

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

VARIATIONS INTRA-ARBRE DE LA CROISSANCE RADIALE, DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DE
LA MORPHOLOGIE DES TRACHÉIDES DU BOIS D'ÉPINETTE NOIRE [*PICEA MARIANA* (MILL.)
B.S.P.] AVANT ET APRÈS TRAITEMENT DE COUPES PARTIELLES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

EXTENSIONNÉE DE

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR

DIEGO VALÉRIO BRAIDO DOS SANTOS

JUIN 2014



BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

REMERCIEMENTS

La présente étude fut réalisée grâce à la participation et le soutien de plusieurs collaborateurs que je tiens à remercier. J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Ahmed Koubaa, pour la confiance qu'il m'a accordée en me donnant ce projet de maîtrise, son soutien, sa patience ainsi que ses encouragements et sa précieuse aide lorsque j'en avais besoin. Je tiens également à remercier Yves-Bergeron pour son co-encadrement et pour son soutien et son aide apportée. J'exprime mes remerciements à Alain Leduc, Hervé Bescond, Cyriac Mvolo-Serge et Dave Therrien pour la précieuse aide apportée aux travaux terrain de cette étude. Je remercie aussi Gilles Villeneuve et Raymond pour l'aide apportée lors du découpage de mes échantillons. J'exprime mes remerciements à Besma Bouslimi pour sa précieuse assistance au laboratoire pour les mesures au densitomètre et à Cyriac Serge Mvolo pour la préparation des échantillons pour l'analyse de la qualité de la fibre. Mes remerciements vont aussi au professeur Marc Mazerolle pour sa patience et son aide pour les analyses statistiques des résultats. Un grand merci à toute l'équipe de Chaire de Recherche du Canada sur la Valorisation, la Caractérisation et la Transformation du bois (CRC-VACAT) et à mes collègues de maîtrise spécialement à Mohamed Henneb pour ses précieux conseils et son amitié. Le dernier, mais non le moindre, j'exprime mes remerciements à la contribution financière apportée par le FQRNT-Fonds forestiers et le CRSNG et à la bourse en milieu pratique (BMP) du FRQNT et du CRSNG et de mon partenaire industriel Tembec. Un grand merci à tous ceux et celles qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire de maîtrise. Enfin, merci à toute ma famille et tous mes amis qui m'ont encouragé à accomplir cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
RÉSUMÉ	ix
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	1
CHAPITRE II	
REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
2.1 La forêt boréale québécoise.....	3
2.2 Épinette noire (<i>Picea mariana</i> (Mill.) B. S.P).....	4
2.2.1 Taxonomie, écologie forestière et caractères botaniques	4
2.2.2 Caractères botaniques.....	5
2.2.3 Amélioration des arbres.....	7
2.2.4 Caractéristiques anatomiques du bois	7
2.2.4.1 Caractéristiques macroscopiques	7
2.2.4.2 Caractéristiques microscopiques.....	7
2.2.5 Propriétés chimiques	9
2.2.6 Propriétés physiques.....	9
2.2.6.1 Masse volumique	9
2.2.6.2 Teneur en humidité à l'état vert	10
2.2.6.3 Stabilité dimensionnelle et retrait	10
2.2.6.4 Durabilité et perméabilité.....	10
2.2.7 Propriétés mécaniques	11
2.2.8 Usinage et usages	11
2.3 Les systèmes sylvicoles.....	12
2.3.1 Densité des peuplements, espacement initial et élagage	12
2.3.2 Coupe totale.....	13
2.3.3 Coupes partielles	13
2.3.3.1 Coupe avec protection de petites tiges marchandes	14
2.3.3.2 Éclaircie	14

2.3.3.1.1	Éclaircie pré commerciale.....	14
2.3.3.1.2	Éclaircie commerciale.....	15
2.3.3.3	Coupes de jardinage.....	15
2.3.3.4	Coupes progressives.....	16
2.3.3.3.1	Méthode des coupes progressives uniformes (Shelterwood method).....	16
2.3.3.3.2	Méthode des coupes progressives par groupes	17
2.3.3.3.3	Méthode des coupes progressives par bandes ou en lisières	17
2.3.3.3.4	Méthode des coupes progressives d'abri.....	18
2.3.3.3.5	Méthode des coupes progressives irrégulières	18
2.3.4	Importance des coupes partielles en aménagement écosystémique	19
2.4	Qualité du bois	20
2.4.1	Définition.....	20
2.4.2	Paramètres intrinsèques de la qualité du bois	22
2.4.2.1	Masse volumique	22
2.4.2.2	Périmètre et masse linéique des cellules	23
2.4.2.3	Angle des microfibrilles.....	23
2.4.2.4	Propriétés des trachéides	24
2.4.3	Paramètres extrinsèques de la qualité du bois	25
2.4.4	Relations entre la qualité du bois et la croissance de l'arbre.....	27
2.5	Impacts des interventions sylvicoles sur la qualité et les propriétés du bois.....	27
2.5.1	Croissance radiale.....	27
2.5.2	Masse volumique du bois	28
2.5.3	Propriétés mécaniques	29
2.5.4	Propriétés des trachéides	30
2.5.5	Attributs de la qualité du bois de l'épinette noire.....	31
2.5.6	Objectifs spécifiques et hypothèses d'étude.....	35
CHAPITRE III		
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....		36
3.1	Aire d'étude.....	36
3.2	Dispositif expérimental	36
3.3	Échantillonnage.....	38
3.4	Analyses de laboratoire.....	39

3.4.1 Croissance annuelle et masse volumique	39
3.4.1.1 Préparation des échantillons pour l'analyse de la croissance annuelle et la masse volumique	39
3.4.1.2 Densitomètre à rayon X	40
3.4.1.3 Analyse de la croissance et de la densité du bois	41
3.4.2 Propriétés morphologiques de la fibre.....	41
3.4.2.1 Préparation des échantillons pour l'analyse de la qualité de la fibre	41
3.4.2.2 Analyseur de la qualité de la fibre (FQA).....	42
3.4.2.3 Analyse de la morphologie de la fibre	43
3.5 Analyse des variations intra-arbre.....	43
3.5.1 Effets des coupes partielles sur les propriétés étudiées	43
CHAPITRE IV	
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	46
4.1 Statistiques descriptives	46
4.2 Variations intra-arbres.....	48
4.2.1 Variation radiale et longitudinale de la croissance annuelle	48
4.2.2 Variation radiale et longitudinale de la masse volumique.....	51
4.2.3 Variation radiale et longitudinale des dimensions des trachéides	53
4.2.4 Conclusions sur les variations radiale et longitudinale	56
4.3 Effets des coupes partielles sur les propriétés du bois étudiées	56
4.3.1 Impacts des coupes partielles sur la croissance annuelle	58
4.3.2 Impacts des coupes partielles sur la masse volumique.....	62
4.3.3 Impacts des coupes partielles sur la morphologie des trachéides.....	66
4.4 Implications pratiques et industrielles.....	71
CHAPITRE V	
CONCLUSIONS.....	74
BIBLIOGRAPHIE.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Répartition de l'épinette noire en Amérique du Nord (Source : Zhang et Koubaa,2009)	4
2.2 Illustration de l'arbre (A), de l'écorce (B), des aiguilles (C) et des cônes (D) de l'épinette noire (Source : Daniel Tigner, 2011)	6
2.3 Coupes transversales du bois d'épinette noire (Source :A. Alteyrac, 2005 et B. Marguerie, 2000).....	8
2.4 Coupes radiales du bois d'épinette noire (Source : Marguerie, 2000).....	8
2.5 Coupes tangentielles du bois d'épinette noire (Source : Marguerie, 2000).....	8
3.1 Carte de localisation des sites d'étude du réseau expérimental de coupes partielles (Fenton et al., 2010).....	37
3.2 Schéma de l'échantillonnage des galettes de bois sur les arbres et de la production des échantillons pour les analyses	39
3.3 Exemple d'un échantillon utilisé pour les analyses densitométriques dans le densitomètre QTRS-01X Tree Scanner (QMS).....	40
3.4 Densitomètre QTRS-01X Tree Analyser de Quintek Measurement System, Inc. (QMS) (Source : Quintek Measurement System, Inc.)	41
3.5 Analyseur de fibres Kajaani FS300 de Metso®	42
4.1 Variation radiale des largeurs du cerne, du bois initial et du final de l'épinette noire en fonction de l'âge cambial au DHP (1.3 m) (les barres représentent les écarts-type).....	50
4.2 Variation longitudinale des composantes de la largeur du cerne : A. Largeurs moyennes du cerne et de ses composantes (les barres représentent les écarts-type); B. Largeur moyenne du cerne selon l'âge cambial; C. Largeur moyenne du bois initial selon l'âge cambial; D. Largeur moyenne du bois final selon l'âge cambial.....	50
4.3 Variation radiale des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final d'épinette noire en fonction de l'âge cambial au DHP (1.3 m)	52
4.4 Variation longitudinale de la masse volumique : A. Masses volumiques moyennes du cerne et de ses composantes; B. Masse volumique moyenne du cerne selon l'âge cambial; C. Masse volumique moyenne du bois initial selon l'âge cambial; D. Masse volumique moyenne du bois final selon l'âge cambial.....	53
4.5 Variation radiale de la longueur et de la largeur des trachéides du bois d'épinette noire en fonction de l'âge cambial au DHP (1.3 m).....	55

4.6	Variation longitudinale de la morphologie des trachéides : A. Longueur moyenne des trachéides; B. Largeur moyenne des trachéides; C. Longueur moyenne des trachéides selon l'âge cambial; D. Largeur moyenne des trachéides selon l'âge cambial.....	55
4.7	Largeurs du cerne et de ses composantes : A. En fonction du site; B. En fonction de l'âge de l'arbre; C. En fonction de la dimension de l'arbre; D. En fonction du traitement (CP = coupes partielles).....	60
4.8	Impacts du traitement sur la largeur du cerne. A. Selon l'âge de l'arbre; B. Selon la hauteur dans l'arbre.....	61
4.9	Impacts du traitement sur la largeur du cerne selon le temps (- 2 et -1 représentent les années avant l'année d'intervention et 1, 2, 3, 4 et 5 les années après).....	61
4.10	Masses volumiques du cerne et de ses composantes : A. En fonction du site; B. En fonction de l'âge de l'arbre; C. En fonction de la dimension de l'arbre; D. En fonction du traitement (CP = coupes partielles).....	64
4.11	Impacts du traitement sur la masse volumique du cerne. A. Selon l'âge de l'arbre; B. Selon la hauteur dans l'arbre.....	65
4.12	Impacts du traitement sur la masse volumique du cerne selon le temps (- 2 et -1 représentent les années avant l'année d'intervention et 1, 2, 3, 4 et 5 les années après).....	65
4.13	Longueur des trachéides : A. En fonction du site; B. En fonction de l'âge de l'arbre; C. En fonction du DHP de l'arbre; D. En fonction du traitement en tant que facteur principal	68
4.14	Largeur des trachéides : A. En fonction du site; B. En fonction de l'âge de l'arbre; C. En fonction du DHP de l'arbre; D. En fonction du traitement en tant que facteur principal	69
4.15	Impacts du traitement sur la longueur des trachéides. A. Selon l'âge de l'arbre; B. Selon la hauteur dans l'arbre.....	70
4.16	Impacts du traitement sur la largeur des trachéides. A. Selon l'âge de l'arbre.....	70
4.17	Impacts du traitement sur la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides selon le temps (- 2 et -1 sont les années avant l'année d'intervention et 1, 2, 3, 4 et 5 sont les années après).....	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Synthèse des effets des traitements sylvicoles sur la régénération et les attributs de la qualité du bois	33
2.2 Synthèse des effets des traitements sylvicoles sur les attributs de la qualité du bois d'épinette noire examinés par cette étude	34
3.1 Caractéristiques des sites de l'étude	38
4.1 Valeurs moyennes et coefficients de variation (CV) (entre parenthèses) de la longueur et de la largeur des trachéides d'épinette noire pour toutes les traitements, les hauteurs et les cerne des trois peuplements de l'Abitibi-Témiscamingue	46
4.2 Valeurs moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses) des largeurs et des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final d'épinette noire pour toutes les traitements, les hauteurs et les cerne des trois peuplements de l'Abitibi-Témiscamingue	47
4.3 Résultats de l'analyse de variance des effets fixes sur la largeur et la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final et sur la longueur et la largeur des trachéides	57

RÉSUMÉ

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill). B.S.P.) est une importante essence forestière largement répandue en forêt canadienne. Les coupes partielles sont une alternative à la coupe totale en étant appliquées sur des peuplements mûrs, voire surannés afin d'assurer à la fois l'approvisionnement en fibres et le maintien de la biodiversité. Néanmoins, peu d'attention a été accordée vers les impacts de ce traitement sylvicole sur la qualité du bois issus des peuplements naturels.

Les objectifs de la présente étude furent dans un premier temps d'examiner la variabilité intra-cernes de la largeur et la masse volumique du cerne et de ses composantes, et des dimensions des trachéides avec l'âge cambial et le niveau dans l'arbre. Dans un second temps, l'impact des 3 intensités de récolte des coupes partielles (0-50 %, 50-75 % et 75-100 % de la surface terrière récoltée) sur ces propriétés fut étudié. Les mesures ont été faites à différentes hauteurs dans l'arbre sur une période de 5 années après l'intervention sur des échantillons provenant de 4 classes de diamètre à la hauteur de la poitrine (DHP).

Nous avons utilisé un dispositif expérimental dans le réseau de coupes partielles à la ceinture d'argile d'Abitibi-Témiscamingue. Trois sites expérimentaux furent choisis aléatoirement où 64 arbres d'épinette noire furent échantillonnés. Des disques de 10 cm ont été prélevés à 0,5 m, 1,3 m, 4 m, 8 m et 12 m. La largeur et la masse volumique des cernes et de ses composantes furent mesurés par le densitomètre à rayon X et la longueur et la largeur des trachéides à l'aide d'un analyseur de la qualité des fibres.

Les résultats ont permis d'établir les patrons de variations radiale et longitudinale de la largeur des cernes, de la masse volumique du bois, et de la longueur et la largeur des trachéides. Ils révèlent que les variations radiales de ces propriétés sont plus importantes que les variations longitudinales. De plus, les variations radiales ont été plus importantes dans la phase juvénile du bois.

Les résultats ont aussi montré que le site, l'âge de l'arbre, la hauteur dans l'arbre, la classe de DHP et le temps après coupes partielles ont un effet significatif sur toutes les propriétés étudiées. L'effet des coupes partielles sur la croissance radiale (cerne, bois initial et bois final) est significatif, mais cet effet varie selon l'âge de l'arbre, d'une année à l'autre après le traitement et entre les hauteurs dans l'arbre. De plus, les résultats ont montré que la réponse optimale après les coupes partielles en termes de croissance est observée sur des arbres de moins de 35 ans, après cet âge l'arbre ne réagit plus au traitement. De la même façon, l'effet des coupes partielles sur la masse volumique (cerne, bois initial et bois final) varie selon l'âge de l'arbre et entre les hauteurs, mais il n'a pas d'implication pratique sur la masse volumique du bois. Finalement, l'effet des coupes partielles sur la morphologie des trachéides a été significatif mais varie selon l'âge de l'arbre, entre les hauteurs et les années après traitement (seulement pour la largeur). Cependant, cet effet n'a pas d'implication pratique et industrielle sur les dimensions des trachéides. Cette étude a prouvé que malgré l'effet positif des coupes partielles sur la croissance annuelle, sur les arbres de moins de 35 ans, il n'affecte pas la qualité de la fibre et du bois d'épinette noire.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

L'épinette noire (*Picea mariana* (mill) B.S.P) est l'un des conifères les plus répandus de la forêt boréale canadienne et constitue la plus importante espèce de bois à pâte au Canada tout en étant aussi largement recherchée par l'industrie du bois d'œuvre (Burns et Honkala, 1990). Les propriétés et l'abondance de cette essence à croissance lente, en moyenne 1,4 dm³/ha annuellement, lui confèrent une importance économique considérable (Burns et Honkala, 1990).

La dynamique de la forêt boréale est contrôlée en grande partie par les incendies forestiers (Weber et Flannigan, 1997; Payette, 1992 et Johnson, 1992), qui sont généralement destructeurs et les responsables de la régénération forestière (Heinselman, 1981). Suite aux feux, les peuplements équiennes dits de première cohorte (ou stade des essences de lumière) dominant au départ et évoluent au fil des années vers des peuplements de deuxième cohorte (ou stade intermédiaire) et de troisième cohorte (stade de stabilité relative) (Harper *et al.*, 2002). Lorsque l'intervalle entre les feux est long, certains peuplements peuvent devenir inéquiennes (Groot et Horton, 1994), où les nouveaux individus sont recrutés dans les trouées créées par le chablis des arbres âgés (Oliver et Larson 1996).

