn strips were extracted with a cyclohexane/ethanol (2:1) solution for 24 hours and then with hot water for another 24 hours to remove extractive compounds. After extraction, the strips were air-dried under restraint to prevent warping, and scanned with an X-ray densitometer available at Forintek Canada Corp. in Quebec City, Canada.

3.2.3. Sample analysis

To determine earlywood and latewood characteristics separately, it is necessary to define the position of the earlywood-latewood transition within the growth ring. Since the transition from earlywood to latewood occurs gradually in black spruce, this boundary was defined as the inflexion point of the intra-ring density profile (Koubaa et al. 2002). The following variables were determined and studied: ring width (RW), ring density (RD), maximum ring density (MD), earlywood proportion (EP), earlywood density (ED), latewood density (LD) and ring area (RA). The latter was calculated from RW data assuming that the rings are circular (Gartner et al. 2002).

Based on the radial patterns of ring area and maximum ring density, the transition from juvenile wood (JW) to mature wood (MW) was determined visually (Clark and Saucier 1989). Then, according to the results, the wood produced from the pith to age 20 was considered to be JW and the remaining MW. ANOVA and Duncan tests were carried out with SAS software, sometimes separately for JW and MW when the patterns suggested that the analysis should be divided in two parts.

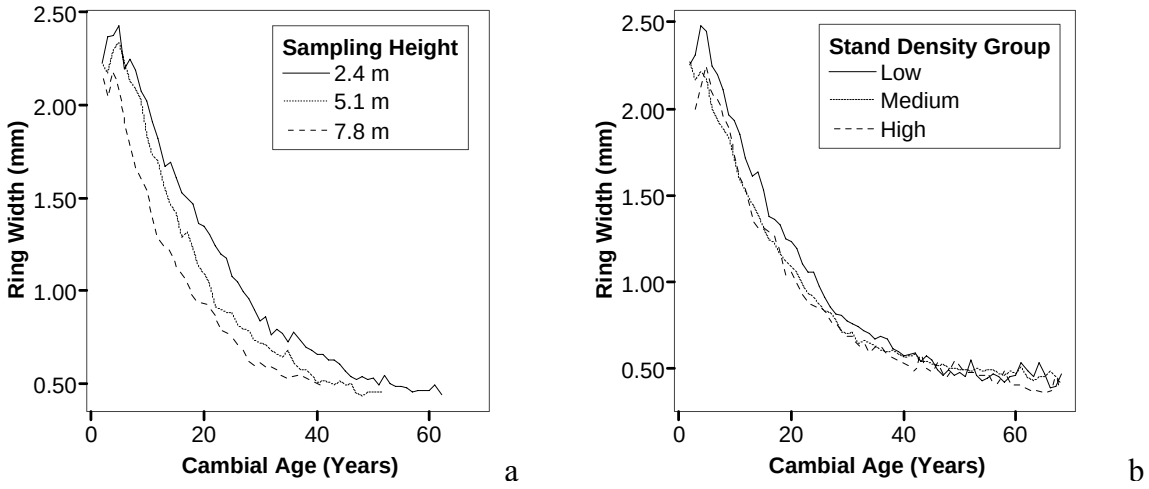


Figure 3-1. Average ring width for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only).

3.3. Results and discussion

3.3.1. Patterns of radial variation for growth and density features

Ring width is a feature most frequently used to characterize growth rate. As expected, average RW (Fig. 3-1) decreases from pith to bark, with the exception of the first 4-5 rings where it tends to increase slightly, as found for Douglas fir by Abdel-Gadir and Krahmer (1993a). Figure 3-1 outlines a steady decrease in RW after the 4th ring.

Although RA is seldom used, it can also be considered as a growth variable because it refers to wood production in both radial and tangential directions, which is linked to periclinal and anticlinal divisions of cambial cells (Lei et al. 1997). It has been noticed that RA provides contrasted information and is better than RW for calculating the radial growth index, although both RW and RA yield the same qualitative results (Lei et al. 1997).

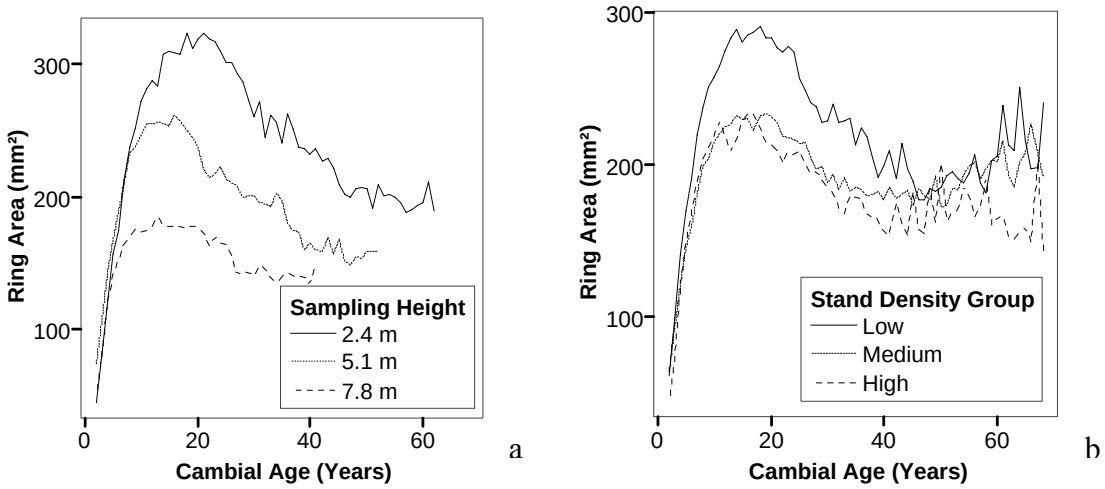


Figure 3-2. Average ring area for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only).

The RA radial profile (Fig. 3-2) shows a different radial pattern than does the RW profile (Fig. 3-1). While RW decreases over the whole life of the tree, RA increases until about the 20th ring. Therefore, the RW and RA variables lead to different interpretations of growth rate.

The results suggest that RA increases until the 20th ring and explain the rapid increase in cross-section observed during the juvenile period, which is possibly linked to live crown activity. Nevertheless, the best indicator of growth rate is wood volume (Chui et al. 1997).

Earlywood proportion presents a radial pattern (Fig. 3-3) similar to RA. It increases until the 10th ring then decreases to the bark. A transition in EP appears to occur at the 10th ring.

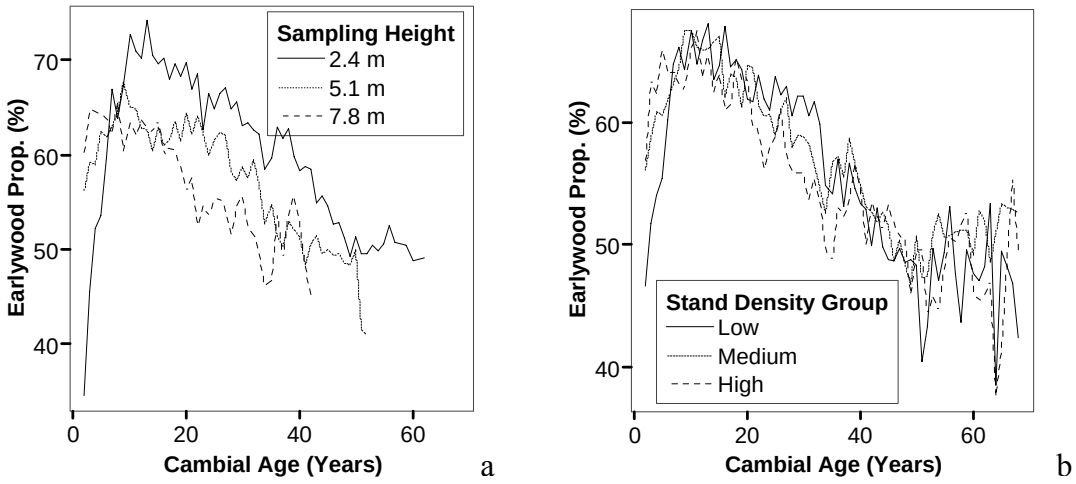


Figure 3-3. Average earlywood proportion for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4- m high only).

Also, the EP decreases with height in the tree. Although RW (Fig. 3-1) is maximized at the 4th ring, RA (Fig. 3-2) reaches a maximum at the 20th ring, which seems to correspond to the JW/MW transition. The results show that growth trait patterns determined by RA, RW and EP differ from one another.

The radial pattern of RD (Fig. 3-4) is of type II as described by Panshin and de Zeeuw (1980). The high densities of the first rings are due to both high ED (Fig. 3-6) and low earlywood proportion (Fig. 3-3). Then, the decrease in RD from about 470 kg/m³ to 410 kg/m³ could be due to the decrease of both ED and latewood proportion. Ring density decreases until about the 10th ring and then increases slowly towards the bark. It corresponds to the reciprocal of the EP pattern (Fig. 3-3) and shows the importance of EP in determining RD. The radial pattern of ED (Fig. 3-6) decreases until age 11 then increases slightly, and also presents a similar pattern to RD, implying that it is as important as EP in determining RD.

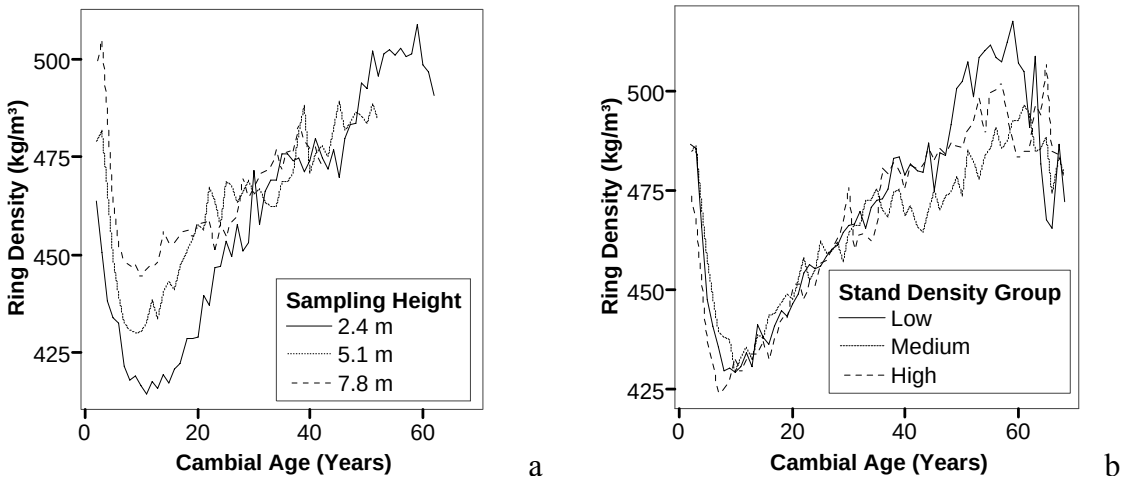


Figure 3-4. Average ring density for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only).

In contrast, latewood density shows a completely different radial pattern (Fig 3-7), which increases until age 20 then is maintained at a constant value of 600 kg/m³. The MD profile (Fig. 3-5) follows a pattern similar to the LD profile presented by Sauter et al. (1999) for Scots pine. Maximum ring density is, by definition, higher than LD, and shows a strong correlation with it. Moreover, in contrast to LD or ED, MD does not depend on the determination of the earlywood/latewood boundary. For these reasons, MD was preferred to visually estimate the JW/MW boundary. During the first 20 years, the MD increases, and then decreases slowly towards the bark. It was noticed that MD presents a radial pattern similar to that observed for RA (Fig. 3-2).

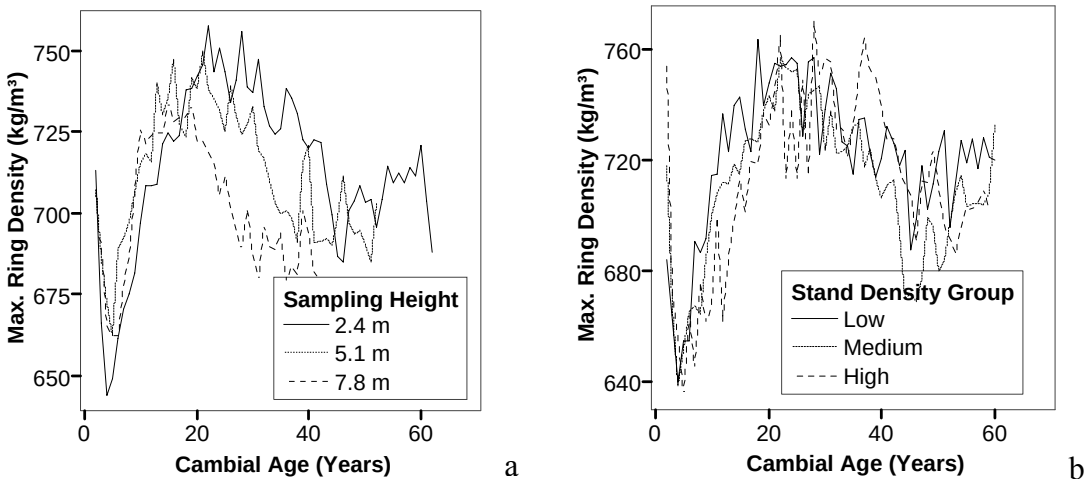


Figure 3-5. Average maximum ring density for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4- m high only).

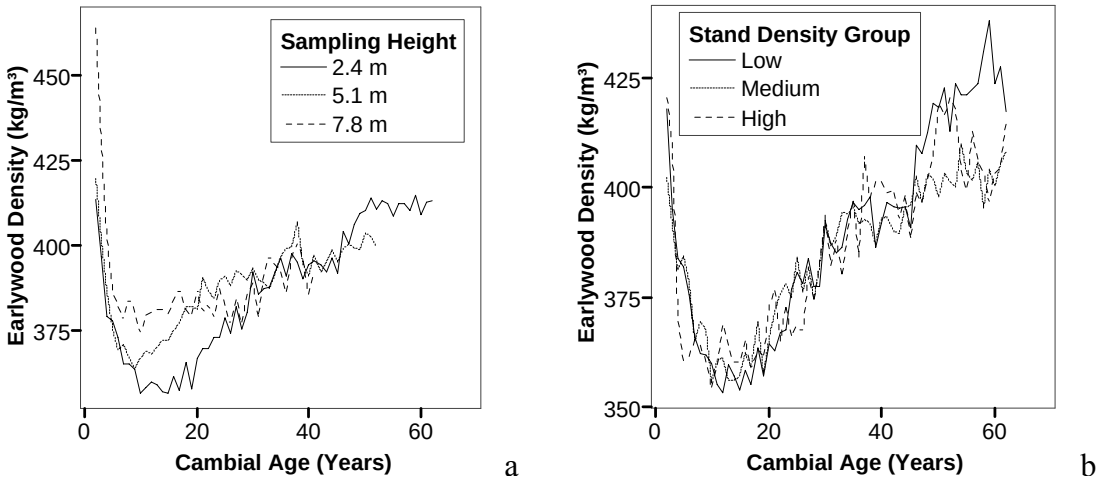


Figure 3-6. Average earlywood density for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only).

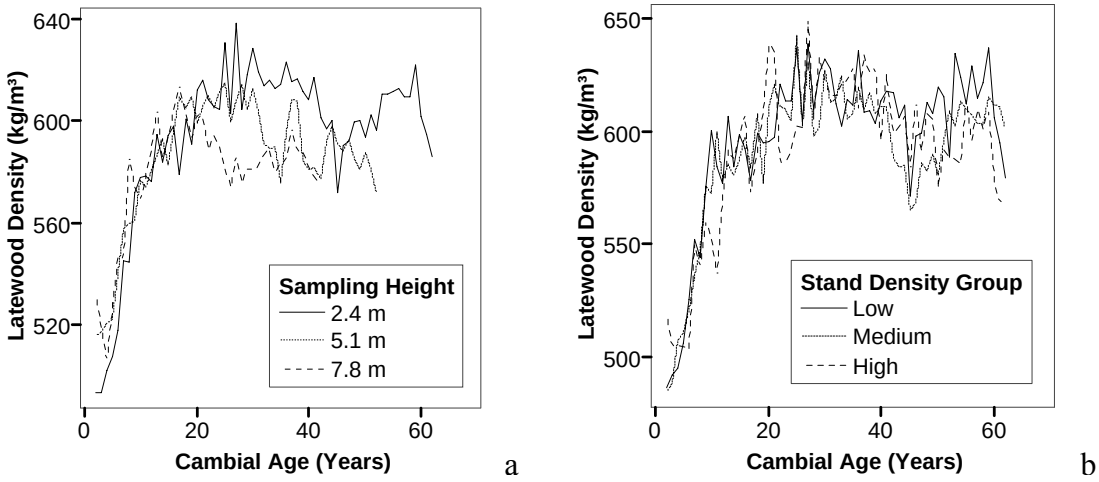


Figure 3-7. Average latewood density for all 36 trees in relation to cambial age, (a) at three sampling heights and (b) in three stand density groups (data at 2.4-m high only).

3.3.2. Juvenile wood-mature wood transition

The determination of the transition age from JW to MW has been studied extensively because of its impact on wood quality. Usually, the JW to MW boundary can be determined by microfibril angle or longitudinal shrinkage measurements. It has been shown that the transition age varies among species and among wood traits (Abdel-Gadir and Krahmer 1993a), occurs over years (Yang et al. 1986) and can be determined visually (Clark and Saucier 1989). Sauter et al. (1999) found that LD was a good indicator of the boundary. Although the RW and RD profiles (Figs. 3-1 and 3-4) show sharp transitions at the 4th and 10th rings, respectively, they do not allow a clear determination of the JW/MW transition. Furthermore, based on the radial patterns observed in the current study for RD, RA, RW and EP, the boundary can be progressive (over several years) or abrupt (over one or a few years). Ring width and EP (Figs. 3-1 and 3-3) show sharp transitions, whereas RA and RD (Figs. 3-2 and 3-4) show more progressive transitions over the years. The maximum point of the MD profile, at about 750 kg/m^3, could correspond to the transition from JW to MW,

therefore, MD might be used efficiently to determine the JW/MW boundary. From an anatomical point of view, MD corresponds to the density of the last cells of the growth ring which are characterized by a thick cell wall and a small lumen area. The radial pattern of RA (Fig. 3-2) could also be an indicator of this boundary. In this case also, the maximum occurs at about the 20th ring and is followed by a sharp decrease. The JW/MW transition at a height of 7.8 m appears to be earlier than that at 2.4-m or 5.1-m heights for both RA and MD (Figs. 3-2a and 3-5a). Therefore, our results show that the third log produces MW earlier, has a higher RD, and narrower rings (Figs. 3-1a and 3-4a). The shorter juvenile wood period at the 7.8-m height could be a consequence of tree aging, cambium aging, decrease of live crown proportion or increasing competition, which are the main characteristics of trees in mature stands.

3.3.3. Variations with sampling height

The growth ring features vary more strongly with height than with stand density (Figs. 3-1 to 3-7). Also, the magnitude of the variation depends on the type of wood (JW or MW). This suggests that end product quality should depend more on height and radial position than on stand density.

Ring width (Fig. 3-1a), RA (Fig. 3-2a) and EP (Fig. 3-3a) show large variations with sampling height, demonstrating that growth rate decreases from the base to the top of the stem (Figs. 3-1 and 3-2). This means that at the same cambial age, the cambium will produce narrower rings at the 7.8-m stem level than at the 2.4-m stem level. Ring density (Fig. 3-4a) shows large variations with sampling height, and these variations are larger in JW than in MW. This is consistent with the effect of height on wood density as reported for sessile oak (Degron and Nepveu 1996). The variations of the JW proportion among logs taken at different heights reported by Koga et al. (1995) have also demonstrated the importance of sampling height. Maximum ring density (Fig. 3-5a) also varies considerably with sampling height.

As explained above, the large variations observed with sampling height may have two origins. First, they could be due to the cambium aging process. Indeed, as cambial age corresponds to the number of rings from the pith at a given stem height, cambium age is the difference between the year of production of the ring and the first year of the tree. It is also the tree age. Therefore, the last growth ring produced all along the stem has the same cambium age but the cambial age (number of rings from pith to bark) is a function of height. Tree aging could lead to lower cambium activity, inducing a decreasing fiber yield over the years and narrower rings (Went 1942). The second possible origin could be a decreasing live-crown proportion of the tree with aging, which induces a reduction of the growth rate. This is due to the variation in tree competition over the years. Indeed, while the distance between trees remains unchanged during the life of the tree, the diameter of the live crown increases, which increases the inter-tree competition. Thus, as the tree gets older, the live crown proportion decreases as competition increases. The abovementioned parameters taken individually or in combination can explain the reduction of growth rate during the life of the tree.