Dans un contexte de développement durable, la dynamique naturelle des forêts est d'une grande importance pour la sylviculture (Bergeron *et al.*, 2002; Seymour et Hunter, 1999) l'aménagement équienne avec principale pratique la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) ne permet pas de maintenir l'ensemble de la composition et de la structure des peuplements des mosaïques forestières naturelles (Bergeron *et al.*, 2001 et Harper *et al.*, 2002). Au cours des dernières années, l'exploitation forestière en forêt boréale a atteint ses limites dans certaines régions. De plus, au Québec, la réduction des terres allouées à la production de fibre de bois (Coulombe, 2004) couplée à une augmentation globale de la compétition dans l'industrie forestière a mené au développement de nouvelles stratégies afin

d'augmenter le volume de bois produit dans les forêts restantes (Vincent *et al.*, 2009). Dans cette perspective, des traitements sylvicoles comme l'éclaircie commerciale (EC) et la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) représentent des interventions intéressantes à préconiser puisqu'elles favorisent un accroissement des tiges résiduelles ainsi qu'une récolte plus hâtive et plus productive des secteurs traités (Pamerleau-Couture, 2010). Une solution envisageant une protection de la biodiversité consisterait à une action couplée de réduction du taux des coupes totales avec une augmentation de la pratique des coupes partielles (Harvey *et al.*, 2002). Dans la pessière à mousses, les coupes partielles permettraient de créer et de maintenir des peuplements irréguliers en plus d'un couvert continu et relativement fermé à l'échelle du paysage. Les coupes partielles sont donc une pratique sylvicole qui permet de favoriser à la fois un approvisionnement en fibre et le maintien de la biodiversité.

Les coupes partielles ont pour but d'augmenter la croissance et la productivité des arbres résiduels à travers d'une réduction de la compétitivité entre les individus rémanents du peuplement. D'ailleurs, les effets des coupes partielles sur les propriétés de la fibre demeurent peu documentés. Les résultats trouvés dans la littérature sont à la fois ambigus et varient d'une espèce à l'autre. De plus, très peu d'études ont documenté l'évolution de ces propriétés à la suite des coupes partielles opérées dans des peuplements ayant atteint la maturité commerciale. En plus, on retrouve peu d'information dans la littérature (Alteyrac, 2005; Vincent *et al.* 2009 et Ourais. 2012) sur les effets des traitements sylvicoles sur la qualité et les propriétés du bois d'épinette noire.

La présente étude a eu pour but d'évaluer l'effet des coupes partielles sur la croissance radiale et quelques attributs de la qualité du bois chez l'épinette noire, à savoir la masse volumique du bois et les dimensions des trachéides

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 La forêt boréale québécoise

Les forêts du Québec jouent un rôle de premier plan, tant du point de vue économique et social qu'environnemental. En effet, immenses et omniprésentes, les forêts du Québec représentent 20 % des forêts canadiennes et 2 % des forêts mondiales. Le Québec s'étend sur près de 1,7 million de km², où la zone de forêt dense couvre 760 000 km², dont la superficie se subdivise en trois parties soit, du sud au nord, la forêt feuillue, la forêt mélangée et la forêt boréale continue. Le territoire forestier productif, soit les forêts commerciales, compte pour 70 % de cette superficie. La forêt boréale du Québec représente une superficie de 1 068 400 km² dont 30 % est destiné à la production forestière (MRNF, 2010).

D'après le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec (MRNF, 2010), les plus grandes étendues forestières sont situées dans la forêt boréale, région considérée comme l'un des principaux moteurs de l'économie du Québec. En effet, l'industrie forestière, notamment les secteurs de l'exploitation forestière, de la fabrication des produits du bois et de la fabrication du papier, représente une part majeure de l'économie québécoise. Le MRNF affirme qu'une vaste partie de cette forêt est exclue de la production forestière en raison de nombreuses particularités territoriales relatives entre autres aux superficies soustraites aux fins de protection de l'environnement et également de l'établissement de la limite nordique d'attribution définie par le gouvernement du Québec en 2003. Toutes les superficies récoltées en forêt publique sont remises en production et la priorité est accordée à l'aménagement protégeant la régénération forestière déjà établie avant la récolte.

2.2 Épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B. S.P)

2.2.1 Taxonomie, écologie forestière et caractères botaniques

L'épinette noire appartient au genre *Picea* lequel comprend environ quarante essences dans le monde entier, dont sept d'entre elles se trouvent en Amérique du Nord, et parmi ces dernières, cinq se trouvent au Canada, dont l'épinette noire (Farrar, 1995). Le nom scientifique de l'épinette noire est *Picea mariana* (Mill.) Britton, Sterns et Poggenb et son seul synonyme connu est *Picea mariana* var. *brevifolia* (Peck). L'épinette noire est connue par quelques noms vernaculaires, à savoir : épinette noire, épinette à bière, épinette de savanes, épinette de l'Est, épinette marial, épinette des tourbières, sapinette noire et, en anglais, black spruce (TheWoodExplorer.com, 2006).

L'épinette noire est l'un des conifères les plus répandus de la forêt canadienne et présente une répartition sur un vaste territoire sur tout le continent, étant une exclusivité de la forêt boréale nord-américaine (Figure 2.1). C'est en Ontario, au Québec et à Terre-Neuve que l'on trouve les grands massifs de pessières à épinette noire. Au Québec, cette bande de près de 300 km de largeur couvre 28 % de la superficie de la province, étant donc l'une des espèces les plus abondantes avec un volume de 1,084 milliard de m³ solide, tel que recensé au troisième inventaire décennal (Lessard et Boulfroy, 2010). Au nord de ce domaine de la pessière à épinette noire et à mousses, on trouve une autre ceinture de pessière, cette fois très ouverte : la pessière à épinette noire et lichens. Enfin, encore plus au nord, une dernière zone, la toundra forestière, présente la limite nord des arbres et est constituée de petites épinettes toutes rabougries et très éparses (Lessard et Boulfroy, 2010).



Figure 2.1 Répartition de l'épinette noire en Amérique du Nord (Source : Zhang et Koubaa, 2009)

D'après Bruns et Honkala (1990), l'épinette noire constitue la plus importante espèce de bois à pâte au Canada tout en étant aussi largement recherchée par l'industrie du bois d'œuvre. Elle pousse sur différents sites et tolère plusieurs types de sol. Son habitat est généralement mal drainé au sud de son territoire, que ce soit dans des peuplements purs ou mixtes. Au nord, elle pousse d'habitude sur des sols humides et organiques dans de grands peuplements purs ou dans des peuplements mixtes. Sur l'ensemble de son territoire, l'épinette noire se trouve généralement à des altitudes comprises entre 100 et 850 m. Elle est une essence qui tolère l'ombre modérément et est souvent associée au pin gris (*Pinus banksiana* (Lamb.)), à l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.), au sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), au peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* (Michx.)), au bouleau à papier (*Betula papyrifera* var. *papyrifera*) et au mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch.) (Zhang et Koubaa, 2009). D'après Lessard et Boulfroy (2010), dû à son amplitude écologique, il n'est pas rare de trouver l'épinette noire au sud, même en massifs, où les conditions environnementales deviennent plus extrêmes, où les sommets sont froids, par exemple, ou encore dans les milieux très humides, telles les tourbières.

En ce qui concerne sa croissance, d'après Zhang et Koubaa (2009), dans des conditions sans aménagement et dans les bons sites, l'épinette noire atteint une hauteur moyenne de 12 à 20 m et un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) d'environ 20 cm. Les mêmes auteurs mentionnent que, dans les mauvaises conditions, la hauteur et le diamètre moyens seraient compris entre 8 et 12 m et d'environ 13 cm, respectivement. Les propriétés et l'abondance de cette essence à croissance lente, en moyenne 1,4 m³/ha annuellement, lui confèrent une importance économique considérable (Burns et Honkala, 1990).

2.2.2 *Caractères botaniques*

L'épinette noire est un arbre ou un arbuste conifère, au feuillage persistant, petit et dressé. Elle se caractérise par son port pyramidal et peut atteindre 20 m et vivre de 175 à 200 ans (maximum 250 ans) (Lessard et Boulfroy, 2010). Son tronc est droit avec un faible défilement et une cime pointue composée de petites branches compactes et tombantes. La partie supérieure de la cime est souvent très dense et comprend de nombreux cônes. Le

système racinaire est peu profond et étalé; la plupart des racines se trouvent dans les 20 cm supérieurs des horizons pédologiques organiques (Viereck et Johnston, 1990).

Elle présente une écorce mince (entre 6 et 13 mm), écailleuse ou déchiquetée et d'un brun grisâtre (Lessard et Boulfroy, 2010). Les branches d'épinette noire sont petites et les rameaux sont d'un orange-brun foncé ou d'un brun-jaunâtre, mats et ont une tache violacée foncée à la base de leur pédoncule (Elias et Sargent, 1980 et Farrar, 1995). Ses aiguilles sont courtes (de 6 à 15 mm), quadrangulaires (contrairement au sapin qui a des aiguilles plates) et disposées tout le tour du rameau (Lessard et Boulfroy, 2010).

Ses cônes mâles sont petits, nombreux et cylindriques tandis que les cônes femelles ont une forme d'oblongue à cylindrique et sont produits au bout ou proche du bout des rameaux. Ses fruits sont de petits cônes rigides, presque ronds ou ovoïdes, font de 2 à 4 cm de long; rouge foncé à violet lorsqu'ils sont jeunes et deviennent brun violacé foncé plus tard; leur bout émoussé décroît progressivement pour former une petite tige arrondie recouverte d'écailles. Les cônes restent attachés à l'arbre pendant plusieurs années et ses écailles sont minces et leurs bords dentés sont irréguliers. Les graines font environ 2 mm de long, et sont brun foncé et ailées (leurs ailes font à peu près le double de la longueur de la graine) (Zhang et Koubaa, 2009).

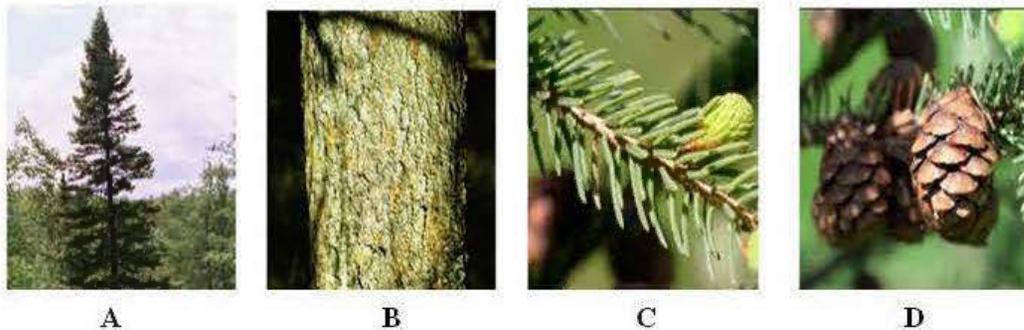


Figure 1.2 Illustration de l'arbre (A), de l'écorce (B), des aiguilles (C) et des cônes (D) de l'épinette noire (Source : Daniel Tigner, 2011)

2.2.3 *Amélioration des arbres*

L'épinette noire un arbre recherché et prisé pour la production de bois à pâte et de bois en billes à cause de la qualité de son bois et de sa fibre alliée à la résistance aux insectes et aux maladies (Beaulieu *et al.*, 1989). En vertu de ses qualités, l'épinette noire est l'essence commerciale et de reboisement la plus importante dans l'Est du Canada, où on y trouve de nombreux programmes actifs visant son amélioration reposant sur la forme, la croissance et l'adaptation de l'arbre au site, et sa résistance aux insectes et aux maladies (Zhang et Koubaa, 2009).

2.2.4 *Caractéristiques anatomiques du bois*

2.2.4.1 *Caractéristiques macroscopiques*

Le bois de l'épinette noire est clair, allant d'un blanc presque parfait à un brun jaunâtre pâle, il ne présente ni odeur ni goût caractéristique. Le bois de cœur n'est pas distinct. Son bois varie de modérément léger et tendre à modérément tendre. Les cernes de croissance du bois de l'épinette noire sont marqués délimités par le contraste entre le bois final (fin et foncé) et le bois initial (plus clair et épais) du cerne suivant. Les zones du bois final sont nettes et peuvent être perçues à l'œil nu, par contre, elles ne sont généralement pas prononcées et sont bien plus foncées et minces que celles du bois initial (Zhang et Koubaa, 2009)

2.2.4.2 *Caractéristiques microscopiques*

La coupe transversale du bois d'épinette noire est illustrée dans les Figures 2.3a et 2.3b, où on peut observer les trachéides du bois initial et final (à transition graduelle) et les canaux résinifères à parois épaisses. Les Figures 2.4a et 2.4b illustrent la coupe radiale du bois d'épinette noire, par lesquelles on voit, respectivement, les trachéides appartenant au bois initial aussi bien qu'au bois final et une trachéide transversale ainsi que le champ de croisement à l'intérieur duquel on voit les ponctuations picéoïdes. La coupe tangentielle du bois d'épinette noire est illustrée dans la Figure 2.5 où on note les rayons unisériés, ainsi que les rayons fusiformes.

D'après Koran (1977), les trachéides de l'épinette noire font en moyenne 3,5 mm de long et entre 25 et 30 μm de diamètre. L'épaisseur moyenne de la paroi des cellules est de moins de 1 μm dans le bois initial et de 3 à 4 μm dans le bois final. Dans la fibre de la pâte thermomécanique en provenance du bois de l'épinette noire, l'épaisseur moyenne de la paroi des cellules varie de 1,95 à 2,16 μm , cette valeur étant en fonction de l'intensité de raffinage. D'après la littérature, la surface transversale de la fibre varie de 130 à 146 μm^2 , et celle du lumen de 69 à 139 μm^2 (Jang *et al.*, 1996) et la fibre présente en moyenne un poids linéique de 123 $\mu\text{g}/\text{m}$ (Seth, 1990). Les ponctuations aréolées de la paroi radiale des trachéides du bois initial se trouvent en rangées simples ou, très rarement, en lignes jumelées.

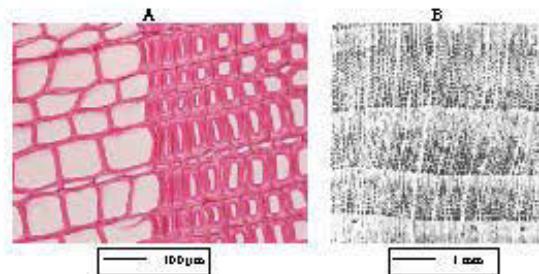


Figure 2.3 Coupes transversales du bois d'épinette noire (Source : A. Alteyrac, 2005 et B. Marguerie, 2000)

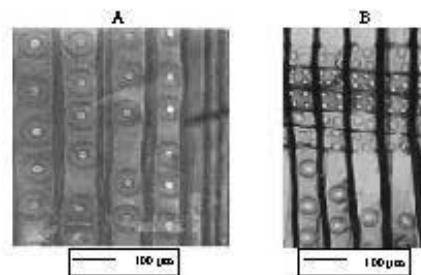


Figure 2.4 Coupes radiales du bois d'épinette noire (Source : Marguerie, 2000)

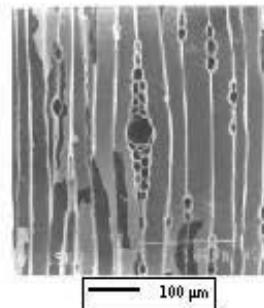


Figure 2.5 Coupes tangentielles du bois d'épinette noire (Source : Marguerie, 2000)

Des ponctuations tangentielles, 5,4 μm de diamètre (entre 4 et 6 μm), sont observées dans les dernières rangées de trachéides du bois final, ainsi que dans les premières rangées de trachéides du bois initial (Koran, 1977). Les ponctuations menant aux parenchymes de rayon sont de petite taille, homogènes avec des bords marqués et en rangée simple horizontale (elles sont en général au nombre de 2 à 4 par champ de croisement). Les rayons sont unisériés, minces et nombreux, et font de 1 à 16 cellules de hauteur ou plus et les rayons fusiformes sont dispersés, comprennent un ou deux canaux résinifères transversaux. Les trachéides transversales ne sont pas dentées et sont présentes dans les deux types de rayons, elles se limitent généralement à une rangée sur les bords supérieurs et inférieurs.

Les canaux résinifères sont alignés et comptent de 7 à 9 cellules épithéliales à paroi épaisse qui sont souvent occluses par des thylloïdes dans le bois de cœur. Le diamètre maximal des canaux résinifères longitudinaux est d'environ 135 μm et leur diamètre transversal est de moins de 30 μm (Zhang et Koubaa, 2009).

2.2.5 *Propriétés chimiques*

Le bois de l'épinette noire a une teneur en lignine plus faible que l'épinette blanche ou le sapin baumier. Cependant, les données n'indiquent aucune différence appréciable de la teneur en lignine entre l'épinette noire et le pin gris (Zhang et Koubaa, 2009).

2.2.6 *Propriétés physiques*

2.2.6.1 *Masse volumique*

La masse volumique à l'état vert de l'épinette noire est de 762 kg/m^3 (Pnevmaticos *et al.*, 1972) et sa masse volumique basale est de 406 kg/m^3 en moyenne (Jessome, 2000 et Barbour *et al.*, 1996). Les masses volumiques du bois de cœur (430 kg/m^3) et de l'aubier (438 kg/m^3) de l'épinette noire ne sont pas statistiquement différentes (Hernández et Lessard, 1997).

D'après Alteyrac *et al.* (2005), la masse volumique des cernes est très liée à la proportion de la paroi des cellules, surtout dans le bois initial, où le bois initial présente une

valeur à l'humidité de 12% variant de 375 à 396 kg/m³ et pour le bois final, de 569 à 623 kg/m³ (Koubaa *et al.*, 2000 et Zhang *et al.*, 1996).

2.2.6.2 Teneur en humidité à l'état vert

La teneur en humidité de l'aubier de l'épinette noire est bien plus élevée que celle du bois de cœur, où les valeurs initiales sont en moyenne de 143 % et 37 %, respectivement (Hernández et Boulanger, 1997). D'après Gingras et Sotomayor (1992), cette caractéristique varie également selon le site et la saison.

2.2.6.3 Stabilité dimensionnelle et retrait

La stabilité dimensionnelle peut être évaluée par les changements dimensionnels et la teneur en humidité selon la formule décrite dans le *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material* (Forest Products Laboratory, 2010). Le retrait du bois de l'épinette noire est considéré faible, dont les valeurs de retrait radial, tangentiel et volumique du bois vert à différentes teneurs en humidité sont respectivement : à 0 % d'humidité (4,1; 6,8 et 11,3%); à 6 % d'humidité (3,3; 5,4 et 9 %); à 12 % humidité (1,7; 4 et 6,5 %) et à 20 % d'humidité (1,4; 2,3 et 3,8 %) (Peck, 1957; Jessome, 2000).

2.2.6.4 Durabilité et perméabilité

Le bois de cœur de l'épinette noire est considéré comme non durable (Morris, 1996). D'après Mullins et McKnight (1981) et Forest Products Laboratory (2010), le bois de l'épinette noire ne résiste pas aux situations propices aux caries. La durée de vie moyenne des poteaux non traités d'épinette noire est de cinq ans (Krzyszewski *et al.*, 1980).

D'après Morris (1996), la perméabilité du bois indique la facilité avec laquelle les fluides peuvent être transportés dans le bois ou hors du bois, étant donc un facteur essentiel pour la conservation, mise en pâte et le séchage du bois. L'auteur mentionne que l'aubier de l'épinette noire est considéré moyennement imperméable tandis que son bois de cœur est extrêmement imperméable.

2.2.7 *Propriétés mécaniques*

Les propriétés mécaniques de l'épinette noire ont été étudiées par Alteyrac *et al.* (2005). Les auteurs ont analysé les propriétés de flexion de l'épinette noire par rapport à certaines de ses propriétés anatomiques et physiques. Ils ont observé une forte corrélation entre le module d'élasticité et le module de rupture, et entre le module d'élasticité et l'angle des microfibrilles. Aucune indication de relation linéaire entre les propriétés mécaniques et la masse volumique ou la largeur des cernes n'a été trouvée.

Concernant le bois de dimension, Zhang *et al.*, (2000) ont constaté chez l'épinette noire une augmentation du module d'élasticité (MOE) et du module de rupture (MOR) du bas vers le haut de l'arbre. D'ailleurs, ces variations du MOE et du MOR en fonction de la position en hauteur dans l'arbre montrent une diminution de la corrélation entre ces deux variables, où 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. Le bois de l'épinette noire à l'état vert présente un MOE en flexion statique de 9 100 MPa, un MOR en flexion statique de 40,5 MPa (Jessome, 2000) et une dureté de 2 300 N et une résistance à l'écrasement de 41,1 MPa (Meier, 2012).

2.2.8 *Usinage et usages*

L'épinette noire est une espèce à croissance lente, par conséquent, ses fibres sont de bonne qualité pour la production de pâte et papier (Burns et Honkala, 1990). Les propriétés de son bois lui confèrent de la valeur due aux corrélations entre l'anatomie et la qualité du bois (Mäkinen *et al.*, 2002a). Le bois de l'épinette noire est normalement utilisé pour la production de pâte et papier, de bois d'œuvre, de bois de sciage et de caisses (Meier, 2012). Au Québec, il est de plus en plus utilisé pour la production de produits à valeur ajoutée, tels que les poutres, les panneaux MDF, le bois jointé et le lamellé-collé (Bustos, 2003).

Concernant les propriétés technologiques, le bois de l'épinette noire est facile à usiner tant qu'il ne présente pas de nœuds. Il présente un bon collage et une finition facile, cependant, dû à sa structure à pores fermés, il donne de mauvais résultats lors du processus de coloration (des défauts comme des taches et irrégularité). Une couche de scellant, de

teinture ou d'encre en gel est recommandée lorsque le bois de l'épinette noire est coloré (Meier, 2012).

2.3 Les systèmes sylvicoles

Les systèmes sylvicoles sont des interventions qui assurent les principaux objectifs de la sylviculture, à savoir : la régénération, l'éducation (conduction) et la récolte du peuplement. Le système sylvicole est pratiqué en fonction du développement du peuplement et comprend une ou plusieurs interventions ordonnées d'une manière logique dans le temps. Ces systèmes sont donc définis et choisis en fonction des caractéristiques écologiques des peuplements, des objectifs d'aménagement, de la régénération, de la méthode de récolte et des contraintes opérationnelles (Lussier, 2012). Le traitement sylvicole le plus répandu est la coupe totale ou coupe à blanc, autrement connu comme coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), et la coupe partielle.

Avant de parler et de scruter en détail les principaux systèmes sylvicoles pratiqués, il faut décrire quelques aspects de la sylviculture, à savoir : la densité des peuplements, l'espacement initial et l'élagage.

2.3.1 Densité des peuplements, espacement initial et élagage

La densité des peuplements renvoie à la mesure du pourcentage du couvert forestier sur une superficie donnée en se référant ainsi à la notion de concurrence qui fait intervenir la distance entre les troncs des individus, leur accès à l'eau, à la lumière et aux substances nutritives du sol, la hauteur et la largeur du houppier (Alteyrac, 2005). La totalité de l'espace disponible pour l'arbre détermine son taux de croissance et par conséquent, la qualité de son bois.

La forme de la tige, la mortalité et la grosseur des branches, la qualité du bois, la production à l'hectare ainsi que l'arbre, la survie, la stabilité de la plantation, la rentabilité des éclaircies et les aspects économiques sont les principaux facteurs à prendre en compte pour le choix de la densité des peuplements (Thiffault *et al.*, 2003).

L'espacement initial exerce une influence sur les caractéristiques de l'arbre, telles que le poids spécifique, la densité de base et la conformation des fibres (Giordano, 1970). En

effet, l'espacement initial accélère la croissance, augmente le diamètre et le volume de croissance de chaque tige (Zavitkovski et Dawson, 1978), diminue la mortalité des arbres (Janas et Brand, 1988), l'âge de rotation (Morris *et al.*, 1994), la densité du bois (Cown, 1980), affectant ainsi la qualité du bois (Zhang *et al.*, 2002). L'augmentation des espacements entre les tiges diminue aussi la longueur des fibres (Yang et Hazenberg 1994) et augmente la proportion de bois juvénile et diminue celle de bois mature (Yang, 1994).

L'élagage est une intervention sylvicole qui n'envisage pas d'augmenter la croissance et le rendement de la plantation, mais plutôt l'obtention de bois de qualité. L'élagage artificiel est requis afin de produire du bois de qualité, car cette opération permet d'atténuer le fort défilement, la nodosité de même que la proportion de bois juvénile. L'élagage a comme de produire du bois sans nœuds, ce qui améliore ses propriétés mécaniques ainsi que son apparence (Briggs, 1995). Quand cette opération est pratiquée sur des branches vivantes, la transition de formation du bois juvénile en bois mature est accélérée (Megraw, 1985) et le défilement de l'arbre est réduit (Kershaw et Maguire, 2000).

2.3.2 Coupe totale

D'après le Conseil canadien des ministres des forêts (2002), la coupe à blanc est l'une des pratiques sylvicoles les plus pratiquées depuis des décennies. Le manuel de foresterie (2003, cité par Pamerleau-Couture, 2010) mentionne que, depuis une dizaine d'années, la coupe totale s'est transformée en coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS). Cette opération consiste à récolter tous les arbres marchands du peuplement (100% du volume) tout en protégeant la régénération préexistante et en minimisant les perturbations du sol. Groot *et al.* (2005) affirment que la CPRS est une méthode de coupe adaptée à des peuplements ménagés selon un régime équiennne, car des peuplements inéquiennes risquent d'être transformés en structure régulière à la suite de la CPRS.

2.3.3 Coupes partielles

Les principales coupes partielles pratiquées au Québec sont l'éclaircie pré commerciale, l'éclaircie commerciale, les coupes de jardinage ou de préjardinage et les

coupes progressives. D'après le ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec, en 2006-2007, dans les forêts publiques il s'est réalisé environ 12 473,4 ha de coupes de jardinage et de préjardinage, 2 472,6 ha de coupes progressives et 4 528,8 ha d'éclaircies commerciales, comparativement à 181 207,2 ha en CPRS (MRN, 2013). Les fonctions sylvicoles et les types de coupes partielles d'un peuplement aménagé selon un régime équiennien varient en fonction des stades de développement de ce peuplement.

2.3.3.1 Coupe avec protection de petites tiges marchandes

La coupe avec protection de petites tiges marchandes consiste à récolter les tiges dont le diamètre est supérieur à la limite fixée où l'étendue des valeurs du diamètre à hauteur de poitrine est de 13, 15 ou 17 cm, selon la hauteur du peuplement. Ce traitement permet de récolter la majorité du volume marchand (70 à 95 %) tout en protégeant la régénération préétablie et les petites tiges marchandes (Plante et Villeneuve, 2013). Ces dernières serviront de semenciers (Riopel *et al.*, 2011) et devraient se positionner dans l'étage dominant du nouveau peuplement de structure irrégulière. Ce traitement s'applique aux peuplements composés d'essences résineuses tolérantes telles que le sapin, l'épinette noire et l'épinette blanche. La CPPTM a pour effet d'augmenter le diamètre moyen des tiges récoltées par rapport aux coupes totales. Par conséquent, la rentabilité de la récolte peut augmenter par rapport aux coupes totales (Ruel *et al.*, 2007). De plus, la protection de la haute régénération permet de réduire le temps de révolution, qui peut atteindre 120 ans en forêt boréale (Comité consultatif scientifique du manuel d'aménagement forestier (2002).

2.3.3.2 Éclaircie

2.3.3.1.1 Éclaircie pré commerciale

L'éclaircie pré commerciale est le traitement sylvicole non commercial le plus utilisé au Québec et est appliquée à la suite de la fermeture du couvert lors que les cimes se joignent (MRNFP, 2003). Au moment de la fermeture du couvert, les arbres sont encore jeunes et ne possèdent pas une bonne valeur marchande, par conséquent, une exploitation sans profit significatif. L'éclaircie pré commerciale envisage la réduction de l'âge de rotation,

l'augmentation du diamètre des tiges rémanentes afin qu'elles puissent accroître plus rapidement et donc parvenir à des volumes et des dimensions commercialisables. Les arbres deviennent ainsi de très bonne qualité malgré le défilement plus ou moins prononcé de la tige à la suite de l'éclaircie (Zhang et Chauret, 2001 et Bédard *et al.*, 1998).

2.3.3.1.2 *Éclaircie commerciale*

L'application de l'éclaircie commerciale dans des peuplements d'épinettes noires dans la forêt boréale du Québec a débuté au début des années 90 (Vincent *et al.*, 2009). Les auteurs mentionnent que cette intervention s'applique dans des peuplements équiennes et consiste à récolter une fraction des tiges marchandes d'un peuplement. Lors d'une éclaircie commerciale, les arbres de moins bonne qualité sont récoltés (Alteyrac *et al.*, 2005) ce qui permet une sélection des meilleurs phénotypes ainsi que de régulariser les classes de diamètres des tiges. Cela vise à améliorer la production ligneuse d'un peuplement en contrôlant le niveau de compétition entre les arbres ou en ajustant la composition du peuplement. L'éclaircie commerciale n'entraîne pas d'augmentation de la production ligneuse à l'échelle du peuplement, où l'accélération de la croissance des arbres résiduels ainsi que la réduction du volume de mortalité ne sont pas significatives à point de compenser le volume récolté lors de l'éclaircie. Donc, de manière à maximiser la réponse d'un peuplement rémanent en fonction du volume à l'hectare, il faut cibler des peuplements denses, relativement jeunes et productifs ainsi que de diminuer au maximum les trouées générées par les sentiers de débardage (Lussier, 2012).

2.3.3.3 *Coupes de jardinage*

D'après Trottier *et al.* (2011), la coupe de jardinage est un traitement sylvicole dans le cadre des coupes partielles effectuées dans des peuplements inéquiennes. Ce type de coupe est fréquemment appliqué dans des peuplements composés d'érables, de bouleaux jaunes ou de hêtres. La récolte se fait par pied d'arbre choisi individuellement ou par petits groupes, tout en prenant soin de protéger les individus qui sont exempts de maladies ou bien de

malformations, ce qui permet de rehausser la vigueur du peuplement et de libérer de l'espace pour la croissance des jeunes arbres en santé.

La coupe de jardinage par pied d'arbre ou par groupe d'arbres est définie comme l'abattage ou la récolte périodique d'arbres choisis individuellement ou par petits groupes dans un peuplement de structure jardinée. Le jardinage englobe les coupes intermédiaires et les coupes de régénération dans une même opération, où une partie seulement du peuplement est enlevée, de sorte que l'on puisse le perpétuer indéfiniment (Doucet, 1976).

Le jardinage cultural est une opération polyvalente, qui assure la régénération, la récolte et l'éducation du peuplement (Pineau et Lessard, 2003) dans une futaie inéquienne pour l'amener ou la maintenir dans une structure équilibrée. D'après Trottier *et al.* (2011), la coupe de jardinage prend en compte l'ensemble des essences, des classes de diamètre, de la priorité de récolte et de la qualité des tiges qui se trouvent dans le peuplement.

Ce genre de coupe peut être réalisé sans ou avec assainissement. Dans le cas où l'assainissement du peuplement est pratiqué, la proportion de tiges de mauvaise qualité est élevée. Le prélèvement se fait sur les arbres endommagés ou vulnérables pour assainir la forêt où la proportion de tiges de mauvaise qualité est élevée. Ce pourcentage de prélèvement varie entre 30% et 70% de la surface terrière du peuplement.

2.3.3.4 *Coupes progressives*

2.3.3.3.1 *Méthode des coupes progressives uniformes (Shelterwood method)*

Les coupes progressives ont pour but l'établissement d'une régénération abondante et vigoureuse avant la coupe finale. Les coupes progressives sont composées d'une ou de plusieurs coupes partielles en ayant comme objectif de favoriser l'installation de la régénération sous couvert (Lussier, 2012). Ce procédé conduit à la réalisation complète du peuplement à travers une série de coupes partielles qui survient en fin de révolution (Van der Kelen et Lessard, 2004). D'après Nyland (2002), les coupes progressives consistent à l'ouverture du peuplement de façon progressive à fin de favoriser l'établissement et le développement des jeunes semis ou plants. D'après Smith *et al.* (1997), cela libère la

nouvelle cohorte de l'ombrage qui serait opprimée, ce qui donnera à ces jeunes plants une protection suffisante en présence de conditions adverses par la conservation d'arbres résiduels pour tempérer leur environnement physique.