Table 3-1. Average ring width (mm) in relation to sampling height and stand density group. (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column).

Sampling Height (m)	Average ring width (mm)	Stand density group	Average ring width (mm) by sampling height		
			2.4 m	5.1 m	7.8 m
2.4	1.03 B	Low	1.09 B	1.12 b	1.06 *b*
5.1	1.03 B	Medium	1.01 A	1.00 a	0.95 *a*
7.8	0.98 A	High	0.98 A	0.98 a	0.94 *a*

As the incremental decrease of average RW with sampling height is low (Table 3-1), the decrease of average RA is about 45 mm² from 2.4 m to 5.1 m and 58 mm² from 5.1 m to 7.8 m (Table 3-2). The decrease in growth rate from the stump to the top is paralleled by an increase in average RD of about 20 kg/m³ in JW (Table 3-4 and Fig. 3-4a). The link between RD and RW observed for sampling height is an interesting result of this study. Usually, the relationships between RD and RW are studied from the radial profile. The radial and height variations presented in this study show that decreases in RW (and especially RA) is proportional to increases in RD. Moreover, it was observed that the JW at the top of the stem seems to have more mature features than JW in the lower part of the stem, which could have major consequences on mechanical properties. Also, the range of variation of RA and RD along the radial profile is lower at 7.8 m than at 2.4 m (Figs. 3-2a and 3-4a), indicating more homogeneous wood properties along the radial profile in the top log.

Table 3-2. Average ring area (mm²) in relation to sampling height and stand density (data at 2.4-m high only), in juvenile wood (JW) and mature wood (MW). (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column).

Sampling Height (m)	Average ring area (mm²)	Stand density group	Average ring area (mm²)	
			In JW	In MW
2.4	239 C	Low	267 B	260 c
5.1	195 B	Medium	239 A	230 b
7.8	153 A	High	242 A	214 a

In conclusion, all traits present a strong relationship with sampling height. Specifically, we observed a reduction in growth rate and an increase in wood density at higher sampling positions.

3.3.4. Juvenile and mature wood properties

Ring density, ED and MD variation with height depend on the wood type (JW or MW). While average RA variation with stand density was more affected in MW (Table 3-2), average RD variation was not affected by wood type and average MD variation was affected only weakly (Table 3-5). The radial pattern of RD (Fig. 3-4a) shows large variations with sampling height especially in JW where the growth rate is higher. This is one of the most important and visible consequences of the interaction between stem position and wood type.

Table 3-3. Average earlywood proportion (%) as a function of sampling height and stand density (data at 2.4-m high only) in juvenile wood (JW) and mature wood (MW). (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column).

Sampling height (m)	Average earlywood proportion (%)		Stand density group	Average earlywood proportion (%)	
	In JW	In MW		In JW	In MW
2.4	65.3 B	57.1 c	Low	64.3 A	58.4 b
5.1	62.3 A	53.9 b	Medium	64.4 A	57.4 b
7.8	62.1 A	51.3 a	High	68.3 B	54.9 a

The Duncan test carried out in both JW and MW established that large variations of average RD due to sampling height (Table 3-4) are present in JW, but little influence of sampling height was noticed in MW. Thus, in MW the variation of RW (Fig. 3-1a) and RA (Fig. 3-2a) due to sampling height does not induce a variation of RD (Fig. 3-4a). It is consistent with a previous finding that a fast growth rate has less negative impact on wood density in MW than in JW (Zhang 1998). The variations of average MD with sampling height are also dependent on the wood type and are more important in MW than in JW (Table 3-5).

Table 3-4. Average ring density (kg/m³) in relation to sampling height, in juvenile wood (JW) and mature wood (MW), and in relation to stand density group. (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column).

Sampling height (m)	Average ring density (kg/m³)		Stand density group	Average ring density (kg/m³) by sampling height		
	In JW	In MW		2.4 m	5.1 m	7.8 m
2.4	425.3 A	475.9 b	Low	462.8 A	466.8 b	468.2 *b*
5.1	446.1 B	473.1 b	Medium	461.1 A	460.8 a	465.6 *b*
7.8	458.7 C	468.6 a	High	462.6 A	464.1 ab	458.1 *a*

3.3.5. Variation with stand density

Competition between trees is difficult to evaluate since it is a dynamic process depending on time and tree age. Indeed, young trees do not interact the same way as mature trees, even though tree spacing remains unchanged. Unless significant self-thinning occurred, the tree spacing of the stand in 1999 was the same as about 80 years ago, but tree-to-tree competition in 1999 may not represent precisely the competition that existed previously because of mortality and increasing live crown diameter. Consequently, the results should be analyzed with caution considering the estimated local stand density.

The small impact of stand density on RD (Fig. 3-4) could be due to the overall high stand density. Zhang and Chauret (2001) found that stand density does not affect wood density significantly over a threshold value of about 1300 trees/ha. Since the lowest estimated local stand density was 1390 trees/ha, the three stand densities considered in this paper were above this threshold value. Moreover, for all traits studied, the variations with stand density are lower than the variations with sampling height. This implies that the within-tree variations in high-density stands are more important than the tree-to-tree variations.

Table 3-5. Average maximum ring density (kg/m³) in relation to sampling height and stand density (data at 2.4-m high only) in both juvenile wood (JW) and mature wood (JW). (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column).

Sampling height (m)	Average maximum ring density (kg/m³)		Stand density group	Average maximum ring density (kg/m³)	
	In JW	In MW		In JW	In MW
2.4	700.3 A	717.8 c	Low	708.8 B	721.7 a
5.1	713.0 B	710.8 b	Medium	699.8 B	714.4 a
7.8	707.6 B	694.4 a	High	688.3 A	717.5 a

Table 3-6. Average earlywood density (kg/m³) in relation to sampling height, in juvenile wood (JW) and mature wood (MW), and in relation to stand density group. (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column).

Sampling height (m)	Average earlywood density (kg/m³)		Stand density group	Average earlywood density (kg/m³) by sampling height		
	In JW	In MW		2.4 m	5.1 m	7.8 m
2.4	366.4 A	396.4 b	Low	389.3 B	393.1 c	392.8 *b*
5.1	377.2 B	394.1 b	Medium	384.9 A	383.8 a	390.7 *b*
7.8	390.8 C	387.1 a	High	385.9 A	387.9 b	379.7 *a*

Variations of average RW, RD and ED due to stand density were studied separately at three sampling heights (Tables 3-1, 3-4 and 3-6). On the other hand, variations of average RA, EP, MD and LD due to stand density were analyzed at the 2.4-m sampling height only, in both JW and MW (Tables 3-2, 3-3, 3-5 and 3-7). Trees from the lowest stand density show slightly larger rings than those from the two other stand densities regardless of sampling height (Table 3-1). In the same way, the larger average RA (Table 3-2) corresponds to the lower stand density in both JW and MW. The average RA in MW increases from the high-density stand to the medium one, by about 15 mm^2/ring, and by about 30 mm^2/ring from the medium-density stand to the lower one. The impact of stand density on average RA was similar for the three sampling heights. The EP gave more contrasted results (Table 3-3). Indeed, as JW shows a high EP for high stand density, MW shows a low EP for high stand density, indicating a changing trend from JW to MW.

Table 3-7. Average latewood density (kg/m^3) in relation to sampling height and stand density (data at 2.4-m high only) in both juvenile wood (JW) and mature wood (JW). (Numbers with the same letter are not statistically different α=5%, read in column).

Sampling height (m)	Average latewood density (kg/m^3)		Stand density group	Average latewood density (kg/m^3)	
	In JW	In MW		In JW	In MW
2.4	567.3 A	607.9 c	Low	566.9 A	613.7 b
5.1	567.3 A	595.4 b	Medium	567.8 A	604.5 a
7.8	567.4 A	586.9 a	High	567.0 A	604.9 a

The variations of average RD with stand density are so small that at a 2.4-m sampling height, no significant impact of stand density was found (Table 3-4). However, at 5.1-m and 7.8-m heights, a very weak trend seems to occur. Nevertheless, and especially at 7.8 m, the results show that the lower stand density gives the higher average RD. The radial profile of RD as a function of sampling height presents distinct effects in JW and MW (Fig. 3-4a) which is not found in the radial profile with stand density variation (Fig. 3-4b). Again, this result shows that the intra-tree variation of RD is higher than the inter-tree variation of RD for the stand densities considered in the current study.

At the 2.4-m sampling height and in MW, no significant difference of average MD was found between the stand density groups (Table 3-5). But in JW, a lower average MD was found for the higher stand densities.

3.4. Conclusion

The objective of this study was to better understand the relationship between growth conditions and selected wood quality features in black spruce. More specifically, this study was designed to investigate the impact of stand density and sampling height in the tree on selected wood quality features for sample trees selected from the same stand. Ring area was used to complement ring width, which is most often used in the wood industry as a growth rate indicator. Wood density was characterized by ring density, maximum ring density and latewood density. Based on the present study the following conclusions can be drawn:

1. Ring width and wood density vary more with sampling height than with stand density over the density range of 1790-3400 stems/ha.

2. The relations between ring density, maximum ring density and sampling height are dependent on the wood type. Differences in ring density and earlywood density among the three sampling heights are significant in juvenile wood. In mature wood, the variation of ring width and ring area with sampling height does not induce a variation of ring density.

3. The variation of the ring width and ring density profiles with sampling height was significant.

4. Very little variation of wood density was observed with stand density. The variations observed seem to be the result of inter-tree variation. Moreover, the stand density range of the sample trees could be over the limit above which stand density has no significant influence on wood density, as previously concluded by Zhang and Chauret (2001). The interaction between sampling height and stand density was very weak, implying that regardless of the sampling height, the influence of stand density on wood traits remains the same.

5. Growth features rather than density features have the highest variations with stand density.

Acknowledgements

This study is part of a project funded by a collaborative program of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). We would like to thank the NSERC, Canadian Forest Service and Forintek Canada Corp. for their financial support for this study. The authors would also like to thank Mr. Gilles Chauret of Forintek Canada Corp. for his valuable assistance, and Dr. Isabelle Duchesne of Forintek Canada Corp. for her comments on the earlier versions of the paper.

Chapitre 4. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights

Résumé

Le profil radial de la densité maximale du cerne et de la surface de cerne de trente six arbres d'épinette noire a été utilisé pour déterminer l'âge de transition du bois juvénile au bois mature. Les données ont été obtenues par densitométrie aux rayons X et la régression par segment ainsi que la régression polynomiale ont été utilisées pour trouver l'âge de la limite du bois juvénile. Trois densités de peuplement (1790, 2700 et 3400 arbres/ha) et trois hauteurs d'échantillonnage (2,4; 5,1 et 7,8 m) ont été étudiées. Bien que la densité maximale de cerne et la surface de cerne présentent un profil radial identique, ils donnent deux résultats significativement différents d'âge de transition. La densité maximale de cerne surestime l'âge de transition (17,6 années à 2,4 m) par rapport à la surface de cerne (14 années à 2,4 m). Les résultats montrent que la transition du bois juvénile au bois mature se produit après 12 ans à 7,8 m (versus 13,1 ans à hauteur de 5,1 m, et 17,6 ans à 2,4 m). Bien que l'âge de transition se produise plus tard dans le peuplement le plus dense (21 années à 2,4 m), la différence n'est pas significative entre les trois classes de densité. Néanmoins, l'âge de transition reste difficile à déterminer car il n'existe pas de définition standard. La transition se produit sur plusieurs années, et plus probablement il existe un bois de transition entre le bois juvénile et le bois mature. L'estimation de la proportion de bois juvénile en volume montre que celle-ci reste constante le long de la tige et qu'elle augmente avec la densité de peuplement.

Abstract

The radial pattern of both maximum ring density and ring area of thirty-six black spruce trees were used to determine the transition age from juvenile wood to mature wood. The data were obtained by X-ray densitometry and both segmented linear and polynomial regressions were used to point out the age of the juvenile wood boundary. Three stand densities (1790, 2700 and 3400 stems/ha) and three sampling heights (2.4, 5.1 and 7.8 m) were studied. Although maximum ring density and ring area presented similar radial patterns, they gave two significantly different results of transition ages. The maximum ring density over-estimated the transition age (17.6 years at 2.4 m) in contrast to ring area (14 years at 2.4 m). The results show that the transition from juvenile wood to mature wood occurred after 12 years at 7.8 m (versus 13.1 years at a height of 5.1 m, and 17.6 years at 2.4 m). Although transition age occurred later in the high stand density group (21 years at 2.4 m), the difference was not significant between the three stand density groups. Nevertheless, transition age remains difficult to determine since no standard definition exists. The transition occurs over years, and most probably a transition wood exists between juvenile wood and mature wood. Estimation of the juvenile wood proportion in volume shows that it remains constant along the stem and it increases with stand density.

Key words: Stand density, sampling height, juvenile wood, transition age, ring area, maximum ring density, black spruce.

4.1. Introduction

The radial cross-section of a stem can be divided into three zones (Clark and Saucier 1989): juvenile wood (JW), transition wood and mature wood (MW), but most of the time only two are considered, JW and MW. It has been widely accepted that JW, also known as immature wood, pith wood, or inner wood, is produced under the influence of the uppermost part of the tree crown. Formerly, the core JW was thought to be cylindrical, however, Zobel et al. (1959) proposed a more or less conical shape. Indeed, the formation of JW is related to the year of formation of the cambial initials (Yang et al. 1986), which is what induces the conical shape of JW. It has been shown that JW properties can be an indicator of MW properties in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) (Koubaa et al. 2000). However, in contrast with MW, many JW features are undesirable for most specific wood uses. This is of interest considering that the percentage of JW has a tendency to be higher in a suppressed tree than in a dominant tree (Yang et al. 1986). Juvenile wood is characterized by a lower density, shorter tracheids or fibers, lower latewood percentage, thinner cell walls, smaller tangential cell dimensions, lower cellulose content, lower strength, higher longitudinal shrinkage, higher microfibril angle, larger cell lumen, more reaction wood, more spiral grain, and a higher degree of knottiness than MW (Panshin and de Zeeuw 1980). Mature wood in softwoods is defined by a relatively constant tracheid length, whereas JW is characterized by an increasing tracheid length from pith outward (Yang and Hazenberg 1994). With the move to intensive silviculture, the proportion of JW relative to MW increases, resulting in warping problems during the drying process. Because of the particular physical and mechanical properties of JW, its proportion can have a significant impact on wood quality. For example, a high JW proportion involves a reduced lumber strength and a reduction of yields in pulp production.

The JW-MW boundary is difficult to establish because of the gradual transition between these two types of wood. Nevertheless, it is of great interest because of its implication on JW proportion. It has been shown that this transition occurs over years (Yang et al. 1986; Bendtsen 1978). Based on tracheid length, Yang and Hazenberg (1994) determined that the transition between JW and MW occurred between ring 11 and ring 21 in black spruce.

Various criteria were used to locate the boundary between these two types of wood, including fibre length, microfibril angle, and longitudinal shrinkage. Among the relationships between tree growth and wood quality, the traits most frequently studied are ring density and ring width (Zhang et al. 1996). Wood properties change from pith to bark, and exhibit variable patterns, with some increasing and others decreasing. Since some ring traits of black spruce are affected by stand density and sampling height (Alteyrac et al. 2005), the JW boundary is also expected to depend on these factors. Nevertheless, the initial spacing has been reported not to influence the JW production period in Norway spruce and southern pine (Kucera 1994; Clark and Saucier 1989) while affecting the diameter of the juvenile core. A study by Yang (1994) also revealed that spacing had no influence on the number of rings of JW in 35-year old black spruce trees.

Variation within the tree is characterized by the decreasing number of years needed to attain a uniform tracheid length from the bottom to the top of the tree, meaning that the juvenile period is shorter in the top log (Yang et al. 1986). This results in major wood property differences between top and butt logs.

Previous studies have shown that a distinct JW-MW boundary could be determined by latewood density, growth ring specific gravity or tracheid length profile analysis (Abdel-Gadir and Krahmer 1993a; Sauter et al. 1999; Clark and Saucier 1989; Yang et al. 1986). Other techniques based on regression analysis were also proposed (Abdel-Gadir and Krahmer 1993a). Because of difficulties in estimating the transition age (TA), a reliable and quick method is necessary to determine it. The objectives of this study were to identify an appropriate methodology for the determination of the JW-MW transition age in black spruce wood, and to determine its variation as a function of sampling height and stand density.

4.2. Material and Methods

4.2.1. Material

Thirty-six sample trees were collected from a stand located in the Chibougamau area, 400 km north of Quebec City, 49°21'N and 75°05'W, at an altitude of 400 m. The stand density was 1967 trees/ha and the basal area was 41.3 m²/ha, with an average tree height of 13.8 m at age 79 (Horvath 2002). This stand was naturally regenerated from fire and exempt from silvicultural treatment. Therefore, all the trees had comparable ages and heights, but were randomly spaced. The sample trees were selected from the same stand in order to study the variability due to local stand density only. The Schütz index was used to determine the competition level for each sample tree (Ung et al. 1997). The local stand density was calculated from the number of surrounding trees in a 4-m radius circular sample plot (Alteyrac et al. 2005). Small trees (less than 8 cm at DBH) and dead trees were not considered in the calculation because of their limited competition effect. The 36 trees were selected and categorized into three stand density groups of the same span, namely: 1790 (1390-2190), 2700 (2390-2990) and 3400 (3190-3590) stems/ha or low, medium and high stand densities, respectively. The sample logs were removed at three sampling heights of 2.4, 5.1 and 7.8 m, then strips of 1.57 mm thick (Alteyrac et al. 2005) were extracted and analyzed by X-ray densitometry at Forintek Canada Corp. Eastern division. The microfibril angle (MFA) was measured by the Silviscan technology at CSIRO Forestry and Forest Products, Australia, on a total of 12 samples taken at 2.4-m high.

4.2.2. Methods

X-ray densitometry provided the radial patterns of several properties including ring basic density (RD), ring width (RW), and ring maximum density (MD). Ring area (RA) was computed from RW assuming a circular shape for the growth rings. The transition age (TA) was first visually estimated from the radial pattern of each property by a quantitative determination based on the regression analysis techniques described below.

Visual interpretation

The average RA, MD, RW and RD radial patterns of all 36 trees were plotted with respect to cambial age. The JW-MW transition age was then determined by visual interpretation of the slope changes of the above properties. The average radial pattern of MFA was also plotted to estimate TA.

Polynomial regression

The first regression technique used to estimate TA was a polynomial third-order regression and was inspired by the technique used to analyse the transition from earlywood to latewood (Koubaa et al. 2002) and the transition from JW to MW (Koubaa et al. 2004) in black spruce. From each tree, the radial profile of RA and MD was plotted with respect to cambial age (CA) and fitted with a third-order polynomial regression of the following form:.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 CA + \beta_2 CA^2 + \beta_3 CA^3 \quad (4.1)$$

From equation (4.1), the maximum value of Y was considered to be TA.

Segmented linear regression

The SAS NLIN segmented linear regression procedure was used as a second regression technique to characterize the RA and MD profile curves. This kind of segmented method or piecewise regression was used previously to analyse curves that present a changing slope (Bustos et al. 2003, Sauter et al. 1999, Abdel-Gadir and Krahmer 1993a). The model consists of finding two linear regressions to characterize the variation of traits with respect to cambial age. Equation (4.2) for JW and (4.3) for MW were used to find the intersection admitted to be TA from equation (4.4).

$$Y = aX + b + \varepsilon \quad \text{for } X < X_0 \qquad (4.2)$$

$$\text{and} \quad Y = cX + d + \varepsilon \quad \text{for } X > X_0 \qquad (4.3)$$

Where Y is the variable considered, RA or MD, a, b, c and d are the parameters, and X is the cambial age. X_0 is unknown and automatically determined by iteration in such a way as to provide the best coefficient of determination of the model including the two regressions by a numerical optimization method.

The intersection point of the two lines considered as TA is calculated as follows:

$$TA = X_0 = \frac{d-b}{a-c} \qquad (4.4)$$

Derivative function

According to the radial profile of MFA, a derivative function of the profile was used to determine the point from which the variation of MFA with respect to cambial age was null. Thus the radial profile was divided into two parts. A first part where MFA is decreasing was considered as juvenile wood, and the second part where MFA is constant was considered as mature wood.

Studied features

After visual examination, RW and RD were discarded, and MFA was kept as a comparison trait. The two remaining traits, RA and MD, were studied because their radial patterns suggested that they would be useful to find TA, as they presented a maximum at about age 20.

Ring area characterizes growth rate as RW does but RA was preferred to RW because the slope change in the RW radial profile that occurs at age 4-5 does not correspond to the main transition from JW to MW (Yang and Hazenberg 1994).

Maximum ring density showed a strong correlation with latewood density (r=0.76). Maximum ring density was therefore selected because this parameter further presented a radial pattern similar to RA. This trait was also used by Sauter et al. (1999) to estimate TA in Scots pine. Thus, the selection of RA and MD provided the advantage of using two traits representing growth rate and wood density, which are two major wood quality attributes.

Sampling height and stand density

The average TA was calculated with respect to sampling height and stand density. Three sampling heights: 2.4, 5.1 and 7.8 m; and three stand density groups 1790, 2700 and 3400 stems/ha were considered. An ANOVA and a Duncan test were carried out to compare the three stem levels and the three stand density groups.

Estimation of the juvenile wood proportion

An estimation of the JW proportion was calculated from the average TA found in each sampling height and each stand density group. Equations (4.5) and (4.6) present the radius of JW (JWR) and the corresponding area of JW (JWA) respectively, calculated from the RW average value of each category of sampling height and stand density.

$$JWR_{ij} = \sum_{h=pith}^{h=TA_{ij}} RW_h \qquad (4.5)$$

$$\text{and} \quad JWA_{ij} = \pi \cdot (JWR_{ij})^2 \qquad (4.6)$$

where j is the sampling height, and TA_{ij} is the transition age at the j^{th} sampling height in the i^{th} stand.

Equations (4.7) and (4.8) were used to calculate respectively the radius of the trees (TR) and the corresponding area. The trees were taken as an example in year 1980.

$$TR_{ij} = \sum_{h=pith}^{h=1980} RW_h \qquad (4.7)$$

where RW_h is the ring width at cambial age h.

and

$$Total_area_{ij} = \pi \cdot (TR_{ij})^2 \qquad (4.8)$$

Equation (4.9) was used to determine the JW proportion by area using values calculated from equations (4.6) and (4.8). The index number j indicates that the equation was formulated at the j^{th} sampling height.

$$JWprop_area_{ij} = 100 \times \frac{JWA_{ij}}{Total_area_{ij}} = 100 \times \left(\frac{JWR_{ij}}{TR_{ij}} \right)^2 \qquad (4.9)$$

Log volume and JW volume were estimated using the formula of a truncated cone given in Equation (4.10) where L is the log length (Figure 4-1).

$$JW_volume_\log_{ij} = \frac{\pi \cdot L}{3} \cdot \left[(JWR_{ij})^2 + JWR_{ij} \cdot JWR_{i(j-1)} + (JWR_{i(j-1)})^2 \right] \qquad (4.10)$$

The truncated cone formula was preferred to the Smalian, Huber or Newton formulas because it refers only to the small and large ends dimension (Patterson et al. 1993). The data available to calculate the $\log_j$ volume are the cross-section areas at the large and small ends, respectively denoted as $radius_{j-1}$ and $radius_j$.

The total volume of $\log_{ij}$, which is the log from the $j\text{-}1^{th}$ height (index j-1) to the j^{th} sampling height (index j) in the i^{th} stand was calculated using equation (4.11).

$$Total_volume_\log_{ij} = \frac{\pi \cdot L}{3} \cdot \left[(TR_{ij})^2 + TR_{ij} \cdot TR_{i(j-1)} + (TR_{i(j-1)})^2 \right] \qquad (4.11)$$

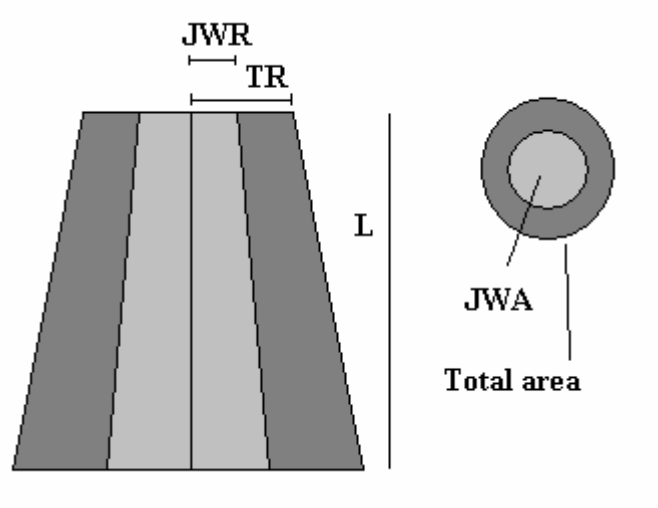


Figure 4-1. Estimation of JW proportion from the juvenile wood radius (JWR) and area (JWA), the tree radius (TR) and cross section area (total area), and length of the log (L).

Then, the JW proportion in volume was calculated from equations (4.10) and (4.11) in equation (4.12).

$$JW_prop_volume_\log_{ij} = 100 * \frac{JW_volume_\log_{ij}}{Total_volume_\log_{ij}} \quad (4.12)$$

4.3. Results and discussion

The profiles of MD and RA at 2.4 m sampling height from pith to bark are presented in Fig. 4-2. The two traits exhibit a similar radial pattern. They increase until about ring 20 and then decrease until bark. Only few rings near the pith presented a high MD value most likely due to the presence of compression wood. These data were omitted in the following analysis. These profiles show the expected transition age at a glance.

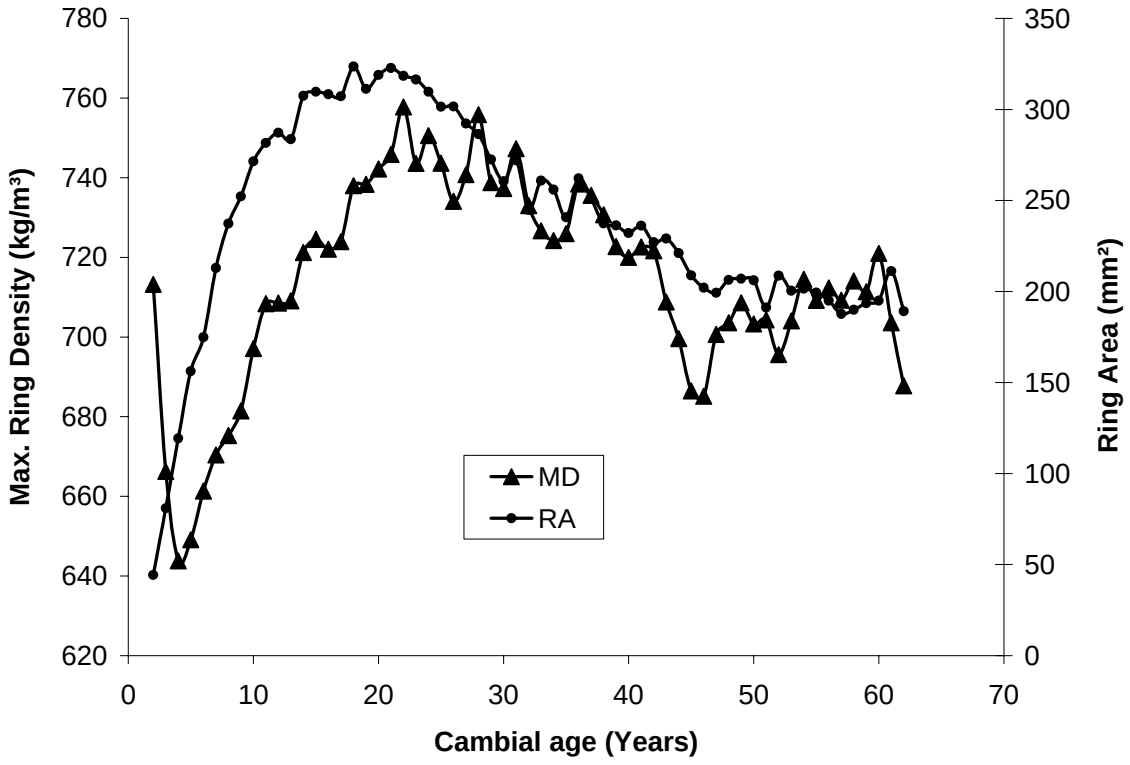


Figure 4-2. Average maximum ring density (MD) and ring area (RA) profiles at 2.4 m sampling height.

The profiles of RW, RD and MFA at 2.4 m sampling height from pith to bark are presented in Figure 4-3. The JW boundary is not defined as clearly as in Figure 4-2. As mentioned above, although RW presents a maximum at ring 4 which suggests a transition between two types of wood, it does not point out the JW boundary. According to the MFA profile, a first transition at about ring 10 and a second at about ring 25 are consistent with the presence of three zones in wood as described previously (Clark and Saucier 1989). Finally, the RD profile shows a minimum at about ring 10, also revealing a transition between two zones, but this can not be considered as the JW to MW transition.

According to Figures 4-2 and 4-3, TA was estimated to occur at about ring 4 to 5 with RW, ring 10 with RD, ring 10-25 with MFA, ring 20 with RA and ring 25 with MD. As a first consequence, the results suggest that RD and RW are not appropriate traits to determine the

transition age. As the TA is expected to occur in the 11-37 years range in Douglas fir (Abdel-Gadir and Krahmer 1993a) and 11-21 years in black spruce (Yang and Hazenberg 1994), RA and MD were selected as the best traits to determine TA and MFA was used as a comparison trait. As a second remark, Figure 4-2 shows that MD leads to a later TA in comparison to RA. Nevertheless, their radial patterns are similar (Figure 4-4).

The efficiency of RA to determine the JW boundary should be emphasized. Indeed, both RW and RA refer to tree growth (Clark and Saucier 1989). However, RA provides information about the radial and tangential growth of the annual rings, and about the increasing tree diameter. From this point of view, ring area can be considered as a better indicator of growth rate than RW.

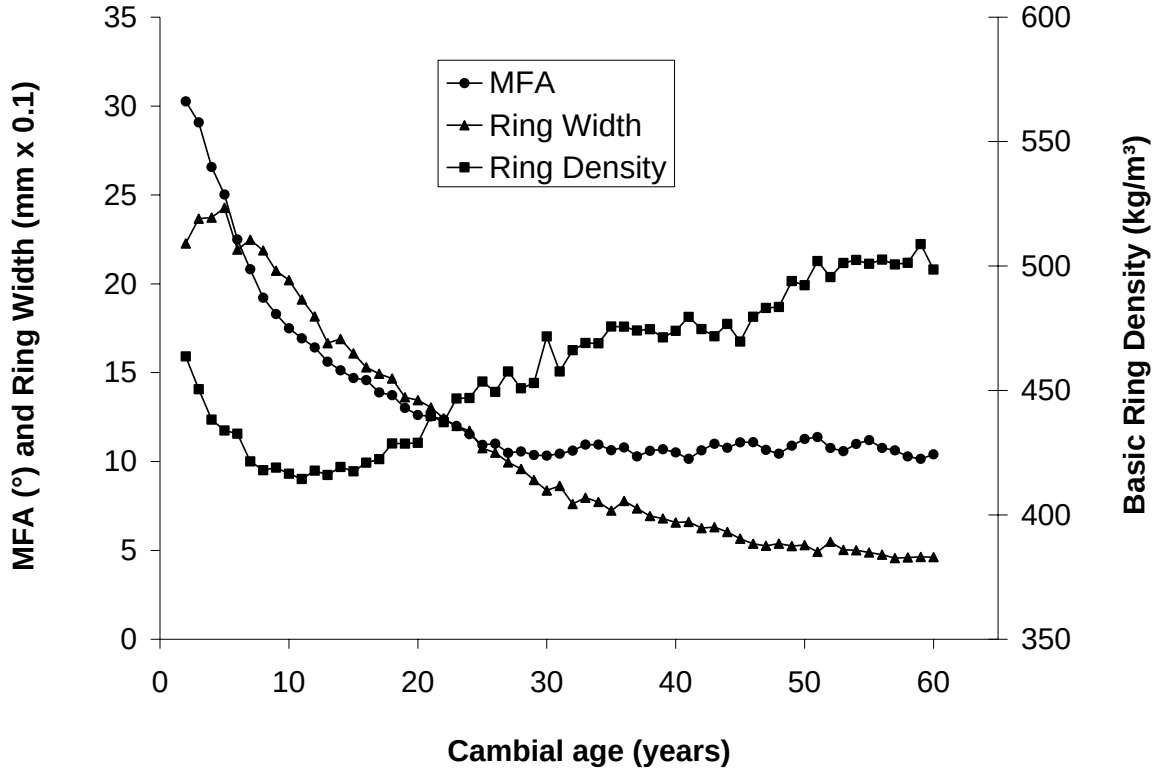


Figure 4-3. Average ring width (RW), ring density (RD) and microfibril angle (MFA) profiles at 2.4 m sampling height.

Variation of transition age with traits and method

The transition age for each tree was calculated from RA and MD, using polynomial and segmented linear regression as described above. These two methods applied to the two traits, RA and MD, led to four different results for TA at the 2.4 m sampling height (Table 4-2). The difference between the methods was significant while the difference between stand density was not (Table 4-1). The results also show that TA determined from MD is higher than TA determined from RA as it was already noticed in the preliminary visual analysis. Moreover, the methods of linear regression and polynomial regression led to two significantly different results. The segmented linear regression method, as shown in Table 4-2, results in an earlier TA when compared to the polynomial regression. The segmented linear regression method was selected because it gave results closer to the results found with MFA (Table 4-2).

The analysis confirms that the determination of TA is dependent on the trait considered. Although RA and MD have similar radial patterns, the TA value found by the two traits is significantly different.

Table 4-1. ANOVA of transition age at a sampling height of 2.4 m. Comparison of four approaches (MOD) (2 traits x 2 methods) and three stand density groups (SD).

Source of variation	df	Mean Square	F	Sig.
S.D.	2	63.1	1.785	n.s
MOD	3	820.9	23.208	0.001**
S.D. * MOD	6	50.9	1.44	n.s

Values with n.s are not significant at 0.05 probability level

Table 4-2. Average transition age estimated by third-order polynomial, segmented linear regressions and derivative function, for three stand density groups at 2.4 m sampling height. Ring area (RA), maximum ring density (MD) and microfibril angle (MFA) profiles are used. Results with different letters are statistically different (Duncan test, 0.05 probability level).

Ring trait	No. of samples	Regression	Stand density			Average
			Low N=12	Medium N=12	High N=12	N=36
RA	36	Polynomial	21.2	21.1	20.4	20.9 B
RA	36	Segmented linear	14.1	13.8	14.1	14.0 D
MD	36	Polynomial	24.5	22.3	29.8	24.9 A
MD	36	Segmented linear	15.2	18.4	19.7	17.6 C
MFA	12	Segmented linear	16.1	12.0	19.6	15.9
MFA	12	Derivative function	19.0	15.2	19.8	18

The transition age was also calculated with MD by the segmented linear regression. Although RA is a growth rate indicator and should be suitable to find the JW boundary it is not measured directly as MD is. On the anatomical point of view the MD value corresponds to the external boundary of the annual growth ring and does not depend on the determination of the earlywood-latewood transition such that if latewood width is not accurately estimated it does not change the MD value. Moreover, results obtained with MD

are closer to results found with MFA by the same method of regression. These reasons justify to select MD instead of RA to determine TA.

Table 4-2 shows the TA values obtained from microfibril angle measurement. The results were first obtained by a derivative function, showing a transition age around age 18 (Table 4-2), and then by a segmented linear regression with a resulting TA of 15.9 years. The radial pattern of MFA is given with respect to cambial age in Figure 4-3. It shows more than two wood zones, causing difficulties to distinctly define JW and MW. This is in agreement with the conclusions of Clark and Saucier (1989). However, since a segmented regression was used two zones instead of three could be defined, one zone where MFA consistently decreased, and one zone where the value of MFA was constant.

Variation of TA with sampling height

In the following part TA was estimated by the segmented linear regression carried out on the MD variable.

While there is no significant difference of TA among stand densities, there is a significant difference in TA among sampling heights (Table 4-3). The results show that TA was 17.6 years at 2.4 m, 13.1 years at 5.1 m, and 12.0 years at 7.8 m (Table 4-4). Thus, it was observed that the transition age occurred earlier with increasing sampling height (Tables 4-4 and 4-5). The shorter juvenile period up the stem could be a consequence of many factors, including a reduction of crown volume with tree aging which is linked to the production of JW, a possible attenuation of growth rate due to cambium aging, or most likely, a weak growth rate and activity of lower branches while stand canopy closes. These conditions induce a JW with more adult characteristics at the top of the tree (Alteyrac et al. 2005; Yang et al. 1986) because rings are smaller and more dense.

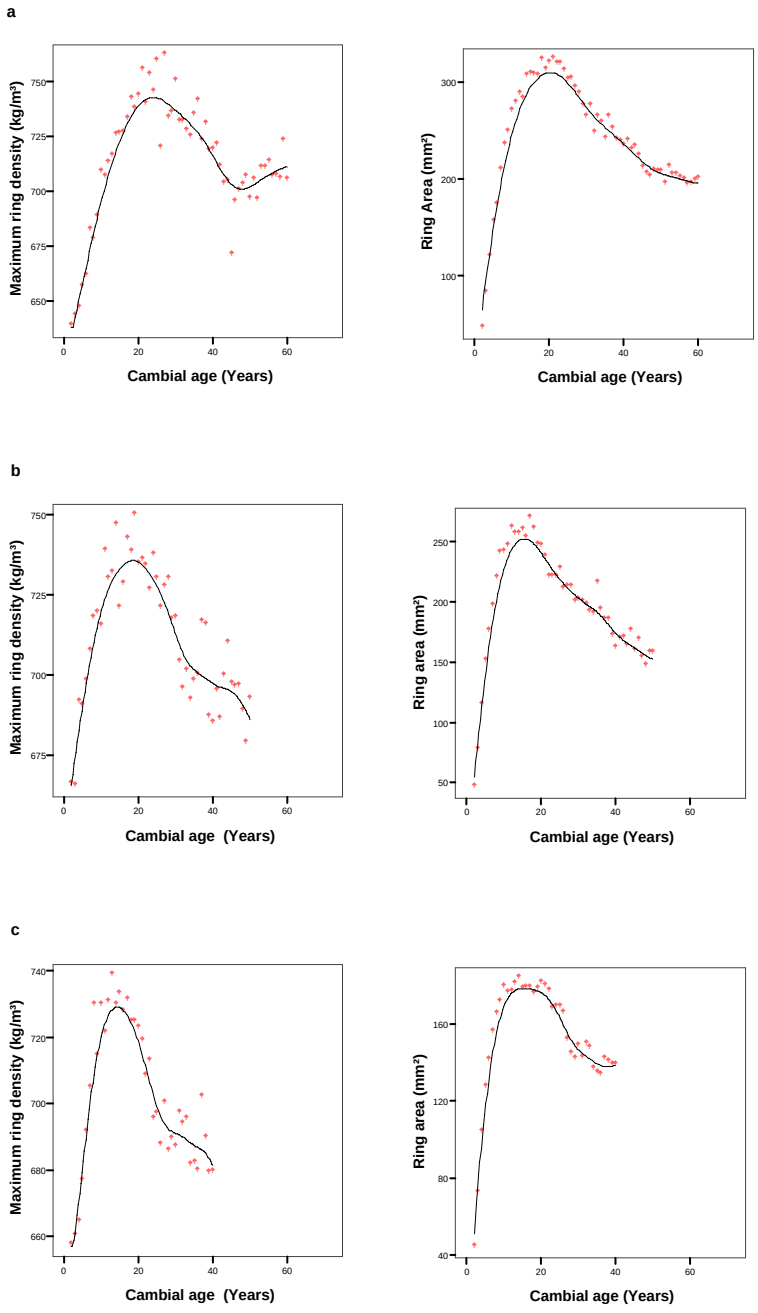


Figure 4-4. Similar radial patterns for maximum ring density and ring area at the following sampling heights (a) 2.4 m, (b) 5.1 m, and (c) 7.8 m.

Table 4-3. ANOVA of transition age at three stand densities (SD) and at three sampling heights (SH).