2.3.3.3.2 *Méthode des coupes progressives par groupes*

Van der Kelen et Lessard (2004) mentionnent que le procédé de régénération par coupes progressives appliqué de façon uniforme envisageant de régénérer la superficie est divisé en deux variantes, à savoir : par trouées de régénération et par lisières. Pour les deux variantes, les principes sont les mêmes que dans la coupe progressive principale, mais sont appliqués de façon à couvrir la surface à régénérer en plusieurs temps à l'intérieur de la période convenue pour une coupe spécifique.

D'après Stroempl et Secker (1995), l'objectif des coupes progressives par groupes ou trouées est donc d'ouvrir de petits groupes parmi des peuplements denses et arrivés à maturité afin d'augmenter la quantité de lumière diffusée sans augmenter l'ensoleillement direct sur le parterre forestier. Ces auteurs affirment également que cette méthode encourage la croissance de la régénération préexistante aussi bien qu'empêche la croissance de la végétation compétitrice qui nécessite généralement des conditions de lumières plus intenses. Les coupes progressives par groupes sont parfois utilisées pour enrichir la composition avec des espèces intolérantes ou pour donner aux espèces à croissance lente un avantage sur des espèces agressives (Smith *et al.*, 1997).

2.3.3.3.3 *Méthode des coupes progressives par bandes ou en lisières*

Cette méthode consiste à récolter successivement des bandes puis retourner à intervalles réguliers pour couper progressivement d'autres bandes. De cette façon, le peuplement est couvert en entier en 3-4 interventions (Nyland, 2002). D'après Smith (1986), la coupe progressive par bandes rend possible des interventions successives selon des intervalles relativement courts tout en limitant la distribution des classes d'âges à pas plus de 20% de l'âge de la révolution. À travers cette méthode, les intervalles de retour pour récolter

progressivement la série de bandes successives sont assez courts, ce qui permet de promouvoir un nouveau peuplement équienne (Nyland, 2002).

2.3.3.3.4 *Méthode des coupes progressives d'abri*

La coupe progressive d'abri consiste à maintenir en place un couvert protecteur, mais pas nécessairement l'essence désirée puisqu'elle est déjà installée. À travers cette variante, le sylviculteur cherche donc à maintenir des arbres à larges cimes afin d'abriter les jeunes (Van der Kelen et Lessard, 2004).

2.3.3.3.5 *Méthode des coupes progressives irrégulières*

Les coupes progressives irrégulières sont définies comme un procédé de régénération qui renferme un groupe de traitements libres et constitue un compromis entre la coupe à blanc, la coupe progressive uniforme et la coupe de jardinage à fin d'assurer la régénération d'une manière non homogène (CERFO, 2007). Les coupes progressives irrégulières sont utilisées lorsque le peuplement traité comporte une proportion intéressante d'individus qu'il est souhaitable de maintenir sur pied durant une bonne période, et ce même après que la régénération se soit installée (MRN, 1999). D'après le centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc (CERFO, 2007), les coupes progressives irrégulières s'inscrivent dans le régime de futaie irrégulière et visent donc à constituer plusieurs cohortes soit en se superposant soit en se juxtaposant selon les modèles du traitement. La coupe progressive irrégulière permet également d'améliorer la croissance des tiges d'avenir (perchis et jeune futaie) au moyen du contrôle d'un espacement initial optimal laissé entre les tiges à venir.

Contrairement à la coupe de jardinage, la coupe progressive irrégulière n'envisage pas l'obtention d'un rendement soutenu à l'hectare, mais plutôt à l'échelle de l'ensemble des strates d'un secteur donné (CERFO, 2007). D'après Van der Kelen et Lessard (2004), la coupe progressive irrégulière se diffère des coupes progressives uniformes en ce que la régénération est promue sous abri grâce à des coupes de régénération successives avec une période de régénération longue et indéfinie de la partie la plus âgée (25, 40, 50 ans). CERFO

(2007) affirme que les coupes progressives irrégulières consistent en trois étapes : (1) la coupe d'ensemencement (2) une ou plusieurs coupes secondaires et (3) la coupe finale.

Les coupes progressives irrégulières appliquées en Amérique du Nord sont regroupées en trois variantes, à savoir : coupes progressives irrégulières par trouées agrandies, coupes progressives irrégulières à couvert permanent et coupes progressives irrégulières à régénération lente (Raymond *et al.*, 2010). D'après les derniers auteurs, la CPI par trouées agrandies vise la régénération de nouvelles cohortes sous forme de trouées, qui sont graduellement agrandies sans circuler sur les superficies en régénération avec la machinerie et jusqu'à la récolte complète du peuplement. La CPI à couvert permanent applique la séquence de coupes plus librement dans l'espace et le temps, ce qui permet le maintien d'un couvert continu ainsi que d'une structure comportant plusieurs cohortes de différents âges. Les arbres à être récoltés pendant cette variante sont choisis en fonction des conditions du peuplement. La CPI à régénération lente a pour but de régénérer l'ensemble du peuplement en conservant une structure plus régulière, mais avec une rétention prolongée du couvert à fin de faire croître une strate de haute régénération à l'abri des conditions adverses.

2.3.4 Importance des coupes partielles en aménagement écosystémique

L'aménagement écosystémique a comme principaux buts de maintenir les écosystèmes aménagés le plus proche possible de leur état naturel ou de les en rapprocher lorsqu'ils ont été modifiés par les activités humaines. Étant donné que la composition et la structure spatiale d'un écosystème forestier dépend des régimes des perturbations naturelles, les buts de l'aménagement écosystémique peuvent être atteints au moyen des systèmes sylvicoles appropriées dont les effets sont similaires à ceux des perturbations naturelles (Bergeron et Harvey, 1997). Les perturbations naturelles et les traitements sylvicoles sont des processus qui influencent plusieurs caractéristiques importantes du peuplement dont sa structure et sa composition. À long terme, la sévérité et la fréquence de ces perturbations déterminent également la structure d'âge interne des peuplements (Nyland, 1996 et Oliver et Larson, 1996). Les systèmes sylvicoles sont caractérisés en fonction du type de coupe utilisé pour régénérer le peuplement aussi bien que par la fréquence et l'intensité de ces coupes. En Amérique du Nord les systèmes inéquiennes

(permettent de régénérer des peuplements de structure irrégulière ou multiétagée) et les systèmes équiennes (permettent de régénérer des peuplements de structure régulière) sont les principaux systèmes utilisés (Bouchard, 2008)

La conversion d'une structure équiennne (régulière) vers une structure inéquiennne (irrégulière) peut permettre de reproduire la succession après feu. Ce type de conversion consiste à utiliser des coupes partielles pour ouvrir graduellement le peuplement et favoriser l'implantation et la croissance de la régénération. Les ouvertures peuvent se faire de façon uniforme ou par trouées, l'essentiel étant de maintenir une proportion importante de tiges marchandes susceptibles de survivre durant toute la phase de conversion (Schütz, 1997). Il est donc souvent plus facile d'initier la conversion dans un peuplement équiennne relativement jeune (Schütz, 1997; O'Hara, 2001). En forêt boréale, la conversion de structure s'accompagne souvent d'un changement de composition s'apparentant à la dynamique naturelle après feu, comme par exemple le passage d'un peuplement dominé par les espèces pionnières vers un peuplement dominé par le sapin ou l'épinette noire (Bouchard, 2008). Par comparaison, la conversion d'un peuplement inéquiennne (irrégulier) vers un peuplement équiennne (régulier) est une opération relativement simple, puisqu'elle consiste à récolter d'un coup toutes les tiges marchandes du peuplement. Les méthodes de régénération par CPRS, CPHRS ou CPPTM pourraient être décrites comme des coupes de conversion lorsqu'elles s'appliquent dans un peuplement irrégulier. La conversion d'un peuplement inéquiennne vers un peuplement équiennne est souvent perçue défavorablement, car elle peut produire des effets visuels et environnementaux négatifs. Cependant, de telles conversions pourraient s'avérer nécessaires dans un contexte où l'on cherche à reproduire l'effet à l'échelle du paysage de perturbations comme les feux (Bouchard, 2008).

2.4 Qualité du bois

2.4.1 Définition

La définition de la qualité du bois n'est pas tout à fait évidente, car elle peut être définie et perçue différemment par les forestiers, les manufacturiers et les consommateurs. La qualité du bois peut être définie d'une manière utile et succincte comme toutes les caractéristiques et les propriétés du bois qui affectent la valeur de la filière et la durabilité

des produits (Zhang, 1997). Une autre définition de la qualité du bois est donnée par Briggs et Smith (1986) : *"la qualité du bois est une mesure de son aptitude à satisfaire aux exigences liées à l'utilisation à laquelle il est destiné"*.

D'après les définitions de la qualité du bois ci-dessus, chaque caractéristique du bois peut contribuer à sa qualité en fonction de son utilisation finale. C'est-à-dire, selon l'usage final du bois, certaines de ses caractéristiques seront privilégiées et considérées en tant qu'indicatifs de sa qualité. Dans le domaine de la construction civile, les caractéristiques clés du bois de sciage sont la taille, les propriétés mécaniques et la stabilité dimensionnelle pendant le séchage. Les propriétés de la rigidité à la flexion (module d'élasticité, MOE) et de la résistance à la flexion (module de rupture, MOR) sont critiques pour la performance et la sécurité du bois utilisé dans des bâtiments (Holland et Reynolds, 2005). Pour la menuiserie, les propriétés mécaniques ne sont pas cruciales, mais plutôt l'apparence et les caractéristiques du travail du bois (facilité à planer, à clouer, à coller et habilité à recevoir des revêtements). Le classement d'aspect visuel pour la menuiserie prend en compte la quantité et la taille des nœuds (si les nœuds sont vifs ou morts) et la présence de scissions, de fentes, de fissures et de décoloration (BSI, 1996).

Zobel et Van Buijtenen (1989) mentionnent qu'une façon d'évaluer la qualité du bois des arbres debout utilisée par les chercheurs se trouve dans les relations statistiques entre les indicatifs intrinsèques et extrinsèques, les facteurs écologiques et environnementaux, et les attributs de la qualité du bois. D'après les auteurs, ces études constituent la base de plusieurs prescriptions sylvicoles conçues pour optimiser la productivité (taux de croissance) et les caractéristiques et les propriétés de la fibre du bois. Dickson et Walker (1997) affirment qu'il y en a des critères indicatifs de la qualité du bois à une utilisation donnée qui sont strictement liés à la structure du matériau, à savoir : l'anatomie et la composition chimique. Les derniers auteurs mentionnent aussi que certaines caractéristiques du bois sont héréditaires, mais qui peuvent être contrôlées à travers le contrôle de la croissance.

2.4.2 Paramètres intrinsèques de la qualité du bois

2.4.2.1 Masse volumique

La masse volumique basale du bois (kg/m^3) est définie comme étant le rapport entre la masse anhydre et le volume saturé. Elle est déterminée par l'épaisseur des parois cellulaires, la taille et la forme des trachéides et le rapport entre bois d'été et bois de printemps (Swenson et Enquist, 2007 et Zobel et Van Buijtenen, 1989).

La masse volumique est une caractéristique technologique de base du matériau, étant considérée comme un paramètre très indicatif de la qualité du bois (Jyske, 2008 et Koubaa *et al.*, 2002). En effet, à partir de la masse volumique du bois d'une essence donnée on peut réaliser une prédiction d'autres caractéristiques technologiques de ce bois tels que la rigidité, la résistance, la stabilité dimensionnelle, le potentiel de rendement en pâte, la qualité papetière (Downes et Drew, 2008; Koubaa *et al.*, 2002; Jozsa et Middleton, 1997; Lindström, 1996a,b,c et Zobel et Van Buijtenen, 1989) ainsi que certaines caractéristiques de mise en œuvre (durabilité naturelle, imprégnabilité etc). La masse volumique est la variable physique explicative majeure de la variabilité totale des constantes élastiques et sert autant qu'indicateur de base des propriétés mécaniques du bois (Yang, 1997 et Barbour *et al.*, 1996).

La masse volumique du bois est une propriété qui varie inter- et intra-arbres. Elle est variable selon l'âge (Erickson et Harrison 1974; Haygreen *et al.*, 2007 et DeBell *et al.* 2002), l'espèce, 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 le type de bois (juvénile, mature, normal, réaction) (Panshin et de Zeeuw 1980; Baas *et al.*, 2004; Hacke *et al.*, 2001; Roderick et Berry, 2001; Gartner, 2006 et Swenson et Enquist, 2007). La masse volumique est strictement liée à l'anatomie du bois (Antal et Micko, 1994; Ivkovich *et al.*, 2002, Erickson et Harrison 1974; Jozsa et Middleton 1997; Mäkinen *et al.*, 2002a; Macdonald et Hubert 2002; Barbour *et al.*, 2003; Jaakkola *et al.*, 2005a et Zhu *et al.*, 2007), où il y a une relation entre l'épaisseur de la paroi cellulaire et le pourcentage de bois final (Kort, 1991). En effet, l'épaisseur de la paroi cellulaire (Nicholls, 1984) et la proportion de bois final (constitué de petites cellules aux parois plus épaisses) (Raven, 2000) seraient responsables d'une augmentation de la masse volumique du bois. La densité du bois est également fortement

influencée par le taux de croissance, certains auteurs (Zhang, 1998 et Wang *et al.*, 2002) ont observé qu'une augmentation de la croissance était due à une augmentation de la largeur du bois initial, ce qui réduirait la masse volumique moyenne de cernes de croissance.

2.4.2.2 *Périmètre et masse linéique des cellules*

Le périmètre des cellules a une grande influence sur le transport d'eau à travers le bois et le support mécanique et est fortement corrélé à la densité du bois (Dean et Long, 1986; Gartner, 2006; Bass *et al.*, 2004). D'ailleurs, les fibres avec un périmètre large et à parois minces collapsent plus rapidement et donc produisent un papier plus dense, plus fort et plus lisse (Wang et Aitken, 2001 et Zobel et Van Buijtenen, 1989).

La masse linéique des cellules est définie comme le rapport entre la masse et la longueur de la cellule (Gartner, 2006). Ce paramètre est un fort déterminant de la résistance et de la rigidité du papier, où l'obtention d'un papier de qualité est associée à une faible masse linéique des cellules. De plus, une réduction de la masse linéique est corrélée à une faible densité du bois et une amélioration de la qualité du papier fait à partir de cellules à faible masse linéique est aux dépens du rendement en pâte (Via *et al.*, 2004).

2.4.2.3 *Angle des microfibrilles*

L'angle des microfibrilles (AMF) est défini comme l'angle qui existe entre l'axe des cellules du bois et la direction moyenne de l'orientation des cristallites de cellulose (Wimmer *et al.*, 2002) et est largement influencé par la couche S_2 de la paroi cellulaire secondaire (Donaldson, 2008 et Gierlinger et Schwanninger, 2006). L'AMF varie normalement de 5 à 20 ° dans les anneaux de croissance extérieurs. La valeur de ce paramètre est plus élevée en allant vers la moelle et dans le bois de réaction qui est formé lorsque l'arbre subit une contrainte mécanique imposée par le vent et la gravité (Donaldson, 2008; Huang *et al.*, 2003). Le AMF influe directement sur le retrait (Burdon *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2003) et sur le module de l'élasticité du bois (Evans *et al.*, 2001).

Chez les conifères, l'AMF varie aussi bien radialement que verticalement (Donaldson, 2008; Gartner, 2006). Les valeurs de l'AMF sont plus élevées dans le bois

juvénile et le bois initial que dans le bois mature et le bois final (Donaldson, 2008 et Wimmer *et al.*, 2002). Wimmer *et al.*, (2002) ont trouvé que des périodes de croissance plus longues et des taux de croissance supérieurs résultent en un AMF plus élevé.

2.4.2.4 *Propriétés des trachéides*

Les trachéides sont des cellules simples qui forment le bois chez les résineux. Elles servent à la fois à donner sa résistance au bois (tissus de soutien, bois final) et à conduire l'eau et les liquides nutritifs (tissus de conduction, bois de initial) (Haygreen *et al.*, 2007). Chez les résineux, les trachéides longitudinales assurent à la fois les fonctions de conduction de l'eau et des liquides nutritifs (bois de printemps, tissus de conduction) et de soutien mécanique (bois d'été, tissus de soutien). Ils représentent aussi presque la totalité de la masse du bois (Clinovschi, 1997 et Haygreen *et al.*, 2007).

Vahey *et al.* (2007) affirment que la morphologie de la fibre du bois affecte directement les propriétés mécaniques du matériau et le traitement de bois d'œuvre et du papier. En effet, la longueur des trachéides est un indicateur important de la qualité du bois puisque les fibres longues permettent de produire le papier fort et de meilleure qualité. L'épinette noire, caractérisée par une croissance lente, donne une fibre de bois de bonne qualité pour la fabrication des pâtes et papiers (Burns and Honkala 1990).

Cela est dû aux étroites relations entre ce paramètre et les propriétés des produits à base de fibres, notamment le papier, le carton et les panneaux de fibres (Law et Valade, 1997). Les fibres longues, conjointement avec une faible masse linéique des cellules, mènent une meilleure liaison due à l'augmentation du nombre de contacts entre les cellules (Via *et al.*, 2004).

La longueur des fibres influence à la fois la résistance et la rigidité du papier et du bois (Via *et al.*, 2004). C'est un paramètre important puisque les fibres longues confèrent une plus grande résistance contre les déformations des poutres en bois, Pourtant, elles sont considérées de moindres importances que l'épaisseur des parois et la densité du bois (Zobel et Van Buijtenen, 1989). Chez les conifères, la longueur des trachéides est l'un de paramètres de détermination du bois juvénile dans la tige (Josza et Middleton, 1997). Ce type de bois possède des propriétés différentes par rapport au bois mature. Cette différence

se manifeste par des trachéides courtes (quatre fois moins longues que les trachéides du bois mature). Les trachéides sont plus courtes près de la moelle et leur longueur augmente progressivement vers l'écorce (Makinen et al 2008). Cette différence de la longueur des trachéides témoigne de la transition graduelle du bois juvénile au bois mature (Panshin et de Zeeuw 1980). D'après Shengzuo *et al.* (2004), la longueur des fibres peut être corrélée à l'angle de microfibrilles, où des angles faibles sont (microfibrilles plus alignées avec l'axe longitudinal des cellules) associés aux fibres de grande longueur et cette tendance d'élongation de fibres peut être trouvée de la moelle à l'écorce.

La longueur et le diamètre (largeur) des fibres présentent un accroissement rapide et non linéaire durant les premières années de la croissance radiale, puis une croissance graduelle dans le bois mature jusqu'à atteindre une taille maximale contrôlée génétiquement (Panshin et De Zeeuw, 1980 et Zobel et Van Buijtenen, 1989). Cette différence d'accroissement représente généralement la transition entre le bois juvénile et le bois mature (Dadswell et Wardrop, 1960; Panshin et De Zeeuw, 1980; Voorhies et Jameson, 1969 et Stamm, 1970). Les propriétés du bois et des produits à base de bois sont donc associées et reliées à l'anatomie du bois (Alteyrac, 2005; Dinwoodie, 1965 et Zobel et Van Buijtenen, 1989).

2.4.3 Paramètres extrinsèques de la qualité du bois

La qualité du bois est aussi affectée par certains paramètres extrinsèques. Les caractéristiques de la fibre de bois varient en réponse aux caractéristiques des arbres individuels (l'âge, l'architecture du houppier, le taux de croissance, la minceur et la conicité des troncs) et aux caractéristiques du site (le climat, la topographie, la structure de l'arbre et l'historique de perturbations) (Burdon et al., 2004; Zobel et Van Buijtenen, 1989 et Lindström, 1997). D'après Jack et Long (1996) et Oliver et Larson (1996), à l'échelle de l'arbre, l'âge, le taux de croissance, la taille et la forme du houppier, et la ramification sont utilisés en tant qu'indicatifs de la qualité du bois.

Avec la croissance, les caractéristiques des fibres de bois changent en réponse à la maturation des tissus ligneux. Plusieurs études (Lindström, 1996a,b,c; Duchesne *et al.*, 1997) ont examiné les relations entre la densité du bois et le statut social de l'arbre. Ils ont

observé que les arbres supprimés et intermédiaires sont caractérisés par des densités du bois supérieures que celles des classes d'arbres co-dominant et dominant. Or, avec la croissance, l'occlusion des vieilles branches par de nouvelles affecte la photosynthèse, la formation et la mortalité des branches. La compétition entre arbres et les contraintes mécaniques (vents et contraintes mécaniques exercées par les arbres voisins) influencent la mortalité et la formation des branches, et par conséquent, la production de nœuds et les proportions de nœuds morts. Cette augmentation du nombre de nœuds engendre d'importants changements sur la qualité du bois se produiront (Kint *et al.*, 2010). D'après Hein *et al.* (2008), les proportions les plus élevées d'aubier se trouvent dans le bois des jeunes arbres et vers le sommet des arbres.

Le taux de croissance ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{ans}$) est un paramètre qui exerce un fort impact sur la qualité du bois. Des taux de croissance élevés sont indésirables pour l'optimisation du rendement de volume et sont accompagnés par des proportions élevées de bois initial et, par conséquent, une réduction de la densité du bois, ce qui affecte la qualité du bois (Downes et Drew, 2008). Les derniers auteurs mentionnent aussi que le taux de croissance décline après un certain âge et avec l'augmentation de la taille de l'arbre.

La forme de la couronne, déterminée par la localisation et le nombre de branches le long de la tige aussi bien que la masse totale des branches, représente un indicatif du nombre de nœuds présents dans le bois et donc l'usage potentiel de ce bois pour plusieurs produits en bois (Kantola *et al.*, 2008). Les caractéristiques de la couronne sont importantes pour la modélisation de la densité du bois et d'autres paramètres de qualité du matériau (Lindström, 1996a,b,c; 1997). En effet, de fortes relations entre la section des branches vivantes et l'aubier (Hein *et al.*, 2008) et une corrélation positive entre la densité du bois et la largeur de la couronne ont été trouvées pour une gamme d'espèces et conditions des sites (Janse-Ten Klooster *et al.*, 2007). Finalement, la corrélation entre la densité du bois et l'architecture de la couronne est généralement expliquée par l'augmentation de l'activité cambiale et l'espacement plus large des anneaux produits par des couronnes larges et vivantes (Janse-Ten Klooster *et al.*, 2007 et King *et al.*, 2006).

2.4.4 Relations entre la qualité du bois et la croissance de l'arbre

Les conditions de croissance ont une influence sur de nombreuses caractéristiques anatomiques du bois (Makinen et al., 2002b, Lu et al., 1997).

La relation entre la croissance de l'arbre et les caractéristiques de la qualité du tronc et l'espacement initial de l'épinette noire a été quantifiée par Zhang et Chauret (2000). Les auteurs ont trouvé que l'espacement initial a eu un effet direct sur les caractéristiques de qualité de l'arbre et du tronc des individus. Lors d'un changement de l'espacement initial de 1,8 x 1,8 m à 2,7 x 2,7 m, les caractéristiques suivantes ont connu une augmentation: le diamètre à hauteur de poitrine, la taille de la cime, le volume et le défilement de l'arbre, la taille des branches et la longueur des billes sans nœuds (billes claires). Par contre, entre les trois espacements initiaux de 2,2 x 2,2 m, 2 x 2 m et 1,8 x 1,8 m, il n'y a pas eu de modifications significatives dans les caractéristiques des troncs. Cela veut dire que l'épinette noire pourrait disposer d'une faible capacité de répondre à l'éclaircie sauf à des valeurs d'espacement extrême.

La largeur pourrait constituer le meilleur indicateur de masse volumique par rapport à la taille pour l'épinette noire. Concernant la croissance de l'arbre, la qualité de la tige et les coûts d'établissement initiaux, un espacement de 2,2 x 2,2 m pourrait être optimal pour la production de bois. Des espacements larges (comme de 2,7 x 2,7 m) peuvent entraîner une baisse de la qualité de la tige, en ayant par conséquent des répercussions importantes sur la qualité du produit. D'autres études ont montré que l'épinette noire a répondu positivement à différents essais d'espacement (Karsh et al., 1994) et qu'il y a un effet positif de l'éclaircissement sur la croissance diamétrale (Doucet et Boily, 1996).

2.5 Impacts des interventions sylvicoles sur la qualité et les propriétés du bois

2.5.1 Croissance radiale

Les coupes partielles, ont pour but d'augmenter la croissance et la productivité des arbres résiduels à travers d'une réduction de la concurrence entre les individus rémanents du peuplement. En effet, l'éclaircie commerciale réduit la compétition entre les arbres Sheedy et Bertrand (1997), et augmentent la disponibilité de la lumière, de l'eau et des nutriments des

peuplements (Aussenac *et al.*, 1995). En vertu de l'augmentation de la quantité de lumière, la croissance des arbres (Mayor et Rodà, 1993) et des racines augmentent (Aussenac *et al.*, 1995), dues à l'augmentation de l'activité photosynthétique (Day et Nanang, 1997) et de la pénétration de la lumière jusqu'au sol (Aussenac *et al.*, 1995).

Plusieurs chercheurs ont déjà étudié les effets des traitements sylvicoles sur la croissance des tiges résiduelles de différentes espèces, dont le pin sylvestre (Peltola *et al.*, 2002), l'épinette de Norvège (Jaakkola *et al.*, 2006, 2005a) et le sapin baumier (Liu *et al.*, 2007). De manière générale, les résultats obtenus par les auteurs ont indiqué qu'une réduction de la densité de peuplement à la suite d'une intervention sylvicole entraîne une augmentation de la croissance des tiges résiduelles.

Lorsque la densité de peuplement diminue, le diamètre du tronc, la taille du houppier et les diamètres des branches augmentent (Zhang et Chauret, 2001). La densité de peuplement a aussi une forte influence sur les caractéristiques anatomiques du bois (longueur, épaisseur et diamètre des fibres et des vaisseaux) (Kasir, 1990), alors que les peuplements moins denses présentent des trachéides plus courtes (Yang et Hazenberg, 1994). Wang *et al.* (2000) et Zahner *et al.* (1989) mentionnent que la densité du peuplement a une forte influence sur la largeur et la surface des cernes qui diminuent lorsque la densité de peuplement augmente.

2.5.2 Masse volumique du bois

Puisque les propriétés du bois et des trachéides sont influencées par le taux de croissance (Lindström, 1996), les interventions sylvicoles pourraient affecter la qualité et les propriétés du bois (Kang *et al.*, 2004). En effet, des changements de l'espacement entre les arbres des peuplements sont produits lors d'un traitement sylvicole, ce qui pourrait avoir des effets négatifs sur l'anatomie (Alteyrac *et al.*, 2005), les propriétés de la fibre (Jaakkola *et al.*, 2005a), la masse volumique du bois (Mäkinen *et al.*, 2002a; Zhang et Chauret, 2001; Johansson, 1993) et le diamètre des nœuds (Mäkinen et Hein, 2006) et par conséquent, réduire les propriétés mécaniques du bois.

Jaakkola *et al.* (2005a) ont étudié l'impact de l'espacement entre les arbres à la suite d'un traitement d'éclaircie commerciale sur la densité du bois chez l'épinette de Norvège

(*Picea abies* (L.)). Ils ont trouvé une diminution de la densité moyenne du cerne et de la densité du bois final après traitement d'éclaircie. Par contre, aucune modification significative de la densité du bois initial n'a été observée. La présence d'un effet négatif à court terme de l'éclaircie commerciale sur la densité du bois chez le sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) a été vérifiée par Jozsa et Brix (1989). Zhang et Chauret (2001) ont noté que la densité du bois est réduite lorsque la densité de peuplement est inférieure à 1 400 tiges/ha. Larson (1962) et Mäkinen *et al.* (2007) ont déjà rapporté une diminution de la densité du bois à la suite d'une éclaircie commerciale tandis que les résultats obtenus par Valinger *et al.*, (2000) et Mörling (2002) ne rapportent aucune diminution significative de la densité du bois lors d'une augmentation de la croissance radiale en réponse à ce même traitement. Dans le même sens, aucun effet du traitement d'éclaircie pré commerciale sur la densité du bois de l'épinette rouge (*Picea rubens* (Sarg.)) n'a été constaté par Barbour *et al.* (1992). D'autre part, l'éclaircie pré commerciale (Legris et Couture, 1999) et l'éclaircie commerciale (Bowyer *et al.* 2007) peuvent avoir des effets négatifs sur l'augmentation de la présence et de la taille des nœuds.

2.5.3 Propriétés mécaniques

L'éclaircie commerciale peut avoir des effets négatifs sur la présence et la taille des nœuds, la surface de bois d'aubier ou encore sur les propriétés mécaniques du bois (Bowyer *et al.*, 2007 et Zubizarreta Gerendiain *et al.*, 2007). Effectivement, chez plusieurs espèces de conifères une augmentation de l'accroissement en volume par tige suite à une éclaircie commerciale est souvent associée à une diminution des propriétés mécaniques du bois telles que l'élasticité et la résistance du bois (Zhang, 1995; Jozsa et Middleton, 1994; Bowyer *et al.*, 2007). Kellison et Pearson (1985) et Moore *et al.* (2009) ont démontré qu'une baisse de la masse volumique du bois peut avoir un effet négatif sur l'élasticité et la résistance du bois chez plusieurs espèces de conifères. Cette baisse de la masse volumique est due à l'augmentation de la proportion de bois juvénile dans la tige due à la production plus élevées de branches vivantes après l'éclaircie (Zhang et Koubaa, 2009). De plus, si la cime est ample et qu'elle occupe une portion importante sur la tige, les proportions de bois d'aubier (Yang et Hazenberg, 1992) et de bois initial seront également plus importantes, produisant ainsi un

bois de faible masse volumique (Koubaa *et al.*, 2000). Gagné *et al.* (2011) ont trouvé que l'éclaircie commerciale a eu un effet significatif sur l'accroissement en volume par tige, mais n'a pas eu pour conséquence de diminuer la masse volumique, le module d'élasticité ni le module de rupture de l'épinette blanche (*Picea glauca*).

Middleton *et al.* (1995) ont trouvé chez le pin tordu latifolié (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm. Dougl. ex Loudune) diminution du MOE et du MOR lorsque le diamètre des arbres à hauteur de poitrine augmentait et que les arbres provenant de la classe de densité de peuplement de l'ordre de 1 100 arbres/ha procuraient le meilleur classement pour le bois de dimension.

2.5.4 Propriétés des trachéides

Les résultats concernant les impacts de l'augmentation de la croissance des arbres due aux traitements des coupes partielles sur la morphologie des trachéides sont contradictoires et varie d'une espèce à l'autre. Greyer et Gilmore (1965) ont observé que les trachéides dans le bois juvénile et le bois mature de pin taeda (*Pinus taeda* (L.)) deviennent plus longues avec l'augmentation des espacements. D'ailleurs, Dutilleul *et al.* (1998) et Mäkinen *et al.* (2002b) ont observé qu'une augmentation du taux de croissance affecte les paramètres des fibres, où il y a une augmentation de l'aire du lumen ou bien une diminution de l'épaisseur des parois cellulaires. Toutefois, les trachéides sont devenues plus courtes avec l'élargissement de la croissance des cernes pour les bois de pin d'Elliott (*Pinus elliotii* (Engelm.)) (Youngberg *et al.*, 1963) et de pin taeda (Posey, 1965). De plus, les auteurs ont remarqué que les trachéides les plus courtes appartenaient au peuplement plus espacé (3,6 x 3,6 m, environ 770 arbres/ha). D'après Fleming (2005), des trachéides plus longues et de meilleure qualité semblent être trouvées dans des peuplements naturels. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre la longueur des trachéides du bois de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* (L.)) (Grigal et Sucoff, 1966) et de l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière) (Ward et Gardiner, 1976) par rapport à l'augmentation de l'intensité des éclaircies. Des études sur l'épinette de Norvège ont conclu que les intensités d'éclaircies appliquées dans les pratiques sylvicoles en Finlande avaient une très faible incidence sur les dimensions des fibres avec une faible diminution de la longueur des trachéides dans le cas d'une éclaircie

à forte intensité par rapport à celles plus faibles (Jaakkola *et al.*, 2005a). Jyske (2008) a trouvé que l'éclaircie commerciale pratiquée en Finlande a été efficace pour améliorer la croissance radiale de l'épinette de Norvège, mais les effets de ce traitement sylvicole sur les propriétés des trachéides ont faible et sans applications pratiques.