Source of variation	Df	M Square	F	Sig.
S.D.	2	21.0	0.83	n.s
S.H.	2	298.4	11.757	0.001**
S.D. x S.H.	4	21.7	0.858	n.s

Values with n.s are not significant at 0.05

Variation of TA with stand density

No significant difference in TA among stand density groups and no interaction between stand density and sampling height were observed (Table 4-3). This is consistent with the results of Yang (1994) on black spruce and involves that TA does not depend on stand density in the stand density range considered in this study. Moreover, no significant difference in RD between the three stand density groups was found in a previous study (Alteyrac et al. 2005). The lack of difference was explained by both the low stand density range and the high average stand density value (Zhang and Chauret 2001) of over 1400 trees/ha.

Table 4-4. Average transition age at three sampling heights and in three stand density groups. Results with different letters are significantly different at 0.05 probability level (Duncan test, read in column).

Sampling height	Stand density			Average
	Low	Medium	High	N=36
2.4 m	15.2 A	18.4 a	19.7 *a*	17.6 A
5.1 m	13.4 A	12.3 b	14.2 *ab*	13.1 B
7.8 m	12.1 A	11.9 b	12.0 *b*	12.0 B

Estimation of the juvenile wood proportion

Even though the number of rings corresponding to JW is unchanged by stand density variation, this does not necessarily indicate that the JW area is not affected. It was shown that growth traits depend on stand density, particularly in JW (Alteyrac et al. 2005). In that study, it was emphasized that a wide spacing allows a higher growth rate, which means larger rings during the juvenile period. In consequence, this induces a higher juvenile area for wider spacing, although the period of juvenility is unchanged. At the same time the diameter of the trees depends on tree spacing (or sampling height) so that both basal area of the tree and basal area of JW are changing with respect to stand density (or sampling height). This observation led us to estimate the JW proportion for the three different stand densities and sampling heights.

The JW proportion was estimated on an area or volume basis with equations (4.9) and (4.12) according to whether it is calculated on a cross section or a log. As an example, the proportion of juvenile wood was calculated for 60 years old trees corresponding to the annual ring produced in 1980 (Table 4-5).

During the first years of growth and up the stem, the trees produce JW only under the effect of the live crown. This is characterized by the horizontal line at 100% shown in Figure 4-5. Then the JW proportion decreases because the cambium stops to produce JW and starts to produce MW while the live crown moves up. The tree growth process involves that trees are producing JW in the live crown, while they are ending producing JW in the middle of the tree, and are producing MW in the butt log. Thus, while the tree is aging, there is a tendency of the JW proportion to reach a plateau (Figure 4-5) whatever the sampling height considered. The plateau can be explained by the ring width and ring area decreasing that induce a very low increasing of volume.

The results reveal a lower proportion of JW area for the low stand density (Table 4-5). These results are based on estimation and can not be supported by a statistical analysis of variance. Nevertheless they are consistent with some studies where a lower basal area proportion of JW associated to fast growing southern pine trees was observed (Clark and Saucier 1989). Moreover, in terms of volume, higher stand density produced a higher proportion of JW. This is mainly due to the fact that the total radius of the tree is reduced although TA is slightly affected by increasing stand density, which in turn induces a higher JW proportion for high stand densities.

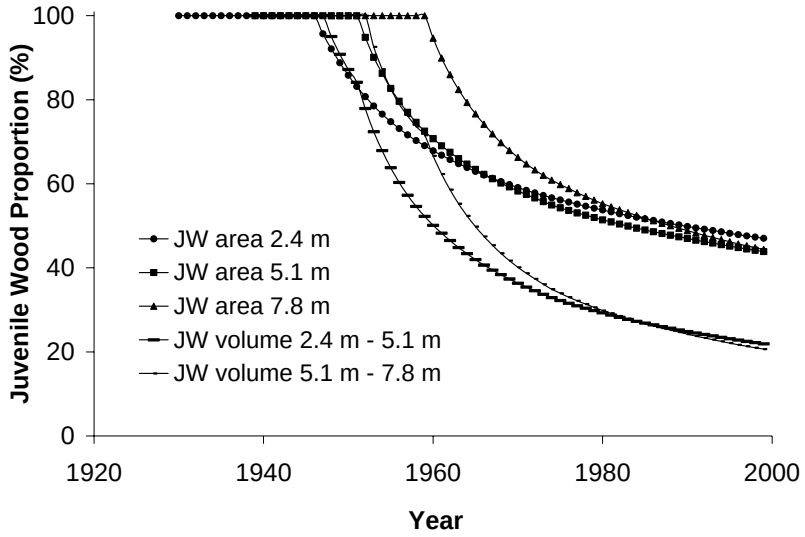


Figure 4-5. Estimation of the juvenile wood proportion at three sampling heights (% of area) and in the two logs (% of volume).

Table 4-5. Estimation of average juvenile wood (JW) proportion that trees would have had in 1980 (about 60 years old).

Stand Density	Sampling height	JW boundary (Years)	JW boundary (mm)	Total radius (mm)	Proportion of JW area (%)	Proportion of JW volume (%)
Low	2.4 m	15.2	31.4	64.8	45.8	
	5.1 m	13.4	28.2	54.6	48.8	23.6[1]
	7.8 m	12.1	23.6	44.7	49.7	25.9[2]
Medium	2.4 m	18.4	34.8	61.5	54.3	
	5.1 m	12.3	25.8	51.7	47.0	27.5[1]
	7.8 m	11.9	20.7	37.7	51.7	25.7[2]
High	2.4 m	19.7	35.5	57.3	59.9	
	5.1 m	14.2	26.0	48.0	51.4	33.01
	7.8 m	12	20.5	35.1	54.8	29.7[2]

1. Proportion of juvenile wood between 2.4 m and 5.1 m

2. Proportion of juvenile wood between 5.1 m and 7.8 m

Considering the variation among sampling heights, a variation of JW transition age was observed, and consequently a variation of the JW radius. As both JW radius and total radius were found to vary with respect to sampling height, this resulted in an unchanged JW proportion (Table 4-5). A 60-year-old tree growing in a low stand density site has an estimated JW area of 45.8% at a 2.4-m height (Table 4-5). The variations of TA and JW diameter from the bottom to the top of the tree confirm former results about the conical shape of JW (Zobel et al. 1959, Yang et al. 1986).

Yang (1994) found the percentage of JW basal area to be 50% for black spruce trees at 35 years old, at breast height and in a plantation. Under the same conditions, a 35-year-old tree in our study (1965) would have a JW basal area of about 65% (Figure 4-5). These results show that fast growing conditions result in a lower proportion of JW area. Nevertheless, these close results are underlying the difficulty involved in determining the exact amount of JW and the TA. But as evidence, our results show that the proportion of JW decreases with age (Figure 4-5). This demonstrates the benefits of longer rotations for black spruce.

4.4. Conclusion

The results of this study lead to the following conclusions:

Two variables, maximum ring density and ring area, were used to determine the transition age at different stand density groups and sampling heights. From the observations of this study, the determination of transition age remains difficult since a standard method for this determination does not yet exist and because of the presence of a likely transition wood. Nevertheless, the use of maximum ring density and segmented linear regression seem to be suitable to determine a theoretical boundary between juvenile wood and mature wood.

Transition age varies significantly with sampling height (12 years at 7.8m, 13.1 at 5.1m and 17.6 at 2.4m), and occurs earlier at the top of the tree. It results in a lower juvenile wood diameter at top of the tree than at the bottom, producing a conical shape of the juvenile wood zone. Nevertheless, the variation of transition age does not seem to have an influence

on the proportion of juvenile wood. The simultaneous variation of juvenile wood diameter and tree diameter with height lead to a constant proportion of juvenile wood.

No significant differences in transition age were found between the three stand density groups.

Acknowledgments

The authors would like to thank Dr. Geoff Downes, of CSIRO Forestry and Forest Products, Australia, for his assistance in determining microfibril angle with the SilviScan and for his great effort to run our samples in a short time. We would like also to thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for funding under strategic grant no. 234774.

Chapitre 5. Mechanical properties in relation to selected wood characteristics of black spruce

Résumé

La relation entre la largeur de cerne, la densité du cerne, l'angle des microfibrilles, et les propriétés mécaniques (module d'élasticité et module de rupture en flexion statique) a été analysée à 2,4 m de hauteur dans l'arbre sur douze arbres d'épinette noire de 80 ans. Le module d'élasticité et le module de rupture ont été mesurés sur des éprouvettes de taille 10x10x150 mm³ et prélevées de la moelle vers l'écorce sur le côté sud. Les caractéristiques du cerne, la densité du cerne et la largeur de cerne ont été mesurés par rayons X, et l'angle des microfibrilles a été mesuré par le procédé Silviscan. L'impact de ces trois caractéristiques sur les modules d'élasticité et de rupture a été évalué en séparant la variation radiale de la variation entre les arbres en utilisant un modèle mixte. Premièrement, le module d'élasticité est corrélé linéairement à l'angle des microfibrilles et il est faiblement dépendant de la variation entre les arbres. Ce résultat confirme l'hypothèse selon laquelle la relation entre le module d'élasticité et l'angle des microfibrilles n'est pas dépendante du taux de croissance radial. Deuxièmement, la densité du cerne a une plus faible contribution pour prédire le module d'élasticité que le module de rupture. Dans les deux cas la largeur de cerne n'est pas un facteur significatif de variation des modules d'élasticité et de rupture.

Abstract

The relation between ring width, ring density, microfibril angle and bending properties were analysed at 2.4-m height on twelve 80-years-old black spruce trees. The moduli of elasticity and rupture were measured in the southernmost radial direction on specimens of size 10x10x150 mm³ obtained from pith to bark. Ring density and ring width were measured by X-ray densitometry, and microfibril angle was measured by the Silviscan technology. The impact of these three traits on the moduli of elasticity and rupture was evaluated by separating the radial variation from the variation among trees using a mixed model analysis. The results obtained show first that the modulus of elasticity is negatively correlated to microfibril angle. This result supports the assumption that the relation between modulus of elasticity and microfibril angle is not dependent on the radial growth rate. Secondly, ring density has a lower contribution in predicting the modulus of elasticity than the modulus of rupture. In both cases, ring width was not a significant factor of variation of the moduli of elasticity and rupture.

Key words: microfibril angle, modulus of elasticity, modulus of rupture, ring density, ring width, cambial age, mixed model.

5.1. Introduction

The properties of forest products depend strongly on wood characteristics such as tracheid length, microfibril angle and wood density. Traditionally, wood density is seen as the single most important factor, although other parameters (e.g. microfibril angle, spiral grain, compression wood, juvenile wood proportion and ring width) may have an equal or greater effect. Wood density is of key importance in forest products manufacturing because it has a major impact on yield, quality and value of wood-based composites and solid wood products and because it can be changed by silvicultural practices and genetic improvement (Zobel and van Buijtenen 1989, Walker and Woollons 1998). For instance, it is often admitted that wood density is a determinant factor of wood quality (Bamber and Burley 1983, Zobel and van Buijtenen 1989, Walker et al. 1993). However microfibril angle (MFA) in the second cell wall layer is known as one of the main determinants of stiffness (Cave 1968, 1969, Cave and Walker 1994, Walker and Butterfield 1996, Lindstrom et al. 2002) and longitudinal shrinkage (Harris and Meylan 1965).

Other wood characteristics such as ring width, cell structure, ring density, and latewood proportion can influence bending properties (Butterfield and Pal 1998). The early work of Wardrop (1951) showed that relationships exist between wood density, fiber length, MFA and compression wood. More recently, Zhang and Zhong (1992) demonstrated that a large MFA in juvenile wood of oak was negatively correlated to fiber length and that the relationship between tensile strength and MFA was significant. Microfibril angle has been several times described to decrease from pith to bark (Cowdrey and Preston 1966; Bendtsen and Senft 1986; Donaldson 1992; Butterfield and Pal 1998). Therefore, a large MFA in conifers juvenile wood reduces the stiffness of young trees and gives flexibility to prevent breaking in strong winds (Barnett and Bonham 2004). The literature shows that ring density and microfibril angle are two of the most determinant characteristics of wood in terms of shrinkage and strength properties.

The objective of this study was to quantify the impacts of ring width, ring density, and microfibril angle on black spruce wood stiffness and strength. The approach adopted

consists to separate explicitly the variation among the trees from the radial variation (within-trees) with a mixed model.

5.2. Material and methods

5.2.1. Material

Thirty-six black spruce trees were harvested in the Chibougamau area, 400 km north of Quebec City, Canada, in a naturally regenerated stand after a fire in 1906 (Alteyrac et al. 2005). All mechanical, physical and anatomical specimens were obtained from the same 30-cm long bolt taken at 2.4-m high in every tree. A 10-mm thick box-pith plank was cut from this bolt (Fig. 5-1). Two cross-sections were cut from this plank to produce specimens for the determination of the radial density and MFA profiles (specimen C about 20-mm long). The remaining part of the plank, part A was used for the determination of bending properties and part B for anatomical measurements of lumen area and cell wall thickness not presented in this paper.

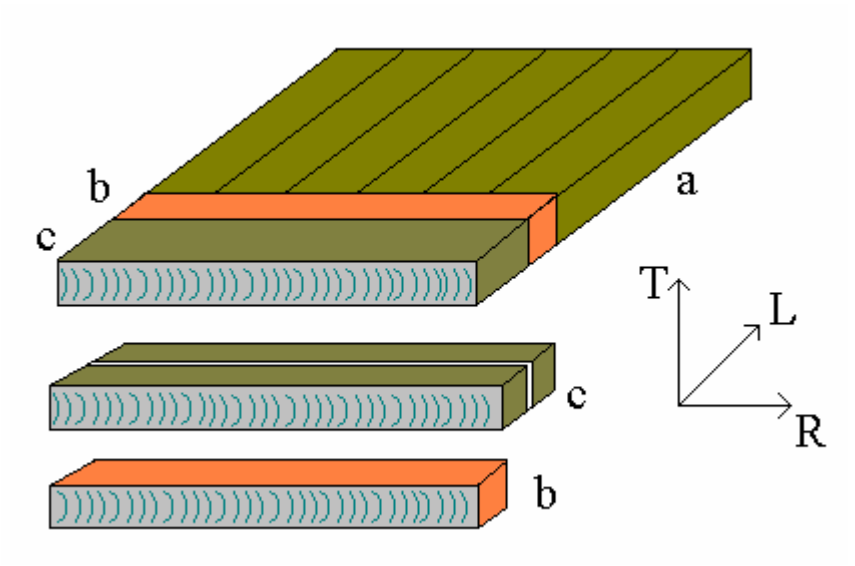


Figure 5-1. Preparation of specimens for a) mechanical features, b) anatomical characteristics and c) densitometry.

Ten-mm by 10-mm specimens were ripped from pith to bark in the southernmost radial direction in part A (Fig. 5-1) for the determination of the bending properties. Five or six specimens were produced this way depending on the bolt diameter. These specimens were trimmed to 150-mm long with special care in order to obtain specimens free of defects as much as possible. The resulting 10 mm x 10 mm x 150 mm (R x T x L) specimens were dried under restraint from green to 12% moisture content in a conditioning room (20°C, 65% HR).

The determination of MFA was carried out on specimens obtained from part C (Fig. 6-1) for 12 sample trees only. The specimens were cut to 10-mm long and placed into 95% and 100% ethanol for dehydration. They were then sent to the CSIRO Forestry and Forest Products Department where they were further processed to 2-mm by 7-mm (T x L) from pith to bark, and scanned.

From the remaining material of each radial section (part C), a 20-mm long specimen was removed to obtain a radial segment from pith to bark of 10 mm x 20 mm (T x L) in the southernmost direction. The segments were cut into 5 mm by 1.57 mm (T x L) strips with a specially designed pneumatic-carriage twin-blade saw. The sawn strips were extracted with a cyclohexane/ethanol (2:1) solution for 24 hours and then with hot water for other 24 hours to remove extractive compounds. After extraction, the strips were air-dried under restraint to prevent warping.

5.2.2. Methods

5.2.2.1. Wood characterization

The strips were scanned in the air-dried condition with an X-ray densitometer available at Forintek. The data obtained included ring basic density (RD) and ring width (RW).

Bending tests were performed on a MTS renew update package of 5 kN maximum load. The specimens were tested on three points bending with a cell load of 1 kN according to the ASTM D-143 standard for small clear specimens in a conditioning room (20°C and 65% HR) at 13.6% equilibrium moisture content. The specimens were laid pith side up with growth rings in the horizontal position with a span of 110 mm. The bending tests were performed twice, below the elastic limit and until rupture to measure MOE and MOR.

The MFA measurements were done with the Silviscan technology, a method including optical microscopy, X-ray diffractometry, X-ray densitometry and image analysis. The output is the MFA value associated to the distance from the pith in millimeters. The MFA was measured at each 2 mm in radial direction.

5.2.2.2. Statistical Analysis

The mixed model developed by the SAS Institute in 1992 is suitable for analyzing data with multiple hierarchical levels (Singer 1998). A mixed model was used by Guilley and Nepveu (2003) to determine the relation between ring density and ring width as a function of cambial age by considering three hierarchical levels: within tree level (radial variation from pith to bark or longitudinal variation from stump to tree top), tree level (range of tree height or tree diameter), and stand level (stand density or site fertility).

Because of limited data, the stand level was not considered here. Based on the first two levels, i.e. within tree and between tree, the general relation between the response variable represented by MOE or MOR and the explanatory variables represented by MFA, RD and RW, can be written as follows:

$$y_{ij} = \mu + \beta_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij} \qquad (5.1)$$

where y_{ij} is the value of MOE or MOR for specimen i obtained from tree j; μ is the overall mean; β_i is the mean effect of MFA, RD or RW measured on specimen i; γ_j is the random effect of tree j; and ε_{ij} is the error term following a normal distribution with a zero mean, and variance σ^2.

Non significant explanatory variables were progressively removed from the model at α=5%. Although 36 sample trees were collected, the statistical analysis was performed on 12 sample trees for which MFA measurements were done.

At least three hierarchical levels of factors could affect the relationships between MOE and MFA: within tree (radial variation from pith to bark, and longitudinal variation along the stem), tree (tree height, tree diameter), and stand (stand density, site fertility). In this study, only the within tree level represented by the radial axis, and tree levels were jointly considered with a mixed model.

5.3. Results and discussion

5.3.1. Results

The results obtained for MOE and MOR as a function of cambial age are presented in Fig. 5-2. From each specimen, rings were given the MOE and MOR value of the specimen and an average profile as a function of cambial age was calculated from these smoothed values. The results present an average profile obtained from the 36 sample trees. They clearly show a fast increase of MOE and MOR until a cambial age of 25 years where a plateau is reached. The cambial age of 25 years seems to be the point for separating visually juvenile wood from mature wood.

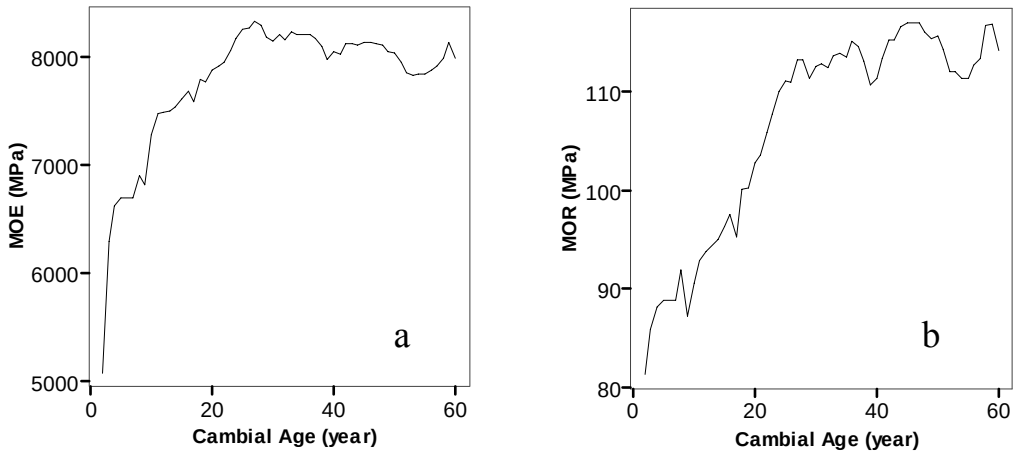


Figure 5-2. Radial variation from pith to bark of a) MOE and b) MOR as a function of cambial age.