2.5.5 Attributs de la qualité du bois de l'épinette noire

L'impact des traitements sylvicoles sur les attributs de la qualité du bois de l'épinette noire a été étudié par plusieurs auteurs (Ourais, 2012; Vincent *et al.*, 2009; Alteyrac *et al.*, 2005; Fleming *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2002; Zhang et Chauret, 2001, 2000; Zhang *et al.*, 1996). D'une manière générale, une réduction de la concurrence entre les tiges résiduelles due à un traitement sylvicole engendre une augmentation de leur croissance radiale. Il est généralement admis qu'un taux de croissance rapide est associé à une diminution de la masse volumique du bois (Zhang *et al.*, 1996). Toutefois, chez l'épinette noire, la relation masse volumique et largeur de cerne est controversée et semble hautement dépendre de l'âge des arbres (Koubaa *et al.* 2000; Burdon *et al.* 2004). La relation est significative chez les arbres jeunes mais absente chez les arbres adultes et matures (Zhang *et al.*, 1996).

Pamerleau-Couture (2010) a étudié les effets de trois interventions sylvicoles (éclaircie commerciale, coupe avec protection de la régénération et des sols et coupe avec protection des petites tiges marchandes) sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire en forêt boréale. Les trois interventions furent efficaces pour augmenter la croissance des tiges résiduelles sans nuire pour autant à la qualité du bois. Laplante (2009) a étudié l'effet de l'éclaircie pré commerciale et de l'éclaircie commerciale sur la qualité du bois de l'épinette noire et a trouvé que ces deux traitements ne modifient pas profondément les propriétés mécaniques du bois.

Chez l'épinette noire, 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).

Yang et Hazenberg (1994) ont étudié l'effet de l'espacement initial sur les dimensions des trachéides de l'épinette noire issues de plantations. Ils ont trouvé que les trachéides étaient plus courtes dans les intensités d'espacements plus élevées et que les fibres des

individus issus d'un peuplement naturel étaient plus longues que celles des individus issus des plantations. Toutefois, les trachéides sont devenues plus courtes avec l'élargissement de la croissance des cernes pour les bois d'épinette noire (Klem, 1968). Les effets de l'éclaircie commerciale sur la longueur et la largeur des trachéides du bois d'épinette noire ont été étudiés par Ourais (2012). L'auteure a trouvé que l'éclaircie commerciale n'a eu aucun effet sur les dimensions des trachéides.

Tableau 2.1 Synthèse des effets des traitements sylvicoles sur la régénération et les attributs de la qualité du bois

Traitement	Régénération	Attributs de la qualité du bois				
		Nodosité	Croissance annuelle	Masse volumique	Propriétés des fibres	Propriétés mécaniques
Densité de peuplement		densité faible	densité faible		densité faible	densité faible
		négatif ¹¹	positif ^{9,12,24,42,43,44,45,46,47,48,49}	densité faible négatif ^{9,15,50,51}	négatif ^{13,14,58,59,60}	négatif ^{9,11,32,33,34}
Espacement initial			espacement faible positif ^{5,13,17}	densité faible négatif ¹⁶	espacement grand négatif ^{13,60}	espacement grand négatif ^{33,34}
Élagage		positif ¹⁸			positif ⁵⁵	négatif ³²
Coupes de jardinage	positif ^{4,5,6,19}		positif ³			
Coupes progressives	positif ^{6,7,21,22}					
Coupes progressives irrégulière	positif ^{6,10,19,20}					
Éclaircie pré commerciale	positif ²¹	négatif ^{31,35,37,54}	positif ^{5,8,9,11,19,23,24,41}	négatif ^{9,25,31} neutre ^{28,29}	négatif ³⁰	neutre ^{35,41}
Éclaircie commerciale	positif ²¹	négatif ^{31,37}	positif ^{1,2,24,41,42,43,44,45,46,47,48}	négatif ^{9,25,26,27,50,51,52,54} neutre ^{28,29,41,43,45,49,50,53,}	négatif ^{30,56,57,58,59,60} neutre ^{43,52,61,62,63,64}	négatif ^{31,37,38,39} neutre ^{36,40,41}

Références

¹ Manuel de foresterie, 2003; ² Zhang, 2001; ³ Bédard et Brassard, 2002; ⁴ Pineau et Lessard, 2003; ⁵ Doucet et Boily, 1976; ⁶ Cerfo, 2007; ⁷ Lussier, 2012; ⁸ Bédard *et al.*, 1998; ⁹ Zhang et Chaurret, 2001; ¹⁰ Cerfo, 2011; ¹¹ Zhang *et al.*, 2012; ¹² Alazar, 1994; ¹³ Yang et Hazenberg, 1994; ¹⁴ Kair, 1990; ¹⁵ Johansson, 1993; ¹⁶ Cown, 1980; ¹⁷ Zavitskovski et Dawson, 1978; ¹⁸ Briggs, 1995; ¹⁹ Trottier *et al.*, 2011; ²⁰ Raymond *et al.*, 2010; ²¹ Lussier, 2012; ²² Van der Kelen et Lessard, 2004; ²³ Bédard *et al.*, 1998; ²⁴ Sandy, 2009; ²⁵ Jozsa et Brix, 1989; ²⁶ Larson, 1962; ²⁷ Mäkinen *et al.*, 2007; ²⁸ Valinger *et al.*, 2000; ²⁹ Mörling, 2002; ³⁰ Jozsa et Middleton, 1997; ³¹ Bowyer *et al.*, 2007; ³² Mäkinen et Hein, 2006; ³³ Middleton *et al.*, 1995; ³⁴ Clark *et al.*, 1994; ³⁵ Laliberté, 2010; ³⁶ Lin *et al.*, 2006; ³⁷ Zubizarreta Gerendia *et al.*, 2007; ³⁸ Jozsa et Middleton, 1994; ³⁹ Zhang, 1995; ⁴⁰ Gagné *et al.*, 2011; ⁴¹ Laplante, 2009; ⁴² Mayor et Rodà, 1993; ⁴³ Ourais, 2012; ⁴⁴ Vincent, 2011; ⁴⁵ Pamerleau-Couture, 2010; ⁴⁶ Pape, 1999; ⁴⁷ Peltola *et al.*, 2002; ⁴⁸ Jaakkola *et al.*, 2006, 2005b; ⁴⁹ Alteyrac, 2005; ⁵⁰ Alteyrac *et al.*, 2005; ⁵¹ Mäkinen *et al.*, 2002a; ⁵² Jaakkola *et al.*, 2005a; ⁵³ Barbour *et al.*, 1992; ⁵⁴ Legris et Couture, 1999; ⁵⁵ Greyer et Gilmore, 1965; ⁵⁶ Dutilleul *et al.*, 1998; ⁵⁷ Mäkinen *et al.*, 2002b; ⁵⁸ Youngberg *et al.*, 1963; ⁵⁹ Posey, 1965; ⁶⁰ Klem, 1968; ⁶¹ Grigal et Sucoff, 1966; ⁶² Ward et Gardiner, 1976; ⁶³ Jyske, 2008.

Tableau 1.2 Synthèse des effets des traitements sylvicoles sur les attributs de la qualité du bois d'épinette noire examinés par cette étude

Traitements et aspects sylvicoles	Attributs de la qualité du bois d'épinette noire		
	Croissance radiale	Masse volumique	Dimensions des trachéides
Densité de peuplement	si densité faible positif ^{7,8,9,10,11,12}	si densité faible négatif ^{2,11,12}	si densité faible = négatif ^{3,13}
Espacement initial	si espacement faible positif ^{1,3,4}		si espacement faible négatif ^{3,13}
Éclaircie pré commerciale	positif ^{5,6}	négatif ^{2,5}	
		neutre ⁶	
Éclaircie commerciale	positif ^{6,7,8,9,10}	négatif ²	négatif ⁶⁰
		neutre ^{6,7,11,12}	neutre ⁷
Références	¹ Doucet et Boily, 1976; ² Zhang et Chaurret, 2001; ³ Yang et Hazenberg, 1994; ⁴ Zavitkovski et Dawson, 1978; ⁵ Laliberté, 2010; ⁶ Laplante, 2009; ⁷ Ourais, 2012; ⁸ Vincent, 2011; ⁹ Pamerleau-Couture, 2010; ¹⁰ Pape, 1999; ¹¹ Alteyrac, 2005; ¹² Alteyrac <i>et al.</i> , 2005; ¹³ Klem, 1968		

2.5.6 Objectifs spécifiques et hypothèses d'étude

La présente étude a comme objectifs spécifiques d'évaluer l'effet de 'intensité de prélèvement de la surface terrière originale (0-50%, 50-75% et 75-100%), sur la morphologie de la fibre (longueur et largeur des trachéides), la croissance annuelle (largeurs du cerne, du bois initial et du bois final) et la masse volumique du bois (cerne, bois initial et bois final). Les mesures ont été déterminées sur 4 classes de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) à différentes hauteurs dans l'arbre et à un intervalle de temps déterminé (2 années avant et 5 années après l'année d'intervention) Les variations intra-arbre de ces propriétés avant le traitement ont été également étudiées afin d'établir leurs patrons de variations radiales et longitudinales.

En se basant sur des études antérieures sur les effets des interventions sylvicoles, l'hypothèse sur laquelle repose cette étude stipule que les coupes partielles entraînent une réduction de la concurrence entre les tiges résiduelles ce qui améliore leur croissance. Cependant, cela pourrait avoir une incidence négative sur la qualité du bois. Les hypothèses testées sont :

- i. Les variations intra-arbre sont plus importantes dans le bois juvénile que dans le bois mature et les variations radiales sont plus importantes que les longitudinales;
- ii. La croissance radiale (largeurs du cerne, du bois initial et du bois final) ainsi que la largeur des trachéides augmentent à la suite des coupes partielles, cependant, la masse volumique est réduite ainsi que la longueur des trachéides;
- iii. Les variations intra-arbre sont plus importantes que les variations dues aux coupes partielles.

CHAPITRE III

MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 Aire d'étude

La présente étude a été réalisée dans le réseau de coupes partielles mis en place en 1998 dans la ceinture d'argile du Québec sous le domaine bioclimatique de la pessière à mousse (Fenton *et al.*, 2013) (Figure 2.1). Les peuplements cibles d'études sont purs dominés par l'épinette noire et de structure irrégulière. Le climat de cette région est continental, avec une température annuelle moyenne de 0.7 °C. Les précipitations annuelles de 889 mm avec une moyenne mensuelle maximale de 101,9 mm au mois de septembre (Environnement Canada, 2004). La topographie est relativement plane et l'altitude d'environ 300 à 350 m et le sol est de type argileux lourd mal drainé avec une couche de matière organique de 10 à 20 cm d'épaisseur.

3.2 Dispositif expérimental

Il s'agit d'un dispositif expérimental composé de 3 blocs expérimentaux regroupant chacun des placettes permanentes établies selon les normes du Ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRNQ, 2000) qui sont l'objet de recherche et d'étude. Trois blocs ont été sélectionnés aléatoirement: Cramolet, Villars et Muskuchii dont les caractéristiques se trouvent dans le Tableau 3.2. (Figure 3.1). Chaque bloc comporte trois parcelles d'une superficie minimale de 25 hectares. Les placettes à l'intérieur de parcelles sont un cercle dont le rayon horizontal est de 11,28 m, son aire est de 400 m² ou 1/25 d'hectare La première parcelle était traitée avec une coupe à faible rétention (coupe avec protection de la régénération et des sols ou CPRS), la deuxième, une coupe partielle et la troisième ne subissait aucune récolte et servait de témoin (Fenton *et al.*, 2010). L'évaluation de l'impact

des coupes partielles sur la qualité du bois et de la fibre d'épinette noire a été faite sur 4 classes de diamètre à la hauteur de poitrine (DHP) (5 à 9 cm; 9,1 à 15 cm; 15,1 à 20 cm et \geq 20,1 cm) par chacun des traitements suivants : peuplement non traité (pas d'intervention sylvicole), traitement faible (coupes partielles avec une intensité de prélèvement de 0-50 % de la surface terrière originale), traitement modéré (coupes partielles avec une intensité de prélèvement de 50-75 % de la surface terrière originale) et traitement fort (coupes partielles avec une intensité de prélèvement de 75-100 % de la surface terrière originale).

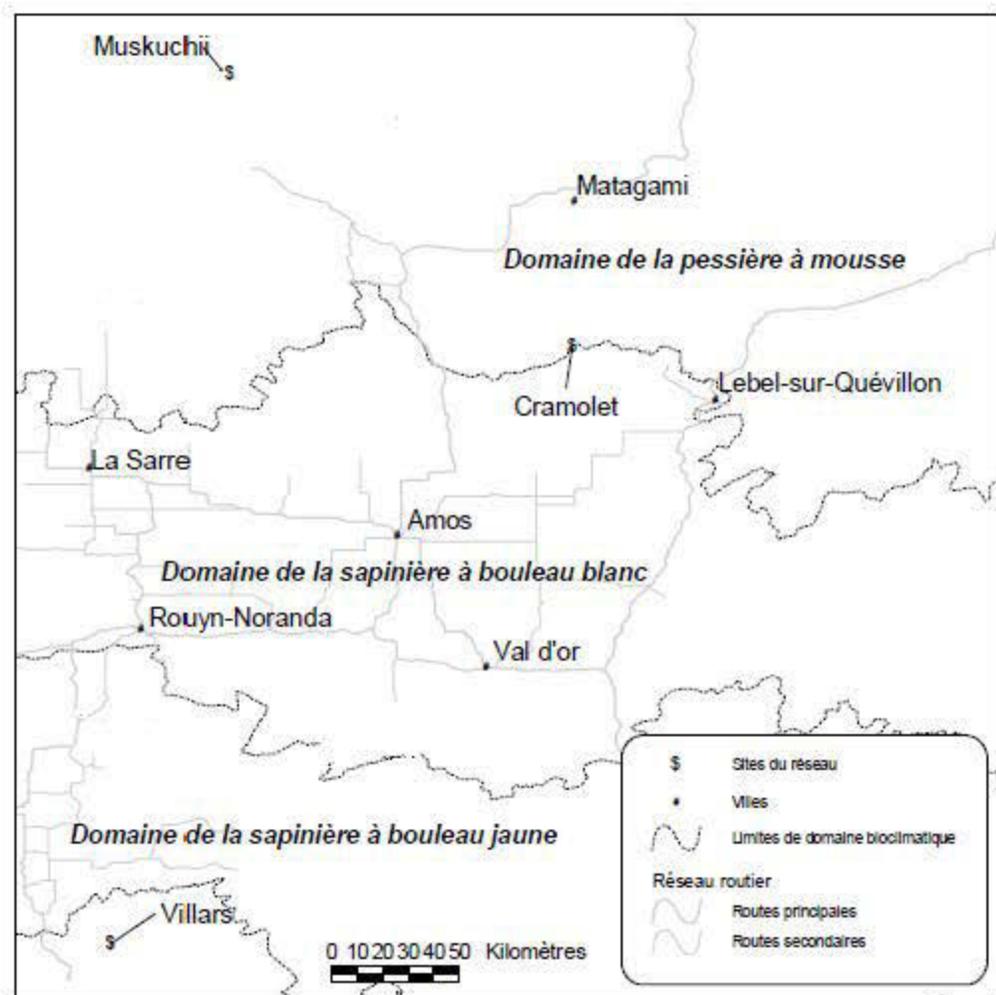


Figure 3.1 Carte de localisation des sites d'étude du réseau expérimental de coupes partielles (Fenton *et al.*, 2010)

Tableau 2.1 Caractéristiques des sites de l'étude

Caractéristiques	Sites		
	Cramolet	Villars	Muskuchii
Latitude/Longitude	48°N, 77°W	46°N, 79°W	50°N, 78°W
Relief topographique	Faible		Élevé
Âge des arbres ¹	99	95	93
DHP ¹	15,4	15,3	13,1
Surface terrière initiale (m ² /ha) ²	24,84	18,72	19,75
Nombres de placettes d'échantillonnage	3	8	10
Saison de traitement	Hiver 2007	Automne 2005	Été 1998/1999/2000
Saison de récolte	Automne 2012	Été 2011	Été 2011/Automne 2012
Traitement appliqué	Témoin et modéré	Faible et modéré	Faible, modéré et fort

¹ Moyenne de tous les individus échantillonnés dans les sites

² Moyenne des toutes les placettes utilisées

3.3 Échantillonnage

Un échantillonnage destructif a été entrepris à l'extérieur des placettes permanentes où 4 arbres par traitement par classe de diamètre (4 arbres x 4 classes de DHP x 4 traitements dispersés parmi les trois blocs = 64 arbres au total) ont été abattus puis des disques de bois de 10-12 cm en moyenne ont été extraits systématiquement à différentes hauteurs dans l'arbre, à savoir : 0,5 m; 1,3 m; 4 m; 8 m et 12 m (où le nombre de disques par arbre a varié en fonction de son diamètre et la hauteur de l'arbre) (Figure 3.2). Les disques de bois ont été préalablement séchés naturellement dans un entrepôt afin de réduire leur teneur en humidité puis séchés dans un séchoir conventionnel pendant 48 heures à $75 \pm 3^\circ\text{C}$ au laboratoire de biomatériaux de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) à La Sarre.

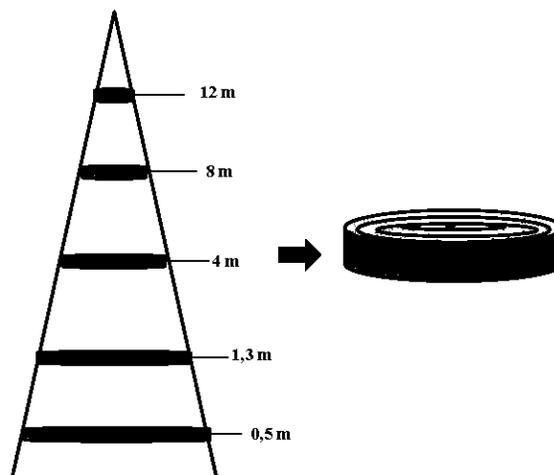


Figure 3.2 Schéma de l'échantillonnage des galettes de bois sur les arbres et de la production des échantillons pour les analyses

3.4 Analyses de laboratoire

3.4.1 Croissance annuelle et masse volumique

3.4.1.1 Préparation des échantillons pour l'analyse de la croissance annuelle et la masse volumique

La croissance et la masse volumique du bois ont été mesurées sur des sections de bois prélevées au centre des galettes dans le sens longitudinal des galettes à l'aide d'une scie circulaire. Ces échantillons contiennent l'écorce et la moelle (cœur) du bois de façon à mesurer toutes les années de croissance de l'arbre (Figure 3.3). Les dimensions de ces échantillons doivent respecter les dimensions requises pour l'analyse au densitomètre, à savoir une largeur maximale de 25 mm et une épaisseur comprise entre 1,6 et 2 mm. Avant d'être scannés au densitomètre, les échantillons doivent subir le traitement d'extraction. Ce traitement vise à enlever les extractibles du bois afin de que la densité mesurée soit celle du bois sans aucune interférence de ses extractibles. L'extraction est réalisée en suivant les étapes suivantes : l'immersion des échantillons dans un montage contenant un mélange de cyclohexane (C_6H_{12}) et d'alcool éthylique anhydre (C_2H_6) à une proportion de 2:1; réchauffement du mélange d'acide à une température de 85-95°C pendant 24 heures; rinçage des échantillons pour enlever l'excédent du mélange d'acide; remplacement du mélange

d'acide par de l'eau distillée dans le montage et immersion des échantillons; augmentation de la température à 85-90°C et traitement des échantillons dans l'eau distillée pendant 24 heures (cette étape est due afin d'éliminer la résine et les polysaccharides hydrosolubles (Grabner *et al.*, 2005)); rinçage et séchage des échantillons pendant environ 72 h à l'air libre. Il est à noter qu'un poids a été placé sur les échantillons afin d'éviter qu'ils se déforment lors du séchage.



Figure 3.3 Exemple d'un échantillon utilisé pour les analyses densitométriques dans le densitomètre *QTRS-01X Tree Scanner* (QMS)

3.4.1.2 Densitomètre à rayon X

La détermination de la croissance annuelle et de la masse volumique du bois a été faite à l'aide du densitomètre à rayon X modèle *QTRS-01X Tree Analyser* de *Quintek Measurement System, Inc. (QMS)* (Figure 3.4). Le principe de cet appareil se base sur l'atténuation d'un rayon X qui traverse l'échantillon avec une résolution linéaire de 0,02 mm. L'appareil est piloté par un logiciel dénommé *Tree Ring Analyser* qui permet de déterminer l'âge du peuplement à travers le calcul du nombre de cernes de la moelle vers l'écorce. À travers de la mesure de la largeur des cernes dans le bois initial et le bois final on peut connaître le taux de croissance de l'individu pendant une période de temps. Les cernes peuvent aussi nous fournir l'information sur la densité du bois et de chaque cerne. D'après Koubaa *et al.* (2002), la transition du bois initial au bois final peut être déterminée en décomposant le profil de densité individuelle (le point d'inflexion de la courbe).



Figure 3.4 Densitomètre *QTRS-01X Tree Analyser* de *Quintek Measurement System, Inc.* (QMS) (Source : *Quintek Measurement System, Inc.*)

3.4.1.3 Analyse de la croissance et de la densité du bois

Une fois l'échantillon extrait, il est positionné dans le chariot du densitomètre QMS qui permet de mesurer les composantes de croissance (largeurs du cerne, du bois initial et du bois final) et de densité du bois (cerne, bois initial et bois final) de la moelle à l'écorce (Koubaa *et al.*, 2000, 2003, 2005). Puisque la mesure de la densité du bois est faite par mesure de l'absorption des rayons laquelle va dépendre de l'épaisseur du matériau traversé par le rayon, les échantillons furent régulièrement mesurés avec un pied à coulisse afin d'assurer une épaisseur constante. Le logiciel MatlabTM a été utilisé pour modéliser les profils des données brutes de densité intra-cernes du bois afin de déterminer le point de transition de bois initial au bois final (le point d'inflexion de la courbe) selon la procédure décrite par Koubaa *et al* (2002).

3.4.2 Propriétés morphologiques de la fibre

3.4.2.1 Préparation des échantillons pour l'analyse de la qualité de la fibre

Pour les propriétés de la fibre, on a utilisé des échantillons similaires à ceux utilisés pour les analyses au densitomètre (Figure 3.3). À partir des planchettes, on a extrait les 2 cernes avant et 5 cernes après l'année de réalisation des coupes partielles pour les échantillons issus des coupes partielles. Pour les placettes du peuplement non traité, on a extrait les 7 derniers cernes dans le bois mature. Par la suite, on a procédé avec le traitement de macération, qui consiste à séparer les cellules du bois par dissolution de la lamelle

moyenne (Cloutier, 2005). La macération de chaque cerne individuel a été réalisée en suivant les étapes ci-dessous : déposition des échantillons dans des bouteilles de laboratoires individuelles contenant un mélange d'acide acétique (CH_3COOH) et de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à une proportion de 1 :1. Les bouteilles de laboratoires sont ensuite déposées dans un bain-marie à une température de 85-90°C durant 4-5 heures. Ce mélange étant un oxydant très puissant permettant la dissolution de la lignine et la séparation des fibres; rinçage des échantillons avec de l'eau distillée après les avoir enlevés du mélange oxydant; déplacement d'un échantillon à la fois dans un mélangeur de laboratoire sans couteau afin de désintégrer les fibres et ainsi obtenir une suspension en fibres prête à être analysée par l'analyseur de fibres.

3.4.2.2 Analyseur de la qualité de la fibre (FQA)

Les propriétés morphologiques des trachéides de l'épinette noire ont été mesurées avec l'analyseur de la qualité de la fibre *Kajaani FS300* de *Metso*[®] (Figure 3.5). Cet appareil permet de mesurer d'une façon rapide, automatique et précise la qualité de la fibre cellulosique. Grâce à sa haute résolution, cet appareil permet une évaluation de la longueur, de la largeur, de l'ondulation, des faux plis ainsi que la masse linéique des fibres ayant jusqu'à 10 mm.



Figure 3.5 Analyseur de fibres Kajaani FS300 de Metso[®]

3.4.2.3 *Analyse de la morphologie de la fibre*

La moyenne pondérée selon le poids de la longueur et de la largeur des fibres ont été estimées à l'aide de l'analyseur de la qualité des fibres. La longueur des fibres est exprimée selon l'équation suivante

$$L_{WW} = \frac{\sum n_i L_i^3}{\sum n_i L_i^2} \quad [3.1]$$

Cette équation est la plus utilisée puisqu'elle met plus de poids sur les fibres et minimise l'effet des particules fines et des parenchymes sur la détermination de la longueur moyenne des fibres.

Où, L_i est la longueur de la classe i et n_i est le nombre de fibres dans la classe L_i ;

3.5 Analyse des variations intra-arbre

Dans une première partie, les variations intra-arbre, radiale et longitudinale, ont été étudiées pour chacune des propriétés mesurées. L'analyse de la variation intra-arbre se base sur des observations des graphiques représentant la variation radiale de la moelle vers l'écorce de ces propriétés en fonction de l'âge cambial et de la hauteur de l'arbre. Les variations radiales de la masse volumique et de la largeur du cerne ont été étudiées au DHP de tous les arbres pour les cernes annuels, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 et 50 à partir de la moelle. Pour la longueur et la largeur des trachéides, seulement 12 arbres (3 par classe de DHP) ont été sélectionnés aléatoirement parmi les sites et les traitements. Les variations longitudinales de toutes les propriétés ont été étudiées aux hauteurs de 0,5 m, 1,3 m, 4 m, 8 m et 12 m pour les cernes annuels 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 et 50 à partir de la moelle.

3.5.1 *Effets des coupes partielles sur les propriétés étudiées*

Dans une deuxième partie, les données ont été soumises à une analyse de variance à l'aide d'un modèle linéaire à effets mixtes sous le logiciel R. Le choix de ce modèle est dû à la présence de données non équilibrées et manquantes ainsi que le fait que ce modèle prend

en compte simultanément des effets fixes et des effets aléatoires. Notre base de données n'est pas équilibrée à la distribution des traitements parmi les sites. En effet, les 4 traitements étudiés sont dispersés parmi les sites et ne sont jamais présents dans un seul site. Tous les facteurs ont été considérés fixes à l'exception de la placette et de l'arbre qui ont été considérées comme effets aléatoires. Le niveau de signification a été fixé au seuil de $\alpha = 0,05$. Le nombre d'interactions présentes dans les modèles mixtes est limité par la taille des échantillons et seulement les interactions ayant une signification pratique ont été incluses dans les modèles. Des mesures répétées ont été introduites en se référant à de multiples réponses prises sur des années et des hauteurs successives dans chaque unité expérimentale. L'estimation de la méthode restrictive du maximum likelihood (REML) a été appliquée. Des tests de comparaison multiples (tukey HSD) ont été effectués afin de déterminer les différences significatives entre les moyennes à l'intérieur de chaque effet fixe. L'équation 2.4 montre le modèle utilisé pour étudier les effets des coupes partielles sur les propriétés indicatives de la qualité du bois étudiées :

$$M_{ijklmno} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \rho_l + \delta_m + \varphi_n + \theta_o + (\beta\varphi)_{jn} + (\beta\theta)_{jo} + \varepsilon_{ijklmn} \quad [2.4]$$

Où :

$M_{ijklmno}$ est la moyenne de la propriété dans le site i , qui a subi un traitement j , de l'arbre k , de l'âge l , avec un diamètre m à la hauteur n à un temps o ;

μ est la moyenne de la propriété;

α est l'effet du site;

β est l'effet du traitement;

γ est l'effet dû à l'arbre;

δ est l'effet du diamètre de l'arbre;

ρ est l'âge de l'arbre;

φ est l'effet de la hauteur dans l'arbre;

θ est l'effet du temps (année par rapport à l'année des coupes partielles);

ε_{ijklmn} est le terme d'erreur.

Les effets des coupes partielles sur les propriétés étudiées ont été analysés selon un dispositif factoriel où les facteurs sont le site (3 peuplements), le traitement (4 niveaux), la classe de DHP (4 classes), la placette (21 distribuées parmi les sites), l'arbre (4 arbres par classe de DHP par traitement), l'âge de l'arbre (4 classes d'âges, corrélées avec le DHP de l'arbre), la hauteur dans l'arbre (0,5 m, 1,3 m, 4 m, 8 m et 12 m), le temps (-2, -1, 1, 2, 3, 4, 5 où les valeurs négatives représentent les années avant l'année de réalisation des coupes partielles et les valeurs positives après). Les variables réponses ont été les largeurs et les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final, et la longueur et la largeur des trachéides.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Statistiques descriptives

Les valeurs moyennes pour les propriétés des trachéides figurent dans le Tableau 4.1. On y constate une variation intra-site autant pour la longueur que pour la largeur des trachéides, où la longueur varie de 2,62 à 3 mm et la largeur de 22 à 23 μm . Les valeurs moyennes pour la longueur et la largeur des trachéides de tous les arbres échantillonnés dans les 3 sites à l'étude sont de 2,83 mm et de 23 μm , respectivement. Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées pour l'épinette noire par Ourais (2012) (3,16 mm et 33 μm) et Zhang et Koubaa (2000) (3,5 mm et 25-30 μm).

Tableau 3.1 Valeurs moyennes et coefficients de variation (CV) (entre parenthèses) de la longueur et de la largeur des trachéides d'épinette noire pour toutes les traitements, les hauteurs et les cernes des trois peuplements de l'Abitibi-Témiscamingue

Site	Longueur des trachéides (mm)	Largeur des trachéides (μm)
Villars	2,92 (11)	23 (9)
Muskuchii	2,62 (14)	22 (9)
Cramolet	3,00 (14)	23 (10)
Moyenne de tous les sites	2,83 (14)	23 (10)

On présente dans le Tableau 4.2 les valeurs moyennes pour la masse volumique et la largeur du cerne, du bois initial et du bois final de tous les arbres échantillonnés des trois peuplements d'épinette noire étudiés. On y constate une importante variation de la largeur du

cerne où cette propriété varie de 0,57 à 0,92 mm entre les sites. Cette variation de la largeur du cerne se situe principalement au niveau du bois initial qui varie de 0,48 à 0,72 mm alors qu'au niveau du bois final elle varie de 0,25 à 0,32 mm. La valeur moyenne de la largeur des cernes pour les 3 peuplements étudiés âgés de 80 à 99 ans est de 0,82 mm. Cette valeur est supérieure à celle rapportée par Vincent (2011) (0,58-0,60 mm) et inférieure à celles rapportées par Ourais (2012) (1,06 mm) et Zhang et Koubaa (2009) (2,51 mm) pour le bois d'épinette noire. Cela est dû aux différences au niveau de l'âge du peuplement ainsi que de la provenance des arbres (peuplement naturel ou plantation) et des conditions édaphoclimatiques des sites à l'étude.

Pour ce qui est de la masse volumique, on constate une faible variation de cette propriété entre les sites, où la moyenne de cette propriété varie de 421 à 456 kg/m³. Cependant, la masse volumique du bois final présente une importante variation intra-site, en allant de 523 à 626 kg/m³. La masse volumique moyenne du bois des arbres échantillonnés dans les 3 sites est de 437 kg/m³, où la masse volumique du bois final (582 kg/m³) est supérieure (36 % de plus) à celle du bois initial (373 kg/m³). La moyenne de la masse volumique trouvée par la présente étude se compare à celles rapportées par Ourais (2012) (451 kg/m³), Pamerleau-Couture (2010) (436 kg/m³), Vincent (2011) (471-493 kg/m³) et Koubaa *et al.* (2000) (443 kg/m³) pour le bois d'épinette noire.

Tableau 4.2 Valeurs moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses) des largeurs et des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final d'épinette noire pour toutes les traitements, les hauteurs et les cernes des trois peuplements de l'Abitibi-Témiscamingue

Largeur (mm)			
Site	Cerne	Bois initial	Bois final
Villars	0,92 (54)	0,72 (50)	0,29 (72)
Muskuchii	0,94 (57)	0,69 (60)	0,32 (69)
Cramolet	0,57 (61)	0,48 (57)	0,25 (46)
Moyenne de tous les sites	0,82 (61)	0,65 (59)	0,29 (68)
Masse volumique (kg/m ³)			
Site	Cerne	Bois initial	Bois final
Villars	456 (15)	388 (14)	626 (16)

Muskuchii	437 (19)	375 (19)	585 (19)
Cramolet	421 (21)	350 (21)	523 (20)
Moyenne de tous les sites	437 (19)	373 (18)	582 (20)

4.2 Variations intra-arbres

Dans cette section, on présente les variations radiales et longitudinales, de la croissance annuelle, de la masse volumique du bois ainsi que des propriétés morphologiques des trachéïdes.