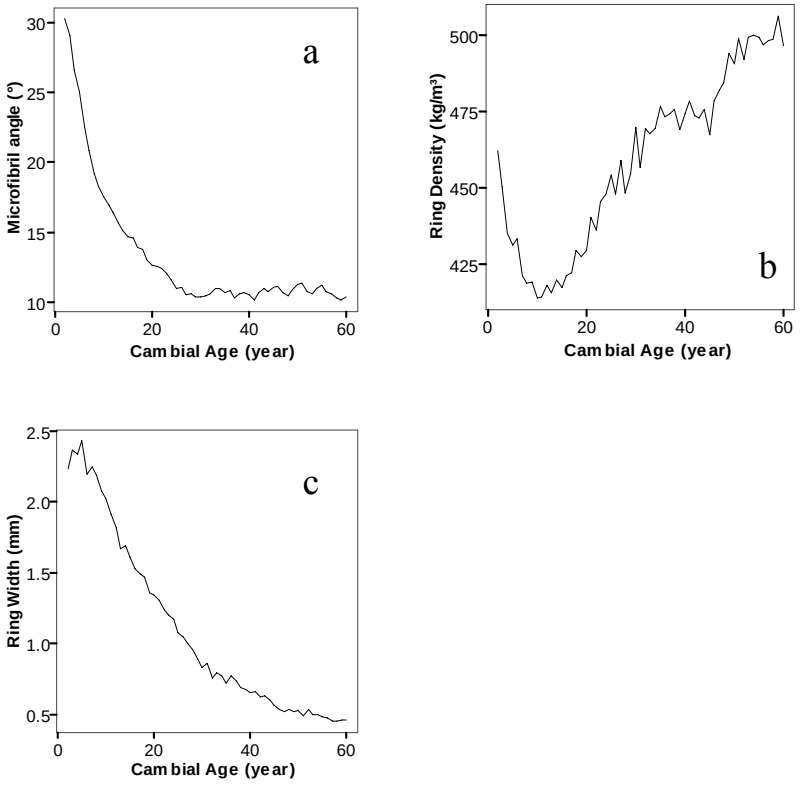


Figure 5-3. Radial variation of a) MFA ,b) RD and c) RW as a function of cambial age.

Table 5-1. Variation of MOE explained by MFA and random effect of trees.

$MOE = 9391.51 - 120.05 \times MFA + \gamma + \varepsilon$		
Variation due to MFA	Variation due to tree (γ)	Unexplained variation (ε)
72%	7.5%	20.5%

The radial profiles of RD, RW and MFA obtained from X-ray densitometry and Silviscan, are presented in Fig. 5-3. These results show that only MFA presents a strong relationship with MOE and MOR radial profiles. This similar but reverse profile between MFA and MOE/MOR is shown in Figs. 5-4a and 5-4b where a strong relation is visible and is somewhat consistent with the relation between MFA and MOE as found for radiata pine by Downes et al. (2002).

In the present study, a high MFA value is observed near the pith (Fig. 5-3a), while rings closer to the cambium have a lower MFA in agreement with results obtained by Butterfield and Pal (1998) for radiata pine. The RD pattern (Fig. 5-3b) is of type II as described by Panshin and DeZeeuw (1980). Ring density decreases until ring 10 and then increases outward. In contrast, the radial profile of MOE (Fig. 5-2a) presents a positive slope until ring 25 and then stays fairly constant thereafter.

Thus, the variations of the bending properties in the radial direction are small in mature wood, involving that this wood presents more stable mechanical properties than juvenile wood. The two different radial patterns of MOE and RD are represented in the graph of Fig. 5-4c which shows no relation between these two wood characteristics. Finally the RW profile (Fig. 5-3c) presents a constant decrease after ring 4 showing a pattern strongly different from the MFA and RD radial profiles. From Figs. 5-4e and 5-4f, no clear relation between RW and MOE is observed and no relation between RW and MOR seems to exist.

The first mixed model considered included the three independent variables MFA, RD and RW which are the wood characteristics which most likely will modify MOE. The non significant effect of RD and RW on MOE leads to remove those two variables from the

model. Table 5-1 presents the final model showing that MOE decreases by 120 MPa when MFA increases by one degree in the radial direction. Moreover the model indicates that, at a given MFA value, the MOE is different from one tree to another because of the tree effect γ. However this between-tree variation is weak with only 7.5% of the variation of MOE. Consequently, the within-tree variation is much more important than the between-tree variation.

The modulus of rupture was modelized with the same approach used for MOE, considering a starting model with MFA, RD, and RW variables which are likely to have an effect on MOR. The final model obtained is given in Table 5-2. This model suggests that the variation of MOR is dependent on both RD and MFA. As it was the case for the MOE model (Table 5-1), RW was not found to be a significant predictor of MOR. The model shows that MOR increases by 0.18 MPa and decreases by 0.97 MPa when RD and MFA increase by one unit respectively. The higher proportion of the variance due to trees (22%) in the MOR model compared to 7.5% in the MOE model, means that trees have a stronger effect on MOR variation than on MOE variation. This stronger effect could be a consequence of defects (most likely knots) present in the specimen. Although clear specimens were used in bending tests some of them presented small defects that can be a factor of variation between trees. In contrast with the model of Table 5-1 where RD did not explain significantly the MOE variation, RD becomes significant for MOR by explaining 16% of its variation. Nevertheless MFA remains the most important factor determining the mechanical properties of wood with 50% of the variation.

Table 5-2. Variation of MOR explained by MFA and RD, and random effect of trees.

$$MOR = 33.77 - 0.97 \times MFA + 0.18 \times RD + \gamma + \varepsilon$$

Variation due to MFA	Variation due to RD	Variation due to tree (γ)	Unexplained variation (ε)
50%	16%	22%	12%

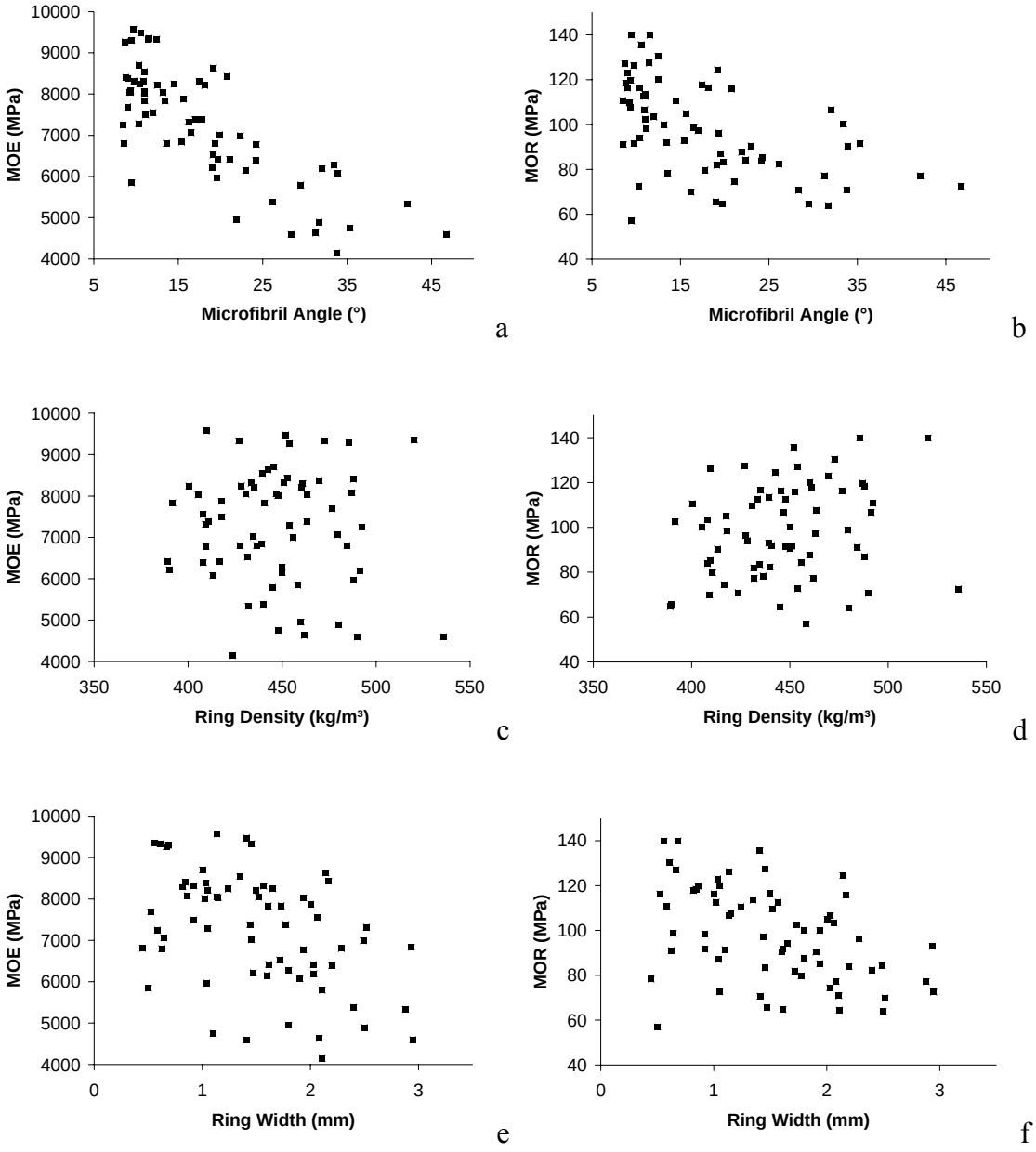


Figure 5-4. Relation between a) MFA and MOE , b) MFA and MOR, c) RD and MOE, d) RD and MOR, e) RW and MOE, and f) RW and MOR.

5.3.2. Discussion

While MOE seems to be dependent on MFA only, MOR seems to depend on both MFA and RD. This observation is partially consistent with the results of Yang and Evans (2003) where it was shown that MFA had a greater influence than RD on the MOE of eucalypt and that high microfibril angle was associated to low stiffness in radiata pine (Downes et al. 2002). Booker et al. (1998) also indicated in radiate pine that the relationship between modulus of elasticity and MFA is significant, while the relationship with density is not significant.

A study on radiata pine (Cown et al. 1999) showed a significant effect of both wood density and MFA on clearwood performance of the juvenile wood, while in the mature wood density alone was important. This conclusion is contrasted by the present study which demonstrates that RD has a low impact on the mechanical properties of black spruce as shown in Figs. 5-4c and 5-4d and in the mixed model analysis. The MOE and RD profiles shown in Figs. 5-2a and 5-3b highlight a different effect of RD on MOE according to the position of the ring from pith to bark and probably according to the type of wood. In juvenile wood RD has a negative effect on MOE while it has a positive effect in mature wood.

The similar but reverse pattern of MFA and MOE noticed earlier is confirmed by the mixed model: MFA appears to be a main predictor of stiffness. In both MOE and MOR mixed models, RW seems to have no significant effect. This conclusion is supported by the previous work of Fernandez-Golfin and Diez (1994). They showed that RW had little impact on the variation of wood density and bending strength of structural timber and therefore, was of little value in predicting the mechanical properties of wood.

Models of MOE and MOR are interesting on the biological aspect because they refer to two main characteristics of wood and are built on the same design, one or two main effects and a random effect of tree. The significance of both MFA and RD in the mixed model analysis leads to focus on the cell structure and on an analogy with a spring. There is a similarity between the physical behavior of a spring and MFA in the S2 layer of the cell wall. Guitard

and Gachet (2004) presented a micro model in which the ultrastructure is related to the elastic anisotropy of wood to explain the variability of MOE from MFA. Indeed, S2 is the thicker layer in the cell wall and therefore the more important. According to the microfibril structure in the cell wall, a tracheid can be considered as a spring, in which the cell wall is related to the wire and the cell diameter is related to the diameter of the spring. The positive and significant impact of wood density on MOR variation can also be partially explained by this analogy. Indeed, the thicker wire which corresponds to a thicker cell wall, or the smaller diameter of the spring which is equivalent to a smaller lumen diameter, induce a higher stiffness of the spring or the tracheid.

5.4. Conclusion

Microfibril angle, ring density and ring width present a specific radial variation with respect to cambial age from pith to bark. The mechanical properties also present a specific radial variation from pith to bark. A visual examination can highlight a complex relationship between these traits, but only the relation between the modulus of elasticity and microfibril angle is clear. The mixed model was then used to analyse these relationships. This work lead to the following conclusions: Microfibril angle and MOE presented a strong negative correlation; microfibril angle alone is a good predictor of MOE while ring density and microfibril angle are a good predictor of MOR. Ring density is a better predictor of strength than stiffness.

In both MOE and MOR mixed models, the tree random effect is important. This means that, regardless of MFA and RD, the MOE and MOR mean values depend on tree characteristics. However, the tree variance is less than the error variance indicating that other factors of variation exist within trees. The absence of a significant random effect on the coefficient of the independent variables in MOE and MOR models, indicates that the effect of MFA on MOE, and the effect of RD and MFA on MOR are constant from one tree to another.

Acknowledgments

We would like to thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for funding under strategic grant no. 234774.

Chapitre 6. Autres résultats

Trois autres résultats importants ont été obtenus au cours de ce projet mais n'apparaissent pas dans les trois articles précédents c'est pourquoi ils sont présentés dans ce dernier chapitre. Ils constituent une grande part de la partie expérimentale et ne peuvent donc pas être omis. Ces résultats concernent en premier lieu l'influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés mécaniques, l'influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur le retrait, et enfin le profil radial de la moelle vers l'écorce des propriétés anatomiques.

6.1. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur le MOE et MOR

Tel que décrit dans la méthodologie, les éprouvettes destinées aux essais de flexion statique ont été prélevées dans la direction radiale sur tous les arbres aux trois hauteurs mentionnées et dans les trois groupes de densité de peuplement. Les essais ont été effectués au laboratoire de Forintek Canada Corp. dans une salle conditionnée. Les éprouvettes du côté de l'écorce ont été éliminées de l'analyse lorsqu' elles n'atteignaient pas la largeur de 1 cm en direction radiale du fait du diamètre du billon.

Les résultats statistiques obtenus par une analyse de variance ont montré que la densité de peuplement et la hauteur dans l'arbre n'ont pas d'influence significative sur le MOE ni sur le MOR. Les résultats du tableau 6-1 présentent les valeurs obtenues dans chaque catégorie pour MOE et MOR. On constate une différence par rapport aux valeurs moyennes trouvées par Jessome (1977) (Tableau 1-2) qui peut s'expliquer par l'échantillonnage et l'origine géographique des arbres.

Tableau 6-1. Module d'élasticité et de rupture en flexion statique (H=12 %) à différentes hauteurs et densités de peuplement.

Groupe densité de peuplement	MOR (MPa)	MOE (MPa)
1790 t/ha	98,5	7451
2700 t/ha	100,3	7355
3400 t/ha	99,6	7409
Hauteur dans l'arbre		
2,4 m	96,1	7064
5,1 m	98,3	6833
7,8 m	97,6	6947

Dans le cas de Jessome (1977) les essais ont été effectués sur des éprouvettes de taille 5 x 5 x 76 cm³ tandis que la taille des éprouvettes de cette étude est de 1 x 1 x 15 cm³. De plus l'origine géographique des arbres est très localisée dans notre cas. Le mode de calcul est également un facteur de variation car dans notre cas on a calculé une moyenne arithmétique incluant toutes les éprouvettes de la moelle vers l'écorce. Une moyenne pondérée tenant compte de la proportion de bois juvénile ou du nombre d'éprouvettes extraites du bois mature aurait donné un résultat différent.

On observe par exemple pour MOE, sur la figure 6-1, que le profil présente une hausse de la moelle vers l'écorce. Les résultats statistiques n'ont montré aucune interaction entre la distance radiale et la hauteur dans l'arbre ni entre la distance radiale et la densité de peuplement bien que les courbes ne soient pas parallèles sur la figure 6-1.

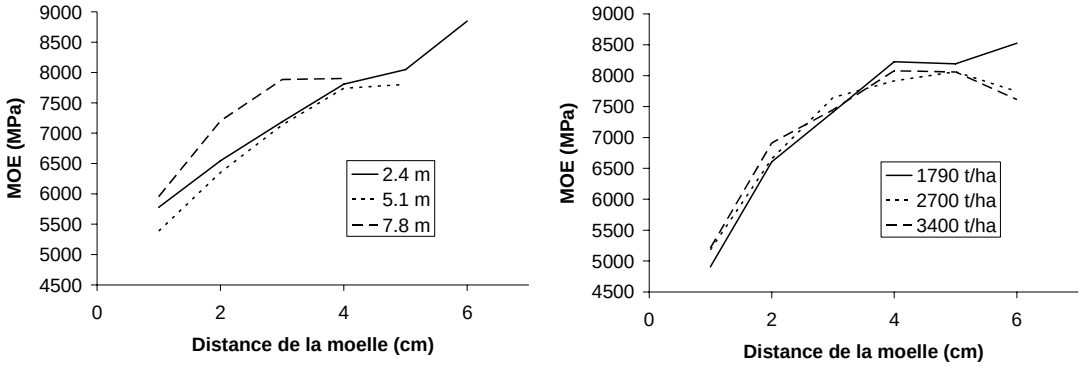


Figure 6-1. Profil radial de la moelle vers l'écorce du module d'élasticité (H=13.6%) à différentes hauteurs et densités de peuplement.

On observe facilement une différence significative du MOE en fonction de la distance radiale. Cela suggère que les variations les plus importantes se produisent de la moelle vers l'écorce. Ces résultats rappellent ceux que l'on a obtenus dans le chapitre 3 sur la largeur et la masse volumique des cernes pour lesquels on constatait peu d'influence de la hauteur dans l'arbre et de la densité de peuplement mais où les variations radiales étaient très importantes.

6.2. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur le retrait

Le retrait a été mesuré du point de saturation des fibres jusqu'à 13.6% d'humidité d'équilibre sur les éprouvettes destinées aux tests de flexion statique. Un micromètre de précision relié à un ordinateur a permis d'effectuer une saisie automatique des données.

Le retrait longitudinal a présenté des mesures plus imprécises que les données obtenues pour le retrait radial et tangentiel. En effet, l'effet de torsion et de déformation lors du séchage de l'éprouvette a entraîné une certaine imprécision sur la mesure de sa longueur.

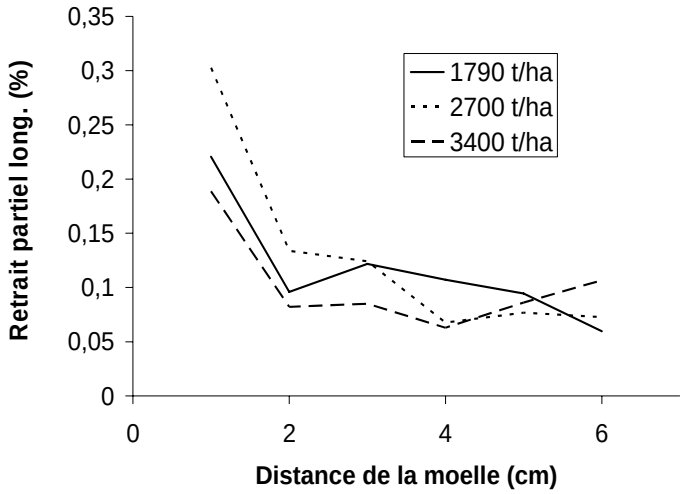


Figure 6-2. Variation radiale du retrait partiel longitudinal : effet de la densité de peuplement.

Néanmoins, l'analyse statistique a montré que le retrait longitudinal est plus faible dans le groupe à forte densité de peuplement. On constate également une forte variation radiale du retrait partiel longitudinal essentiellement dans le bois juvénile (Figure 6-2).

Les retraits partiels radial et tangentiel ne semblent pas être modifiés significativement par les variations de densité de peuplement, dans l'intervalle considéré de cette étude, ni par la variation en hauteur dans l'arbre. Par contre on note une variation radiale de la moelle vers l'écorce de ces propriétés (Figure 6-3). Toutefois, il faut noter que les éprouvettes situées près de la moelle présentaient une grande courbure des cernes qui ne permettait pas de dissocier le sens tangentiel du sens radial. Ainsi pour les éprouvettes proches de la moelle, le retrait mesuré sur chaque face est une combinaison du retrait partiel radial et du retrait partiel tangentiel.

Le rapport T/R moyen (1,8) est légèrement plus bas que celui qui est admis pour l'épinette noire (1,95) (Jessome 1977, Tableau 1-2).

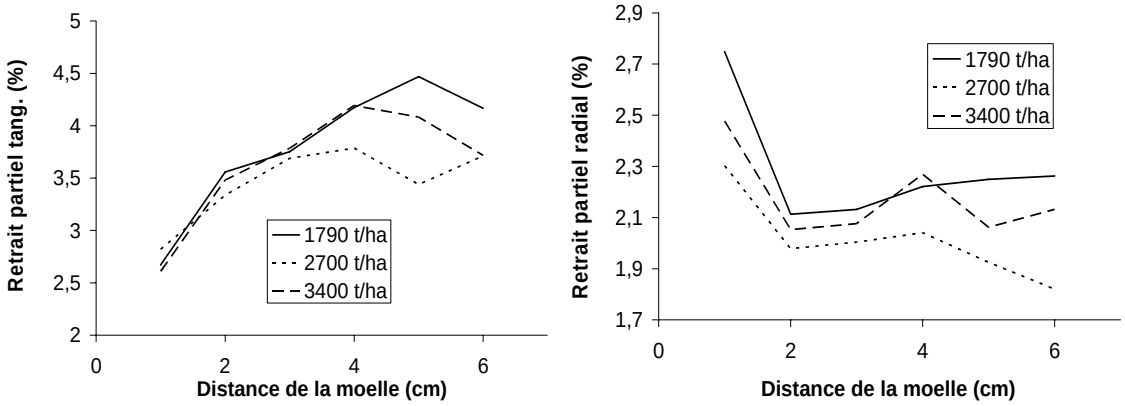


Figure 6-3. Variation de la moelle vers l'écorce des retraits partiels tangentiel et radial : effet de la densité de peuplement.

Tableau 6-2. Retraits partiels radial et tangentiel.

Hauteur	Retrait partiel radial (%)	Retrait partiel tangentiel (%)	Rapport T/R
2,4 m	2,1	3,8	1,8
5,1 m	2,2	3,4	1,5
7,8 m	2,1	4,0	1,9
Densité de peuplement			
1790 t/ha	2,2	4,0	1,8
2700 t/ha	2,0	3,6	1,8
3400 t/ha	2,1	3,9	1,9

6.3. Profil radial de propriétés anatomiques

L'étude de la structure anatomique en coupe transversale a été effectuée sur 6 arbres échantillons à hauteur de 2,4 m en raison du temps de préparation des coupes microscopiques, du temps de photographie des coupes et de l'analyse de chaque cerne.

Le résultat de l'examen microscopique des coupes transversales et de l'analyse des images sur WinCell est présenté dans la figure 6-4. Cette figure présente la variation radiale du pourcentage de paroi cellulaire par rapport à la surface totale de la cellule, de la moelle vers l'écorce, dans le bois initial et dans le bois final. Ce pourcentage est calculé par le rapport de la surface de paroi sur la somme des surfaces de lumen et de paroi, dans le bois initial et dans le bois final.

$$P_{BI}(\%) = \frac{Surface_paroi_{BI}}{Surface_paroi_{BI} + Surface_lumen_{BI}} \times 100$$

$$P_{BF}(\%) = \frac{Surface_paroi_{BF}}{Surface_paroi_{BF} + Surface_lumen_{BF}} \times 100$$

La particularité de cette courbe est sa ressemblance avec celle de la densité du bois (Figure 3-4), lesquelles présentent un creux à hauteur de l'age cambial de 10 ans. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Nicholls (1984) qui a mis en évidence la corrélation entre la densité du bois et la proportion de paroi cellulaire chez le pin radiata. On note sur la figure 6-4 que les profils dans le bois initial et le bois final se comportent de manière identique. De plus on constate une stabilisation dans le bois mature du pourcentage de paroi cellulaire ce qui devrait induire une stabilisation de la densité. En effet, si l'on considère que la densité de la paroi cellulaire est constante et égale à 1,53 alors le pourcentage de paroi cellulaire devrait être un indicateur de la densité du bois. Or la figure 3-4 montre que la masse volumique des cernes augmente légèrement dans le bois mature. Ainsi on met en évidence l'importance du pourcentage de bois initial (Figure 3-3) sur la masse volumique des cernes. En effet dans le bois mature, la diminution du pourcentage de bois initial

entraîne une augmentation de la masse volumique des cernes bien que ceux-ci soient composés d'un pourcentage de paroi cellulaire constant de la moelle vers l'écorce.

Les variations d'un cerne au suivant traduisent un effet possible du climat mais également les erreurs de mesures. La figure 6-4 montre donc l'effet de la structure anatomique du bois en coupe transversale sur la densité du cerne. Elle met également en évidence les variations internes, de la moelle vers l'écorce d'une part, et entre le bois initial et le bois final d'autre part.

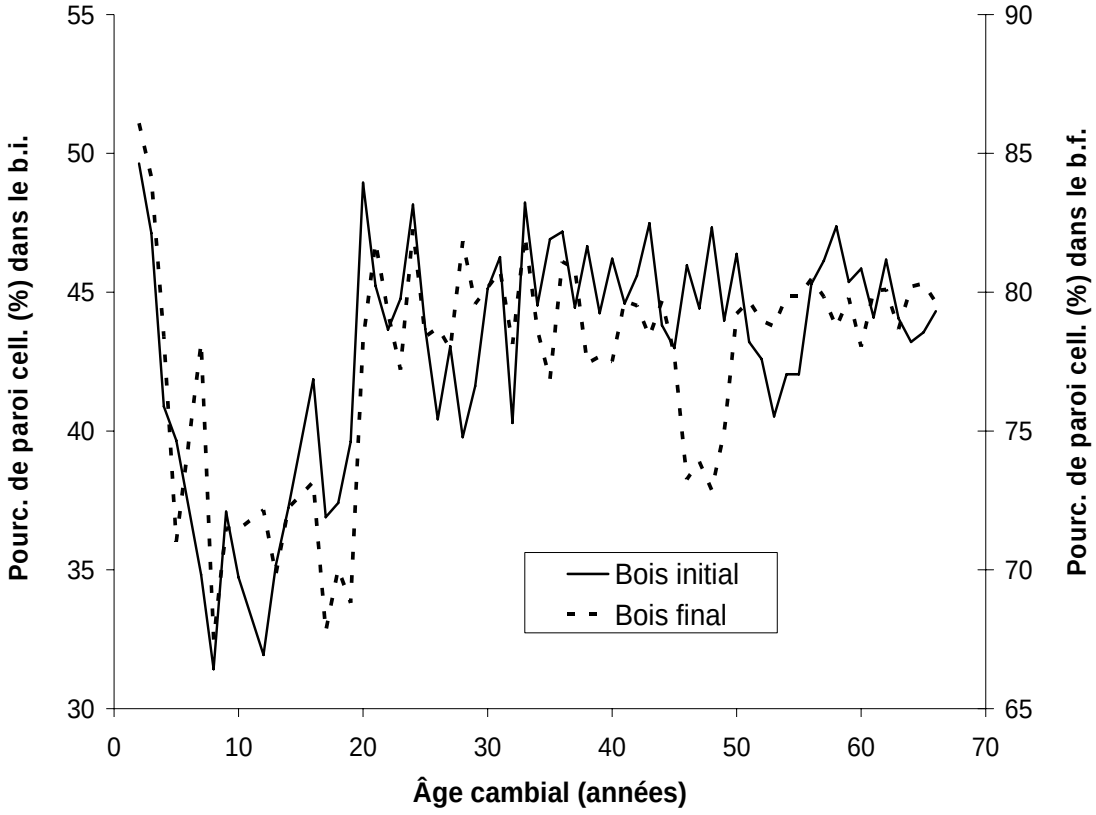


Figure 6-4. Variation radiale du pourcentage de paroi cellulaire dans les bois initial et final en fonction de l'âge cambial.

6.4. Conclusion

Les résultats présentés dans cette partie montrent les variations de la moelle vers l'écorce de la proportion de paroi cellulaire, du retrait et des propriétés mécaniques.

La forte ressemblance du profil de densité avec le profil de proportion de paroi cellulaire suggère une relation de cause à effet entre la structure anatomique en coupe transversale et les propriétés physiques du bois.

Ces résultats mettent en évidence la faible influence de la densité de peuplement, pour ce site considéré, et de la hauteur sur les propriétés du bois au niveau macroscopique. Ainsi, le retrait et les propriétés mécaniques mesurés sur des éprouvettes n'ont pas présenté de variation significative avec ces deux variables indépendantes.

Conclusion générale

Trente-six arbres ont été sélectionnés dans la région de Chibougamau à 400 km au nord de Québec sur un site d'un demi hectare environ, caractérisés par leur densité locale de peuplement, puis répartis dans trois groupes de densité de peuplement. La densité locale de peuplement a été déterminée par le décompte des arbres voisins de l'arbre central présents dans un rayon de 4 m autour de celui-ci. L'ensemble des caractéristiques dendrométriques des arbres, les conditions climatiques de la région, ainsi que l'indice de station indiquent que les arbres ont connu une croissance lente. Sur chaque arbre, trois billons de 30 cm de longueur ont été prélevés à 2,4 m, 5,1 m et 7,8 m et ont constitué la base de l'échantillonnage de cette étude. Ainsi, à partir de ces billons, plusieurs types d'échantillons destinés à l'étude anatomique, densitométrique et mécanique ont été prélevés suivant l'axe radial en direction sud, de la moelle vers l'écorce, et en tenant compte autant que possible de l'âge cambial. De cette façon, toutes les caractéristiques étudiées ont été représentées par un profil radial de la moelle vers l'écorce et toutes les analyses statistiques ont tenu compte de cette variabilité radiale pour comparer les trois hauteurs et les trois groupes de densité de peuplement.

Au terme de cette étude, on remarque la forte variation radiale de nombreuses caractéristiques du bois bien mise en évidence lorsqu'elle est présentée en fonction de l'âge cambial. On constate que la densité de peuplement, dans l'intervalle étudié, 1790-3400 arbres/ha, semble jouer un rôle assez faible sur les caractéristiques du bois, tandis que l'effet de la hauteur dans l'arbre est plus important. Toutefois, lorsqu'il existe un effet de la densité de peuplement, on constate qu'il est plus marqué sur les propriétés liées à la croissance comme la largeur des cernes et la surface des cernes, que sur les propriétés liées à la masse volumique. Cela peut être interprété comme un dépassement de la limite de densité de peuplement au-delà de laquelle celle-ci a peu ou pas d'influence sur la masse volumique du bois comme cela l'a déjà été suggéré, ou par la faible amplitude de densité de peuplement constituant l'échantillonnage de cette étude ou encore par la variabilité entre les arbres.

On note aussi que l'effet de la hauteur dans l'arbre sur la densité du bois est accentué dans le bois juvénile, zone de l'arbre où la croissance est plus rapide. Les propriétés varient de telle façon que, pour le même âge cambial dans le bois juvénile, les cernes du haut de l'arbre sont plus denses et plus étroits que ceux du bas de l'arbre.

On retient de cette étude que le bois juvénile est une zone dans laquelle les propriétés varient continuellement jusqu'à la limite du bois mature. Il apparaît donc comme un bois de transition pour les différentes propriétés anatomiques, physiques et mécaniques. S'étendant de la moelle jusque vers le vingtième cerne environ, il est le siège de fortes variations radiales pour la plupart des propriétés étudiées. Il se différencie nettement du bois mature qui présente beaucoup plus d'homogénéité et dont les variations radiales en amplitude sont plus faibles.

Plus les échantillons sont prélevés dans la partie haute de l'arbre et plus la transition du bois juvénile au bois mature est précoce. L'étude met en évidence une différence significative de l'âge de transition entre la première hauteur (17 ans à 2,4 m) et la troisième hauteur de l'arbre (12 ans à 7,8 m). De plus, la transition précoce vers le bois mature s'accompagne d'une augmentation de la densité du bois juvénile avec la hauteur dans l'arbre. Le bois juvénile en haut de l'arbre semble donc acquérir les caractéristiques du bois mature. Il est plus dense et présente des cernes plus étroits, ce qui pourrait être la conséquence d'un vieillissement cellulaire du cambium ou d'une augmentation de la concurrence entre les arbres combinée à une diminution du houppier.

Contrairement à la hauteur dans l'arbre, la densité de peuplement n'a pas d'influence significative sur l'âge de transition entre le bois juvénile et le bois mature. On a quand même noté une tendance montrant que les arbres du groupe de faible densité de peuplement présentent en moyenne un âge de transition plus avancé.

Si l'on tient compte à la fois de la variation de l'âge de transition du bois juvénile au bois mature, de la variation de la largeur des cernes et de la variation du diamètre du tronc, on s'aperçoit que la proportion volumique estimée de bois juvénile est plus grande dans le groupe de peuplement dense mais qu'elle ne varie pas selon les trois hauteurs dans l'arbre.

L'étude de la proportion volumique de bois juvénile met en relief l'effet de la taille des arbres. En effet, la production en volume de bois juvénile semble relativement égale pour les trois classes de densité, mais la diminution de la taille des arbres dans le peuplement dense entraîne une augmentation de la proportion volumique de bois juvénile.

L'étude des relations entre les caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques par l'utilisation de modèles mixtes a montré une forte dépendance du MOE à l'angle des microfibrilles et du MOR à l'angle des microfibrilles et à la masse volumique des cernes. On note que la densité des cernes a un plus grand effet sur le MOR que sur le MOE, mais aussi que la largeur des cernes est sans effet significatif sur ces deux propriétés.

Dans le cas de peuplements naturels et d'arbres de petite taille comme c'est le cas ici, l'étude révèle qu'il serait plus important de tenir compte de la hauteur dans l'arbre plutôt que de la densité de peuplement, ceci permettrait d'anticiper les variations des propriétés du bois. Dans un contexte de forêt surexploitée il serait peut-être préférable de mieux tenir compte de la variation intra arbre afin d'estimer avant le sciage les propriétés du bois. L'industrie du bois est de plus en plus orientée vers la production de produits aux caractéristiques homogènes et à l'élimination de toute forme de défauts. Pour répondre à cette nouvelle orientation de la production ligneuse, le présent projet a mis en évidence les relations cohérentes entre la taille des arbres et les variations longitudinales et radiales des propriétés anatomiques, densitométriques et mécaniques du bois. Ces relations cohérentes constituent une base solide pour une prochaine phase de recherche portant sur l'évaluation de la capacité des données d'inventaire peu coûteuses à prédire les variations intra et inter arbres des diverses propriétés du bois d'épinette noire de façon à satisfaire les nouvelles exigences de l'industrie.

Perspectives

En amont et en aval, plusieurs recommandations et perspectives se dégagent de ce travail.

En amont, les applications peuvent s'orienter vers la modélisation de la structure interne de l'arbre dans les deux directions privilégiées, longitudinale et radiale. En effet, on a pu voir qu'il existe de fortes variations radiales des propriétés du bois et elles ont comme origine des facteurs internes (génétiques) et également des facteurs externes (environnement). La modélisation de la croissance des arbres est déjà fortement développée tant sur le plan du volume de bois que sur la branchaison, les contraintes internes et l'architecture de l'arbre. Mais on ne trouve pas de modèle décrivant la succession des cernes et leur densité ainsi que la proportion de bois final. De même il serait intéressant de décrire et proposer un modèle pour les variations intra-cerne de la densité en fonction de paramètres propres à l'arbre considéré (espèce, compétition, volume du houppier, âge, hauteur).

Le deuxième point essentiel de l'étude concernant les perspectives en amont est l'intégration de la notion de qualité du bois dans les diagrammes de gestion de densité de peuplement. Actuellement ils intègrent le volume de bois sans mentionner la moindre information concernant la proportion de bois juvénile, la densité du bois, le module d'élasticité ou encore le prix.

Cela nous amène à la deuxième recommandation en aval de cette étude, à savoir la prise en compte lors du sciage du bois ou de manière générale lors de la transformation du bois, des différences considérables des propriétés qui existent entre le bois juvénile et le bois mature. Ignorer ce facteur conduit fatalement à utiliser un matériau dont les propriétés sont hétérogènes et dont le produit issu de ce matériau aura un prix moindre.

De plus, eu égard aux différences trouvées en hauteur dans l'arbre, il est fort possible que les billes de 2,4 m prélevées dans le haut ou le bas de l'arbre aient des propriétés différentes

et donc un prix du produit final différent. Il serait donc intéressant d'étudier l'impact économique d'une sélection anticipée des billes en fonction de la hauteur d'origine.

Bibliographie

ABDEL-GADIR Y.A. ET KRAHMER R.L. 1993a. Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-fir. Wood Fiber Sci. 25(3):242-249.

ABDEL-GADIR Y.A. ET KRAHMER R.L. 1993b. Genetic variation in the age of demarcation between juvenile and mature wood in Douglas-fir. Wood Fiber Sci. 25(4): 384-394.

ACKERMANN F. 1995. The relationship between forest site and intra-ring wood density factors for *Quercus robur* in SW France. Ann. For. Sci. 52(6):635-652.

ALAZARD P. 1994. Stand density and spacing of *Pinus pinaster*: consequences for growth and tree quality. Afocel Armef No 2: 129-144.

ALTEYRAC J., ZHANG S.Y., CLOUTIER A. ET RUEL J.C. 2005. Influence of stand density on ring width and wood density at different sampling heights in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Wood Fiber Sci. 37(1):83-94.

ANTAL M. ET MICKO M.M. 1994. Variation and field estimation of wood quality parameters for black spruce. Holzforsch. Holzverw. 46(4):70-72.

ARCHIBALD D.J. ET BOWLING C. 1995. Jack pine density management diagram for boreal Ontario. NEST TN-005 (NWST TN-31). Ontario Min. Nat. Res., Northeast and Northwest Science & Technology. 19pp.

AREVALO R. 2002. Influence des composantes secondaires et de la structure anatomique sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'Acajou. Thèse de doctorat Université Laval, Québec. 146pp.

ARNEY J.D. 1973. Tables for quantifying competitive stress on individual trees. Canadian Forestry Service. Pacific Forest Research Center. Victoria, B. C. Information Report BC-X-78. 45p.

BABOS K. 1973. Comparative anatomical investigation on pine wood from different sites (II). Holztechnologie 14(4): 203-207.

BAMBER R.K. ET BURLEY J. 1983. The wood properties of radiata pine. Commonwealth Agricultural Bureau; Slough; UK. 84 pp.

BAO F.C., JIANG Z.H., LU X.X., LUO X.Q. ET ZHANG S.Y. 2001. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. Wood Sci. Technol. 35: 363-375.

BARBOUR R.J. 1987. A preliminary study of the wood properties of fast-grown black spruce, *picea mariana*, from Quebec. Canadian Forest Service No. 33. 174p.

BARBOUR R.J. 1991. Evaluating the influence of spacing and thinning on wood quality. Space to grow: spacing and thinning in northern Ontario, Symposium Forestry Canada Water Tower Inn, Sault Ste Marie, Ontario. 18-20 Juin 1990. pp 158-162.

BARBOUR R.J., CHAURET G., COOK J., KARSH M.B. ET RAN S. 1994. Breast-height relative density and radial growth in mature jack pine (*Pinus banksiana*) for 38 years after thinning. Can. J. For. Res. 24:2439-2447.

BARBOUR R.J., JOHNSON J. ET AMUNDSON C. 1996. Modeling intraring x-ray density profiles. Proceedings, second workshop: Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, Berg-en-Dal, Kruger National Park, South Africa, August 26-31, 1996. 123-130; Workshop 1996 IUFRO S5.01-04- Topic 3.

BARBOUR R.J., SABOURIN D. ET CHIU E. 1989. Evaluation of basic wood properties of black spruce from Quebec part II. Canadian Forest Service No. 31, Forintek Canada Corp. Ottawa, Ontario. 36 pp.

BARNETT J.R. ET BONHAM V.A. 2004. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. Biological-Reviews. 79(2):461-472.

BEERY W.H., IFJU G. ET MCLAIN T.E. 1983. Quantitative wood anatomy - relating anatomy to transverse tensile strength. Wood Fiber Sci. 15(4): 395-407.

BENDTSEN B.A. 1978. Properties of wood from improved and intensively managed trees. Forest Prod. J. 28(10):69-72.

BENDTSEN B.A. ET SENFT J.F. 1986; Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. Wood Fiber Sci. 18(1):23-38.

BIBLIS E.J., CARINO H.F. ET 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.

BIBLIS E.J., CARINO H.F., BRINKER R. ET 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.

BOOKER R.E., HARRINGTON J. ET SHIOKURA T. 1998. Variation of Young's modulus with microfibril angle, density and spiral grain. Proceedings of the IAWA/IUFRO international workshop on the significance of microfibril angle, Christchurch, NZ: University of Canterbury. pp296-311.

BUES C.T. 1985. Influence of stand density and thinning on the wood density of South African Pinus radiata. Holz. Roh. Werkst. 43(2): 69-73.

BUSTOS C. 2003. Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire. Thèse de doctorat, Université Laval, Quebec, Canada. 133 pp.

BUSTOS C., MOHAMMAD M., HERNÁNDEZ R.E. ET BEAUREGARD R. 2003. Effects of curing time and end pressure on the tensile strength of finger-jointed black spruce lumber. Forest Prod. J. 53(11/12):85-89.

BUTTERFIELD B.G. ET PAL V. 1998. Relating microfibril angle to wood quality in clonal seedlings of radiata pine. Proceedings of the IAWA/IUFRO international workshop on the significance of microfibril angle, Christchurch, NZ: University of Canterbury. pp337-347.

CAMERON J.F., BERRY P.F. ET PHILLIPS E.W. 1959. The determination of wood density using beta rays. Holzforschung 13(3):78-84.

CAVE I.D. 1968. The anisotropic elasticity of the plant cell wall. Wood Sci. Technol. 2(4): 268-278.

CAVE I.D. 1969. The longitudinal Young's modulus of Pinus radiata. Wood Sci. Technol. 3(1): 40-48.

CAVE I.D. 1976. Modelling the structure of the softwood cell wall for computation of mechanical properties. Wood Sci. Technol.10(1):10-28.

CAVE I.D. ET WALKER J.C.F. 1994. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods : the influence of microfibril angle. Forest Prod. J. 44(5):43-48.

CHUI Y.H. ET ZHANG S.Y. 1997. Non-destructive evaluation of wood quality in Jack Pine family tests. CTIA/IUFRO workshop August 18-22, 1997. Timber management toward wood quality and end-product value. II.25-II.29.

CHUI Y.H., ZHANG S.Y., PRICE J.C. ET CHAURET G. 1997. Early response of balsam fir and black spruce to precommercial thinning.. CTIA/IUFRO workshop August 18-22, 1997. Timber management toward wood quality and end-product value. V.15-V.21.

CLARK A. ET SAUCIER J.R. 1989. Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in southern pine. Forest Prod. J. 39 (7/8):42-48.

CLARK A., SAUCIER J.R., BALDWIN V.C. ET BOWER D.R. 1994. Effect of initial spacing and thinning on lumber grade, yield, and strength of loblolly pine. Forest Prod. J. 44(11/12): 14-20.

CORNEAU Y. 1994. Product alternatives for small diameter black spruce. Canadian Forest No. 31A. 38pp.

CORNELIUS J.P. ET MORGENSTERN E.K. 1986. An economic analysis of black spruce breeding in New Brunswick. Can. J. For. Res. 16(3):476-483.

COWDREY D.R. ET PRESTON R.D. 1966. Elasticity and microfibrillar angle in the wood of Sitka spruce. Proc. R. Soc. Lond. B 166: 245-271.

COWN D.J., HEBERT J. ET BALL R. 1999. Modelling Pinus radiata lumber characteristics. Part 1: Mechanical properties of small clears. New Zeal. J. For. Sci. 29(2): 203-213.

COWN D.J. ET MCCONCHIE D.L. 1981. Effects of thinning and fertilizer application on wood properties of Pinus radiata. New Zeal. J. For. Sci. 11(2):79-91.

CREGG B.M., DOUGHERTY P.M. ET HENNESSEY T.C. 1988. Growth and wood quality of young loblolly pine trees in relation to stand density and climatic factors. Can. J. For. Res. 18: 851-858.

DEGRON R. ET NEPVEU G. 1996. Predicting intra- and intertree variability of sessile oak (*Quercus petraea*) wood density through modelling earlywood and latewood width and density from cambial age, ring width and height within the tree. Ann. For. Sci. 53(5):1019-1030.

DENNE M.P. 1989. Definition of latewood according to Mork (1928). IAWA Bull. 10(1): 59-62.

DENNE M.P. ET HALE M.D. 1999. Cell wall and lumen percentages in relation to wood density of Nothofagus nervosa. IAWA J. 20(1):23-36.

DIAZ-VAZ-OLMEDO J.E., KNIGGE W. ET ECHOLS R. 1975. Comparisons between variations in wood density measured by X-ray and changes in wood anatomy within the annual ring. Fac. de Ingeniera For., Univ de Chile, Valdivia. Bosque 1(1):33-42.

DICKSON R.L. ET WALKER J.C.F. 1997. Selecting wood quality characteristics for pines. CTIA/IUFRO workshop August 18-22, 1997. Timber management toward wood quality and end-product value. IV.45-IV.50.

DONALDSON L.A. 1992. Within- and between-tree variation in microfibril angle in Pinus radiata. New Zeal. J. For. Sci. 22(1):77-86.

DOWNES G.M., NYAKUENGAMA J.G., EVANS R., NORTHWAY R., BLAKEMORE P., DICKSON R.L. ET LAUSBERG M. 2002. Relationship between wood density, microfibril angle and stiffness in thinned and fertilized Pinus radiata. IAWA J. 23(3):253-265.

DUTILLEUL P., HERMAN M. ET AVELLA-SHAW T. 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). Can. J. For. Res. 28: 56-68.

EVANS R. 1994. Rapid mesurement of the transverse dimensions of tracheids in radial wood sections from Pinus radiata. Holzforschung 48(2):168-172.

FILION J. ET MORIN H. 1996. Distribution spatiale de la régénération de l'épinette noire 8 ans après un feu en forêt boréale (Québec). Can. J. For. Res. 26: 601-610.

FERNANDEZ-GOLFIN J.I. ET DIEZ M.R. 1994. Influence of ring width on the density and other physical and mechanical properties of structural timber of various species. Investigacion-Agraria,-Sistemas-y-Recursos-Forestales. 3(2): 211-219.

GARTNER B.L., NORTH E.M., JOHNSON G.R. ET SINGLETON R. 2002. Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. Can. J. For. Res. 32 : 439-447

GONZALEZ J.S., LUM C. ET MUNRO D. 1997. Wood density as a predictor of MSR lumber yield in Lodgepole Pine. CTIA/IUFRO workshop August 18-22, 1997. Timber management toward wood quality and end-product value. IX.29.

GU H., ZINK-SHARP A. ET SELL J. 2001. Hypothesis on the role of cell wall structure in differential transverse shrinkage of wood. Holz. Roh. Werkst. 59(6):436-442.

GUILLEY E. ET NEPVEU G. 2003. Interprétation anatomique des composantes d'un modèle mixte de densité du bois chez le Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) :âge du cerne compté depuis la moelle, largeur de cerne, arbre, variabilité interannuelle et duraminisation. Ann. For. Sci. 60:331-346.

GUITARD D. ET GACHET C. 2004. Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l'anisotropie élastique du bois. Ann. For. Sci. 61:129-139.

HARRIS J.M. 1977. Shrinkage and density of radiata pine compression wood in relation to its anatomy and mode of formation. New Zeal. J. For. Sci. 7(1):91-106.

HARRIS J.M. ET MEYLAN B.A. 1965. The influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*. Holzforschung 19: 144-153.

HELINSKA-RACZKOWSKA L. ET FABISIAK E. 1997. Radial variation of earlywood vessel lumen diameter as an indicator of the juvenile growth period in Ash (*Fraxinus excelsior* L.). CTIA/IUFRO workshop August 18-22, 1997. Timber management toward wood quality and end-product value. VIII.25-VIII.29.

HERMAN M., DUTILLEUL P. ET AVELA-SHAW T. 1998. Intra-ring and inter-ring variations of tracheid length in fast-grown versus slow-grown norway spruce (*Picea abies*). IAWA J. 19(1):3-23.

HORVATH R. 2002. Impacts de la coupe sur la productivité des pessières noires à mousses situées dans le secteur nord-ouest de la réserve faunique Ashuapmushuan. Mémoire de maîtrise, Université Laval. 61 pp.

HUURI O., LAHDE E. ET HUURI L. 1987. Effect of stand density on the quality and yield of young Scots pine plantations. Folia Forestalia, Institutum Forestale Fenniae No 685, 48 pp.

IABLOKOFF A.K. 1955. Cell structure and mechanical properties, taking Spruce wood as an example. Rev. Bois Appl. 10. 11.

IVKOVICH M. ET KOSHY M.P. 1997. Wood density measurement: comparison of X-ray, photometric, and morphometric methods. CTIA/IUFRO workshop August 18-22, 1997. Timber management toward wood quality and end-product value. II.55-II.59.

JESSOME A.P. 1977. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au canada. Rapport technique de foresterie 21. Laboratoire des produits forestiers de l'Est, Ottawa, Ontario, Canada. 35pp.

JOHANSSON K. 1993. Influence of initial spacing and tree class on the basic density of Picea abies. Scandinavian-Journal of Forest Research 8(1):18-27.

JOZSA L.A. ET MIDDLETON G.R. 1994. A discussion of wood quality attributes and their practical implications. Forintek Canada Corp. No. SP-34. 42pp.

JOZSA L.A., RICHARDS J.E. ET JOHNSON S.G. 1987. Calibration of Forintek's direct reading densitometer. Report no 55-12-001, Forintek Canada Corp. Vancouver, BC, 16pp.

KASIR W.A. 1990. The influence of spacing on the anatomical properties and specific gravity of the wood of a populus clone. Third Euro-African Regional Wood Anatomy Symposium , Zurich, Switzerland, july 1990. IAWA Bull. 11(2):127-128.

KEITH C.T. 1985. Wood quality evaluation of rapidly grown intensively managed trees. Forintek Canada Corp. 37pp.

KELLER R. 1968. New characteristics for the study of the mechanical properties of wood: density components. Ann. For. Sci. 25(4):237-249.

KELLER R. ET THIERCELLIN F. 1975. Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois de Hêtre. Ann. For. Sci. 32(2):113-129.

KELLISON R.C., LEA R. ET FREDERICK D.J. 1983. Effect of silvicultural practices on wood quality of southern hardwoods. Tappi J. 66(1):67-69.

KOGA S., TSUTSUMI J. ET ODA K. 1995. Juvenile wood percentages of karamatsu (*Larix leptolepis*). Bulletin of the Kyushu University Forests. 72: 217-227.

KOGA S. ET ZHANG S.Y. 2002. Relationships between wood density and annual growth rate components in Balsam fir (*Abies balsamea*). Wood Fiber Sci. 34(1): 146-157.

KOPONEN S., TORATTI T. ET KANERVA P. 1991. Modelling elastic and shrinkage properties of wood based on cell structure. Wood Sci. Technol. 25:25-32.

KORAN Z. 1991. Wood structural features of black spruce. Acta-Facultatis-Ligniensis No 1: 65-100.

KORT-DE I., LOEFFEN V. ET BAAS P. 1991. Ring width, density and wood anatomy of Douglas fir with different crown vitality. IAWA Bull. 12(4):453-465.

KOSHY M.P. ET LESTER D.T. 1997. Wood shrinkage and tree growth in coastal Douglas-fir: implications of selection. Can. J. For. Res. 27(1):135-138.

KOUBAA A., HERNANDEZ R.E., BEAUDOIN M., FORTIN Y. ET POLIQUIN J. 1997. Nondestructive evaluation of physical, mechanical and anatomical properties of fast growing poplar hybrid clones. Proceedings of the CTIA-IUFRO International Wood Quality Workshop, Quebec City, Canada, August 18-22, 1997. II.47-II.53.

KOUBAA A., ZHANG S.Y., ISABEL N., BEAULIEU J. ET BOUSQUET J. 2000. Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce. Wood Fiber Sci. 32(1): 61-71.

KOUBAA A., ZHANG S.Y. ET MAKNI S. 2002. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. Ann. For. Sci. 59(5/6):511-518.

KOUBAA A., ISABEL N., ZHANG S.Y., BEAULIEU J., BERNIER-CARDOU M. ET BOUSQUET J. 2004. Transition from juvenile to mature wood in *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Submitted in July 2004 to Wood Fiber Sci.

KRETSCHMANN D.E. 1997. Effect of juvenile wood on shear parallel and compression perpendicular-to-grain strength for Loblolly Pine. Proceedings of the CTIA-IUFRO International Wood Quality Workshop, Quebec City, Canada, August 18-22, 1997. VI.23-VI.30.

KROMHOUT C.P. 1968. The influence of stand density on certain anatomical wood properties of *Pinus pinaster* in two C.C.T. stands. Bosb. Suid-Afr. 9: 45-66.

KUCERA B. 1994. A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in norway spruce. Wood Fiber Sci. 26(1): 152-167

LAW K.N. ET VALADE J.L. 1997. Effect of Wood quality on thermomechanical pulping: a case study on Black Spruce and Jack Pine. CTIA/IUFRO international wood quality workshop, Quebec city, Canada. Timber management toward wood quality and end-product value. Chapter VII p3-7.

LEI H., GARTNER B.L. ET MILOTA M.R. 1997. Effect of growth rate on the anatomy, specific gravity, and bending properties of wood from 7-year-old red alder (*Alnus rubra*). Can. J. For. Res. 27:80-85.

LEMIEUX H., BEAUDOIN M. ET GRONDIN F. 2000. A model for the sawing and grading of lumber according to knots. Wood Fiber Sci. 32(2):179-188.

LINDSTROM H., HARRIS P. ET NAKADA R. 2002. Methods for measuring stiffness of young trees. Holz-als-Roh-und-Werkstoff. 60(3):165-174.

LU W., ZHOU Y., GUO L. ET FUSHITANI M. 1997. Effect of growth rate on tracheid characteristics of slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.). Timber management toward wood quality and end-product value. Proceedings of the CTIA-IUFRO International Wood Quality Workshop, Quebec City, Canada, August 18-22, 1997. V.53-V.59.

MAKINEN H., SARANPAA P. ET LINDER S. 2002. Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Holzforschung. 56(5):449-460.

MAZET J.F. ET NEPVEU G. 1991. Relations between wood shrinkage properties and wood density for Scots pine, silver fir and Norway spruce. Ann. For. Sci. 48(1):87-100.

MCCLAIN K.M., MORRIS D.M., HILLS S.C. ET BUSS L.J. 1994. The effect of initial spacing on growth and crown development of planted northern conifers. For. Chron. 70:174-182.

MCKENNEY D., FOX G. ET VANVUUREN W. 1992. An economic comparison of black spruce and jack pine tree improvement. Forest Ecol. Manag. 50(1-2):85-101.

MEGRAW R.A., LEAF G. ET BREMER D. 1998. Longitudinal shrinkage and microfibril angle in loblolly pine. In Microfibril Angle in Wood, B. A. Butterfield [ed], Univ. of Canterbury Press, Christchurch, New Zealand, pp. 27-61.

MIDDLETON G.R., JOZSA L.A., PALKA L.C., MUNRO B.D. ET SEN P. 1995. Lodgepole Pine product yield related to differences in stand density. Forintek Canada Corp. Special publication, SP 35. 66pp.

MIDDLETON G.R., JOZSA L.A., MUNRO B.D. ET SEN P. 1996. Regional comparisons of wood density and branch size in low stand density lodgepole pine. Special publication. Forintek Canada Corp. SP 36. 27pp.

MONSERUD R.A. ET EK A.R. 1977. Prediction of understory tree height growth in Northern hardwood stands. Forest Sci. 23: 391-400.

MORK E. 1928. Die qualitat des Fichtenholzes unter besonderer Rucksichnahme auf schliefund papierholz. Papier Fabrikant 26: 741-747.

MORSCHAUSER C.R. ET PRESTON S.B. 1954. The effect of ray tissue on transverse shrinkage of Red Oak (*Quercus borealis* Michx.f.). Mich. Wood Technol. No.1. 2pp.

MULLINS E.J. ET MCKNIGHT T.S. 1981. Canadian woods: their properties and uses. University of Toronto Press. Toronto; Canada (Ed. 3). 389 pp.

NEWTON P.F. 1997. Algorithmic versions of black spruce stand density management diagrams. For. Chron. 73(2):257-265.

NICHOLLS J.W.P. 1971. The effect of environmental factors on wood characteristics 2- the effect of thinning and fertilizer treatment on the wood of pinus pinaster. Silvae Genet. 20(3):67-73.

NICHOLLS J.W.P. 1984. Tracheid cell dimensions and density relationships for normal and abnormal wood of *Pinus radiata* D. Don. Aust. Forest Res. 14(2):85-98.

PANSHIN A.J., ET DE ZEEUW C. 1980. Textbook of wood technology. McGraw-Hill Book Co., New York. 772 pp.

PATTERSON D.W., WIANT H.V. JR ET WOOD G.B. 1993. Log volume estimations. The centroid method and standard formulas. J. For. 91(8):39-41.

PARKER M.L., SMITH J.H.G. ET JOHNSON S. 1978. Annual-ring width and density patterns in red alder. Wood Fiber Sci.10(2): 120-130.

PERKINS R.W. 1973. A theory of mechanical response of fiber networks. Wood Fiber Sci. 5(1):26-33.

PIZZI A. ET CAMERON F.A. 1986. Flavonoids tannins-structural wood components for drought resistance mechanism of plants. Wood Sci. Technol. 20(2):119-124.

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

RAULIER F., UNG C.-H. ET 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.

ROBICHAUD E. ET METHVEN I.R. 1993. The effect of site quality on the timing of stand breakup, tree longevity, and the maximum attainable height of black spruce. Can. J. For. Res. 23:1514-1519.

ROSS R.J., WANG X., MATTSON J.A., ERICKSON J.R., FORSMAN J.W., GESKE E.A. ET WHER M.A. 2000. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs. 12th international symposium on nondestructive testing of wood, 13-15 september 2000, University of western Hungary, Sopron. pp155-163.

RUDIE A.W., MORRA J., STLAURENT J.M. ET HICKEY K.L. 1994. The influence of wood and fiber properties on mechanical pulping. Tappi J. 77(6):86-90.

SAHLBERG U., SALMEN L. ET OSCARSSON A. 1997. The fibrillar orientation in the S2-layer of wood fibres as determined by x-ray diffraction analysis. Wood Sci. Technol. 31: 77-86.

SARANPAA P. ET KARKAINEN M. 1990. Density, shrinkage, and fibre length of juvenile wood of Norway spruce. IAWA Bull. 11(3):302.

SAUTER U.H., MUTZ R. ET MUNRO B.D. 1999. Determining juvenile-mature wood transition in scots pine using latewood density. Wood Fiber Sci. 31(4): 416-425.

SCHIMLECK L.R. ET EVANS R. 2002. Estimation of microfibril angle of increment cores by near infrared spectroscopy. IAWA J. 23(3): 225-234.

SCHNIEWIND A.P. 1962. Research on the mechanical properties of wood as it relates to structural utilisation-prospects and new directions. J. I. Wood Sci. 9:12-26.

SCHONAU A.P.G. ET COETZEE J. 1989. Initial spacing, stand density and thinning in eucalypt plantations. Forest Ecol. Manag. 29(4):245-266.

SINGER J.D. 1998. Using SAS PROC MIXED to fit multilevel models, hierarchical models, and individual growth models. Journal of Educational and Behavioral Statistics. 24 (4):323-355.

TSOUMIS G. ET PANAGIOTIDIS N. 1980. Effect of growth conditions on wood quality characteristics of black pine (*Pinus nigra* Arn.). Wood Sci. Technol. 14:301-310.

UNG C.-H., RAULIER F., OUELLET D. ET DHOTE J.-F. 1997. L'indice de compétition interindividuelle de Schütz. Can. J. For. Res. 27:521-526.

VIERECK L.A. ET JOHNSTON W.F. 1990. *Picea mariana* (Mill.) B. S. P., Black spruce. Silvics of North America, Volume 1, CONIFERS, p. 227-237. Agriculture Handbook 654, Forest Service, United States Department of Agriculture, Washington D.C., 675pp.

WALKER J.C.F. ET BUTTERFIELD B.G. 1996. The importance of microfibril angle to the processing industries. New Zealand Forestry 40(4):34-40.

WALKER J.C.F., BUTTERFIELD B.G., LANGRISH T.A.G., HARRIS J.M. ET UPRICHARD J.M.. 1993. Primary wood processing :principles and practice. Chapman and Hall, Ltd, London 595pp.

WALKER J.C.F. ET WOOLLONS R.C. 1998. Cell wall organisation and the properties of xylem - a speculative review. Proceedings of the IAWA/IUFRO international workshop on the significance of microfibril angle, Christchurch, NZ: University of Canterbury. pp13-26.

WANG T., AITKEN S.N., ROZENBERG P. ET MILLIE F. 2000. Selection for improved growth and wood density in lodgepole pine: effects on radial patterns of wood variation. Wood Fiber Sci. 32(4):391-403.

WARD D. ET GARDINER J.J. 1976. The influence of spacing on tracheid length and density in Sitka Spruce. Irish-Forestry 33(1):39-56.

WARDROP A.B. 1951. Cell wall organization and the properties of the xylem. I.Cell wall organization and the variation of breaking load in tension of the xylem in conifer stems. Aust. J. Sci. Res. 4B(4):391-414.

WEETMAN G.F. 1971. Effects of thinning and fertilization on the nutrient uptake, growth and wood quality of upland black spruce. Woodl. Pap. Pulp Pap. Res. Inst. Can. No. 28, pp 18.

WENT F.W. 1942. Some physiological factors in the aging of a tree. Proc. 9th West. Shade Tree Conf. 330-334. California Institute of Technology, Pasadena, Calif.

WIMMER R. 1995. Intra-annual cellular characteristics and their implications for modeling softwood density. Wood Fiber Sci. 27(4):413-420.

XU Y.M., WEI B.S., YANG Z.D., ZHOU Z.X., ZOU M.H. ET ZHOU L. 2002. Effects of initial densities on wood quality of exotic slash pine plantation. Journal-of-Northeast-Forestry-University. 30(1):6-9.

YANG K.C. 1994. Impact of spacing on width and basal area of juvenile and mature wood in *Picea mariana* and *Picea glauca*. Wood Fiber Sci. 26(4):479-488.

YANG K.C., BENSON C.A. ET WONG J.K. 1986. Distribution of juvenile wood in two stems of *Larix laricina*. Can. J. For. Res. 16:1041-1049.

YANG K.C. ET HAZENBERG G. 1994. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana*. Can. J. For. Res. 24(5):996-1007.

YANG J.L. ET EVANS R. 2003. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. Holz-als-Roh-und-Werkstoff. 61(6):449-452.

YANG J.J. ET LU H.J. 1997. Wood density, mechanical properties and their conversion. China Wood Industry 11(1):35-38.

ZAHNER R., SAUCIER J.R. ET MYERS R.K. 1989. Tree-ring model interprets growth decline in natural stands of loblolly pine in the southeastern United States. Can. J. For. Res. 19(5):612-621.

ZHANG S.Y. 1994. Mechanical properties in relation to specific gravity in 342 chinese woods. Wood Fiber Sci. 26(4): 512-526.

ZHANG S.Y. 1997a. Wood specific gravity-mechanical property relationship at species level. Wood Fiber Sci. 31:181-191.

ZHANG S.Y. 1997b. Wood quality: its definition, impact, and implications for value-added timber management and end uses. CITA/IUFRO, Quebec city. Timber management toward wood quality and end-product value. August 18-22, 1997. pp I.17-I.39.

ZHANG S.Y. 1998. Effect of age on the variation, correlations and inheritance of selected wood characteristics in black spruce (*Picea mariana*). Wood Sci. Technol. 32: 197-204.

ZHANG S.Y. ET 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. 47pp.

ZHANG S.Y. ET MORGENSTERN E.K. 1995. Genetic variation and inheritance of wood density in black spruce (*Picea mariana*) and its relationship with growth: implication for tree breeding. Wood Sci. Technol. 30(1): 63-75.

ZHANG S.Y. ET ZHONG Y. 1992. Structure-property relationship of wood in East-Liaoning oak. Wood Sci. Technol. 26(2):139-149.

ZHANG S.Y., FUJIWARA S. ET BAAS P. 1992. Hardwood density in relation to fibre morphology and tissue proportions. IAWA Bull. 13(3):266-267.

ZHANG S.Y., NEPVEU G. ET MOTHE F. 1994. Modeling intratree wood shrinkage in European oak by measuring wood density. Forest Prod. J. 44(10):42-46.

ZHANG S.Y., SIMPSON D. ET MORGENSTERN E.K. 1996. Variation in the relationship of wood density with growth in 40 black spruce (*Picea mariana*) families grown in New Brunswick. Wood Fiber Sci. 28(1):91-99.

ZOBEL B.J. ET VAN BUIJTENEN J.P. 1989. Wood variation, its causes and control. Springer-Verlag, Berlin. 363pp.

ZOBEL B., WEBB C. ET HENSON F. 1959. Core or juvenile wood of Loblolly and Slash Pine trees. Tappi 42(5): 345-356.

Appendice 1

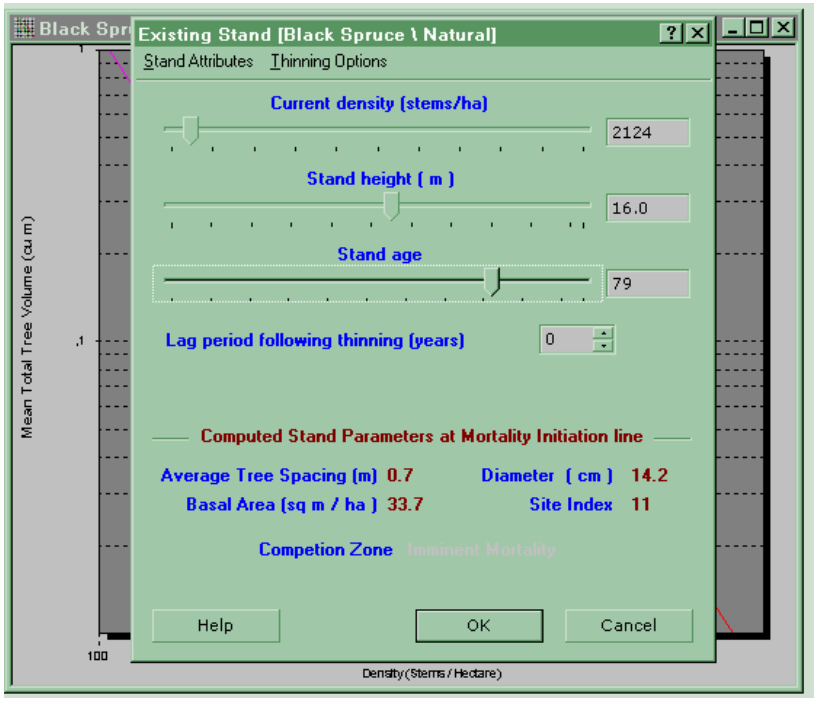


Figure 6-5. Utilisation du logiciel SDMD dans le cas de notre peuplement.

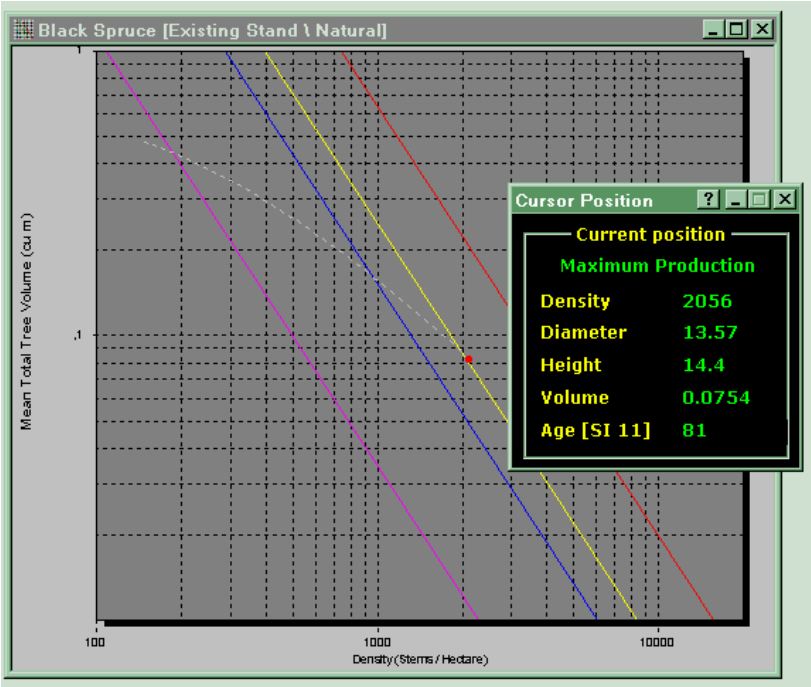


Figure 6-6. SDMD montrant la limite entre production maximale et mortalité du peuplement étudié.

Appendice 2

Tableau 6-3. Exemple de description des arbres voisins de l'arbre 1.

Arbre voisin	Distance (m)	Azimut (°)	Diamètre à hauteur de poitrine (cm)	Essence	État
voisin 1	3,63	220	12		
voisin 2	4,04	226	11	Bouleau	Mort
voisin 3	4	230	9,5	Bouleau	Mort
voisin 4	2,66	238	10	Bouleau	Mort
voisin 5	2,06	240	15		Mort
voisin 6	2,92	264	11		Mort
voisin 7	2,7	300	10	Bouleau	Mort
voisin 8	2,66	310	10	Bouleau	Mort
voisin 9	3,99	318	23	Pin gris	
voisin 10	2,94	330	12		
voisin 11	2,74	348	18	Pin gris	
voisin 12	3,15	360	14		
voisin 13	2,83	360	10,5		
voisin 14	1,42	40	14,5		
voisin 15	1,49	64	8		
voisin 16	1,33	108	10,5	Pin gris	Mort
voisin 17	3,55	126	19		
voisin 18	3,95	126	15		

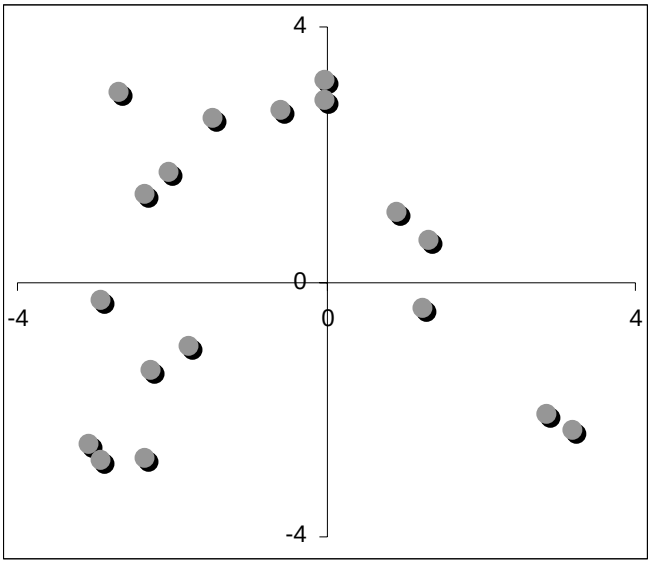


Figure 6-7. Schéma de répartition des arbres voisins dans un rayon de 4 m autour de l'arbre 1.

Tableau 6-4. Identification des 36 arbres.

Identification de l'arbre	Groupe de densité de peuplement	Datation de la moelle à 2,4-m (19--)	Hauteur de l'arbre (m)	Diamètre à hauteur de poitrine (cm)	Hauteur de la première branche (m)	largeur du houppier (m)
1	1	28	16,02	20	8,03	2,25
4	2	30	14,78	15,4	9,92	2,66
5	3	27	15,19	15,6	9,33	1,45
6	3	24	15,62	18,5	9,52	2,13
7	2	28	13,78	15,6	8,02	1,64
8	2	30	16,56	18,4	8,89	2,81
9*	3	33	13,95	14	9,22	1,47
11	2	30	16,58	19,4	7,98	3,79
12	2	30	13,34	15,2	8,84	3,77
14*	1	29	14,6	17,2	7,76	1,99
15	1	29	15,82	21,1	9,83	3,78
16	2	30	15,98	17,4	8,94	2,05
17*	2	26	19,49	23,3	10,7	4,34
22	1	30	15,73	15,8	10,54	1,58
23	1	31	14,89	17	8,35	1,6
25	2	34	15,17	16	10,41	1,15
27	1	32	16,76	17,1	9,22	2
28	1	32	16,92	18	9,44	1,73
29	1	30	17,86	18,5	9,54	1,77
30	1	25	19,02	21,5	10,14	3,36
31	1	28	16,31	19,6	10,4	3,25
32	2	27	17,85	20,2	10,1	3,04
35*	1	28	17,82	20,8	9,79	1,7
36	1	32	15,71	17,8	8,69	3,05
37	2	35	14,67	15,2	8,28	2,15
38	2	30	15,52	17,1	8,8	2,94
39*	2	27	14,27	15	9,8	1,43
40	3	27	15,85	18,8	9,14	2,54
42	3	25	15,74	15,8	9,4	3,31
43*	3	27	16,53	17,2	11,05	2,57
44	3	30	15,11	16,4	8,44	1,5
45	3	24	16,87	16,9	10,53	2,16
46	3	28	15,56	15,2	9,4	1,42
47	3	32	14,53	15,4	8,52	1,53
48	3	31	14,8	15,6	8,35	1,56
53	3	25	15,35	19,1	9,07	4,05
Moyenne		29,00	15,85	17,53	9,29	2,38
Ecart type		2,74	1,38	2,18	0,86	0,89

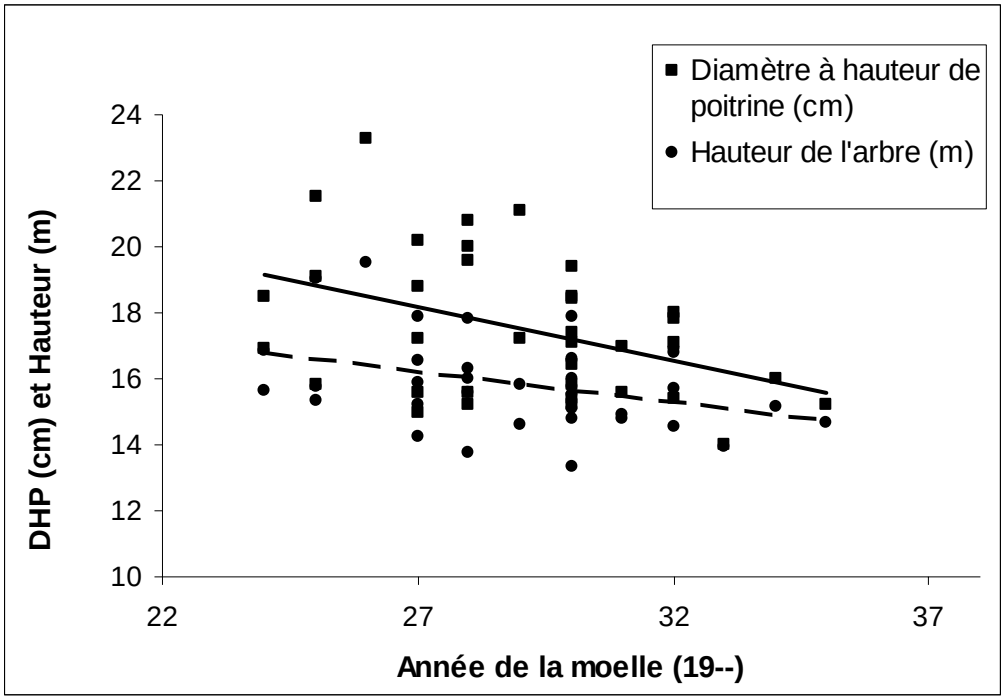


Figure 6-8. Effet de l'âge de la moelle calculé à 2,4 m sur la hauteur de l'arbre et le diamètre à hauteur de poitrine.

Appendice 3

Détail de la macro excel en visual basic pour la détermination dans chaque cerne des différents paramètres (largeur de cerne, densité du cerne, etc.) à partir du profil brut de densité.

```
Sub Macro2()
'
' Macro2 Macro
' Macro enregistrée le 01-06-01 par jerome alteyrac
'

'
' initialisation

Sheets("decomp").Select
Cells.Select
Selection.ClearContents
Range("A5").Select
Sheets("base").Select
Selection.Select
i = 0
boisinit = 1
h = 0
dgrand = 0
t = 0
j = 0
a = 0
verifbi = 0
anciencerne = 1


1   e = 0
    i = 0
    j = 0

    dgrand = 0
    deblarg = ActiveCell.Offset(0, -2).Value
    finlarg = 0
    dpetit = ActiveCell.Offset(0, -1).Value
    dmoy = 0
    dgrandbi = 0
```

```
   deblargbi = ActiveCell.Offset(0, -2).Value
   finlargbi = 0
   dpetitbi = ActiveCell.Offset(0, -1).Value
   dmoybi = 0

2  dgrandbf = 0
   deblargbf = ActiveCell.Offset(0, -2).Value
   finlargbf = 0
   dpetitbf = ActiveCell.Offset(0, -1).Value
   dmoybf = 0



3  ActiveCell.Offset(0, -2).Range("A1:B1").Select
   Selection.Copy
   e = ActiveCell.Offset(0, 2).Value
   ee = ActiveCell.Offset(0, 3).Value
   If e > 0 And ActiveCell.Offset(0, 1).Value > 0.4 Then anciencerne = 1

   amplitude = dgrand - dpetit

   Sheets("decomp").Select
   ActiveSheet.Paste


   If dgrand < ActiveCell.Offset(0, 1).Value Then dgrand = ActiveCell.Offset(0, 1).Value
   If finlarg < ActiveCell.Value Then finlarg = ActiveCell.Value
   If dpetit > ActiveCell.Offset(0, 1).Value Then dpetit = ActiveCell.Offset(0, 1).Value

   If dgrandbi < ActiveCell.Offset(0, 1).Value Then dgrandbi = ActiveCell.Offset(0,
1).Value
   If finlargbi < ActiveCell.Value Then finlargbi = ActiveCell.Value
   If dpetitbi > ActiveCell.Offset(0, 1).Value Then dpetitbi = ActiveCell.Offset(0, 1).Value

   If dgrandbf < ActiveCell.Offset(0, 1).Value Then dgrandbf = ActiveCell.Offset(0,
1).Value
   If finlargbf < ActiveCell.Value Then finlargbf = ActiveCell.Value
   If dpetitbf > ActiveCell.Offset(0, 1).Value Then dpetitbf = ActiveCell.Offset(0, 1).Value



   dmoy = dmoy + ActiveCell.Offset(0, 1).Value
   dmoybi = dmoybi + ActiveCell.Offset(0, 1).Value
   dmoybf = dmoybf + ActiveCell.Offset(0, 1).Value
```

```
'on descend d une case pour ecrire la ligne suivante
   ActiveCell.Offset(1, 0).Select
   j = j + 1
   i = i + 1
   t = t + 1

   Sheets("base").Select
   ActiveCell.Offset(1, 2).Range("A1").Select
   If ActiveCell.Value = "" Then GoTo 15

'passage bi bf ?

   If (e > 0 And ActiveCell.Offset(0, -1).Value > 0.4 And boisinit = 1 And
ActiveCell.Offset(0, 1).Value * ee < 0) Then GoTo 6


'changement de cerne ?
4     If e < 0 And (dgrand - ActiveCell.Offset(0, -1).Value > (amplitude / 3)) And
anciencerne = 1 And ActiveCell.Value < -50 And ActiveCell.Offset(0, 1).Value * ee < 0
Then GoTo 8
   GoTo 3

'resumé BI BF
6   Sheets("decomp").Select
   largbi = finlargbi - deblargbi
   ActiveCell.Offset(-1, 2).Value = ("BI BF")
   ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 5, h + 4).Value = largbi
   ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 7, h + 4).Value = dgrandbi
   ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 9, h + 4).Value = dpetitbi
   ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 11, h + 4).Value = dmoybi / j
   verifbi = ActiveCell.Offset(-1, 1).Value
   ActiveCell.Offset(0, 2).Value = verifbi

   boisinit = 0
   Sheets("base").Select
   j = 0
   GoTo 2

'resumé des calculs sur un cerne
8   Sheets("decomp").Select
   h = h + 1
   boisinit = 1
   anciencerne = 0

   ActiveCell.Offset(-1, 2).Range("A1").Value = ("cerne" & h)
```

```
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2, h + 3).Value = ("cerne" & h)
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 1, h + 3).Value = finlarg - deblarg
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 2, h + 3).Value = dgrand
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 3, h + 3).Value = dpetit
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 4, h + 3).Value = dmoy / i

    largbf = finlargbf - deblargbf
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 8, h + 3).Value = largbf
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 10, h + 3).Value = dgrandbf
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 12, h + 3).Value = dpetitbf
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 14, h + 3).Value = dmoybf / j
    ActiveCell.Offset(-t - h * 2 + 15, h + 3).Value = verifbi
    ActiveCell.Offset(2, 0).Select
    Sheets("base").Select
    GoTo 1

15
    Sheets("bilan").Select
    Range("e4:cp17").Select
    Selection.Copy
End Sub
```