4.2.1 Variation radiale et longitudinale de la croissance annuelle

Les variations radiales des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final selon l'âge cambial au DHP (1,3 m) sont illustrées dans la Figure 4.1. On y observe que les largeurs du cerne et du bois initial augmentent légèrement pour les 5 premiers cernes près de la moelle où elles atteignent une valeur maximale. Par la suite, les largeurs moyennes diminuent avec la progression vers l'écorce. L'augmentation des valeurs moyennes de la largeur des cernes au cours des premières années de croissance est probablement due à la présence du bois de compression près de la moelle. La réduction de la largeur moyenne des cernes devient de moins en moins accentuée au fil du temps et a une tendance à atteindre une constance à partir de l'âge cambial de 35-40 ans. La variation radiale du bois final a un patron différent qui se caractérise par une diminution aux premiers cernes, jusqu'à l'âge de 10 ans, suivie d'un plateau constant. Des patrons similaires de variation radiale de la croissance annuelle ont été rapportés pour l'épinette noire par Ourais (2012), Alteyrac (2005) et Koubaa *et al.*, (2005).

La Figure 4.2 illustre la variation longitudinale des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final à différentes hauteurs dans l'arbre selon l'âge cambial. Les variations longitudinales de la croissance radiale sont relativement faibles comparées aux variations radiales (Figure 4.2A). Les largeurs moyennes du cerne et du bois initial présentent une légère augmentation avec la hauteur dans l'arbre alors que la largeur du bois final présente une faible variation longitudinale et reste presque constante de la base vers le sommet de l'arbre. L'augmentation des largeurs moyennes du cerne et du bois initial avec la hauteur de

l'arbre s'explique par la diminution du nombre de cernes annuels et par conséquent, le nombre de cernes étroits (Ourais, 2012 et Kasraoui, 2011) et la faible variation de la valeur moyenne du bois final est expliquée par sa faible variation avec l'âge cambial (Figure 4.1). Dans le bois juvénile, les largeurs du cerne et du bois initial augmentent de la base de l'arbre vers le sommet. En revanche, dans le bois mature ce patron est inversé, où les valeurs moyennes des largeurs du cerne et du bois initial diminuent avec la hauteur dans l'arbre (Figures 4.2 B et C). Par conséquent, à un âge cambial donné, le cambium produira des cernes plus étroits à une hauteur plus élevée dans le bois mature (Alteyrac, 2005). Cette variation peut être expliquée par la variation de la proportion de bois juvénile entre les hauteurs dans l'arbre (Koga *et al.*, 1995).

À travers les Figures 3.2B, 3.2C et 3.2D, on observe les différences entre les patrons de variations longitudinales selon l'âge cambial. Pour les variations des largeurs des cernes (Figures 4.2B) et du bois initial (Figure 4.2C), dans les premières années de croissance, les valeurs sont élevées pour toutes les hauteurs à l'exception de la hauteur à 0,5 m puis on note une diminution rapide de la largeur du cerne et du bois initial avec l'âge cambial jusqu'à l'âge de 20 ans. Pour la hauteur 0,5 m, le patron est l'opposé, où les largeurs du cerne et du bois initial ont une tendance à augmenter jusqu'à 20 ans. À partir de 20 ans, pour toutes les hauteurs, les largeurs du cerne et du bois initial commencent à se stabiliser avec l'âge cambial et de diminuer avec la hauteur dans l'arbre. Dans la Figure 4.2D, on note, pour toutes les hauteurs dans l'arbre, que la largeur du bois final a une tendance à diminuer jusqu'à l'âge cambial de 20 ans puis on observe une tendance vers une constance. De plus, on y observe une faible variation de la largeur du bois final avec la hauteur dans l'arbre. Des tendances similaires ont été rapportées par Ourais (2012) et Alteyrac (2005) pour l'épinette noire et Kasraoui (2011) pour le pin gris.

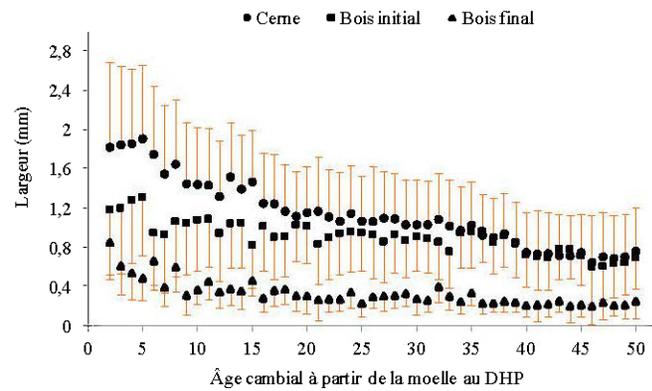


Figure 4.1 Variation radiale des largeurs du cerne, du bois initial et du final de l'épinette noire en fonction de l'âge cambial au DHP (1.3 m) (les barres représentent les écarts-type)

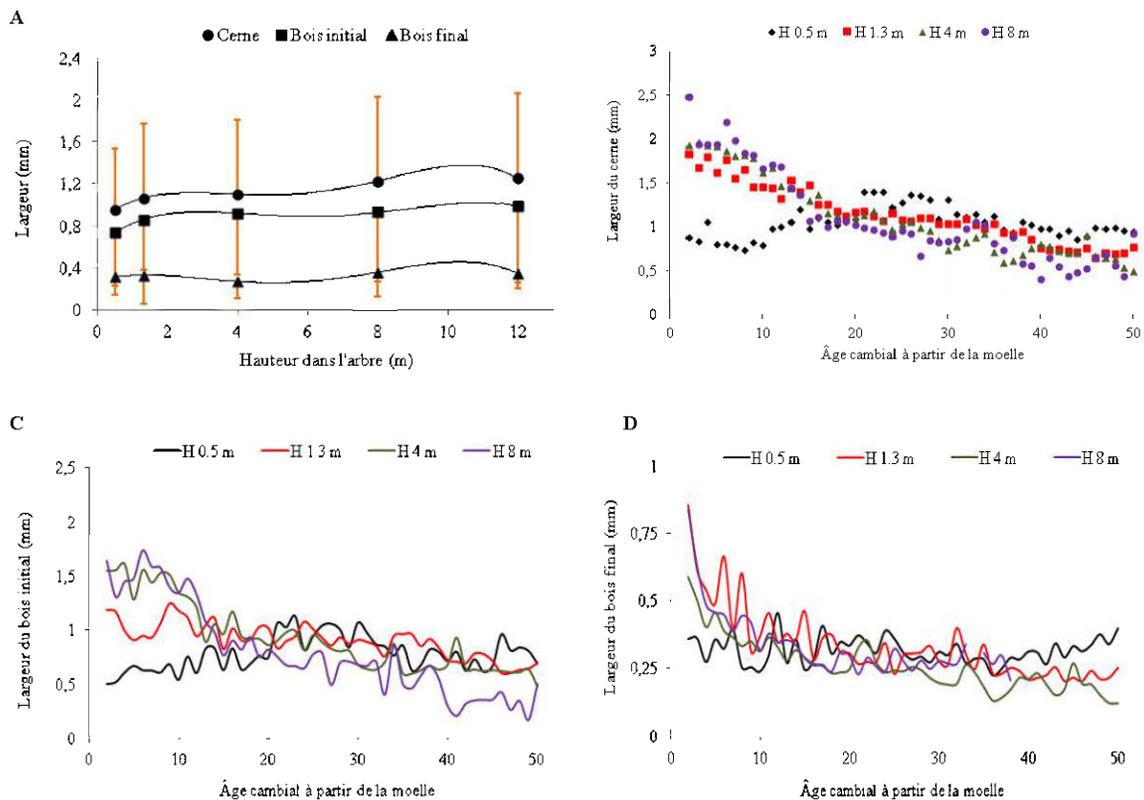


Figure 4.2 Variation longitudinale des composantes de la largeur du cerne : A. Largeurs moyennes du cerne et de ses composantes (les barres représentent les écarts-type); B. Largeur

moyenne du cerne selon l'âge cambial; C. Largeur moyenne du bois initial selon l'âge cambial; D. Largeur moyenne du bois final selon l'âge cambial

4.2.2 Variation radiale et longitudinale de la masse volumique

Les profils des variations radiales des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final selon l'âge cambial au DHP (1.3 m) sont illustrés dans la Figure 4.3. Ces profils suivent le patron décrit par Panshin et de Zeeuw (1980), lequel est caractérisé par une diminution de la masse volumique près de la moelle et par une augmentation vers l'écorce. Effectivement, d'après Alteyrac (2005), les premiers cernes sont caractérisés par une masse volumique élevée due probablement à la formation du bois de compression. Par la suite, les masses volumiques du cerne et du bois initial sont réduites et atteignent la zone de transition du bois juvénile au bois mature, zone située entre l'âge cambial de 10-15 ans qui est caractérisée par de faibles valeurs de masse volumique et qui constitue la première source de variation de la masse volumique du bois d'épinette noire (Koubaa *et al.*, 2005). Ensuite, les masses volumiques du cerne et du bois initial augmentent progressivement dans le bois mature (Yang et Hazenburg, 1994). La masse volumique du bois final augmente d'une façon constante avec l'âge cambial. La variation radiale de la masse volumique pourrait être expliquée par la variation de la largeur du cerne (Koga et Zhang, 2004). En allant dans le même sens, la masse volumique du bois final varie selon la croissance et les conditions climatiques, mais la masse volumique du bois initial est indépendante de ces facteurs (Bouriaud *et al.*, 2005). Les différences de température, de lumière et de disponibilité d'eau entre le début et la fin de la saison de croissance seraient les facteurs responsables de la différence entre la masse volumique du bois initial et du bois final. Des profils de variation radiale de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final ont été rapportés par Ourais (2012) pour l'épinette noire et par Kasraoui (2011) pour le pin gris.

La Figure 3.4 illustre les variations longitudinales des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge cambial à différentes hauteurs dans l'arbre. D'une manière générale, on note que les variations longitudinales sont plus faibles que les variations radiales. Les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final ont une tendance à rester constantes de la base vers le sommet de l'arbre (Figure 4.4A). En décortiquant en

classes d'âges (Figures 4.4B, 4.4C et 4.4D), on remarque que les masses volumiques du cerne et du bois initial sont réduites aux premières années de croissance (2-15 ans environ), car elles atteignent la zone de transition du bois juvénile au bois mature. De plus, on observe une légère diminution des masses volumiques des cernes et du bois initial de 0,5 m à 4 m suivie d'une légère augmentation. Pour la classe d'âge de 15 à 30 ans, les masses volumiques des cernes et du bois initial restent quasi constantes avec l'âge et montrent une augmentation de 0,5 m à 1,3 m puis une réduction vers le sommet. À partir de 30 ans, la masse volumique du cerne tend à augmenter avec l'âge et diminue légèrement avec la hauteur dans l'arbre tandis que la masse volumique du bois initial reste quasi constante avec l'âge et la hauteur dans l'arbre. Pour le bois final, la masse volumique augmente avec l'âge cambial et la hauteur dans l'arbre, à l'exception de la hauteur à 8 m à partir de 20 ans. Des patrons similaires de variation longitudinale de la masse volumique du bois d'épinette noire ont été rapportés par Ourais (2012) et Alteyrac (2005) et pour le pin gris par Kasraoui (2011) et Park *et al.* (2009).

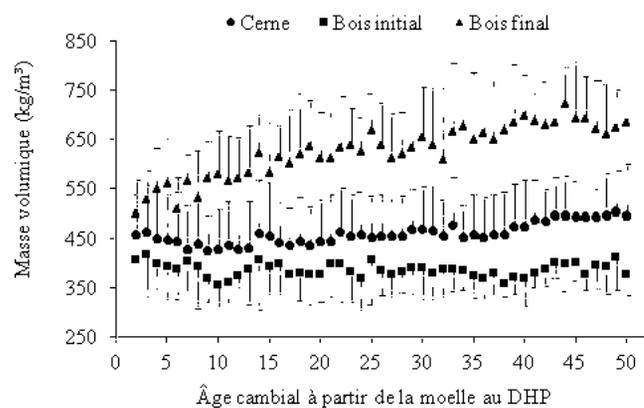


Figure 4.3 Variation radiale des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final d'épinette noire en fonction de l'âge cambial au DHP (1.3 m)

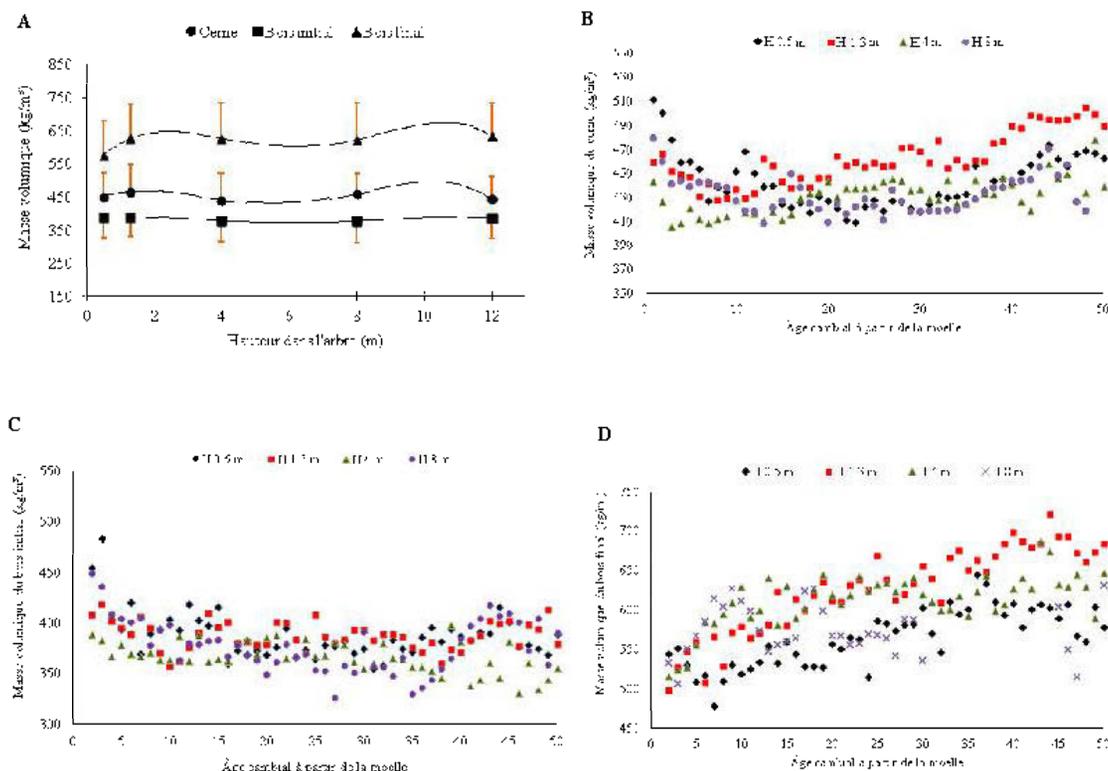


Figure 4.4 Variation longitudinale de la masse volumique : A. Masses volumiques moyennes du cerne et de ses composantes; B. Masse volumique moyenne du cerne selon l'âge cambial; C. Masse volumique moyenne du bois initial selon l'âge cambial; D. Masse volumique moyenne du bois final selon l'âge cambial

4.2.3 Variation radiale et longitudinale des dimensions des trachéides

Les profils de variation radiale de la longueur et de la largeur des trachéides selon l'âge cambial au DHP (1,3 m) sont illustrés dans la Figure 4.5. Les trachéides sont plus courtes et étroites à la proximité de la moelle puis augmentent de taille graduellement avec l'âge cambial. Les trachéides atteignent la longueur maximale dans le bois mature, à peu près à 25 ans et demeurent constantes par la suite. La largeur des trachéides augmente également rapidement lors de premières années de croissance suivie d'une constance dans le bois mature. La largeur des trachéides présente une étendue de variation radiale plus faible que la longueur, soit la largeur varie de 18 à 23 μm (coefficient de variation (CV) de 8) et la

longueur de 1,26 à 2,71 mm (CV de 23). Ces patrons observés peuvent être expliqués par le fait que le bois juvénile se forme lors des premières années de croissance. Il est caractérisé par des trachéides plus courtes et moins épaisses. Dans le bois mature, les trachéides montrent une croissance graduelle pour atteindre une taille maximale (Panshin et De Zeeuw, 1980 et Zobel et Van Buijtenen, 1989). En plus, la largeur des trachéides dans le bois juvénile suit un patron de variation radiale similaire à celui de la largeur des cernes pour la même période (Figures 4.5 et 4.1, respectivement). Des changements dans la morphologie des trachéides dans le bois juvénile expliquent les changements des largeurs des cernes du bois alors que dans le bois mature la largeur des cernes diminuent d'une façon constante avec l'âge cambial tandis que la largeur des trachéides reste presque inchangée.

Les variations longitudinales de la longueur et de la largeur des trachéides sont illustrées à la Figure 3.6. Les variations longitudinales des dimensions des trachéides sont plus faibles que les variations radiales. Les trachéides présentent une plus faible variation longitudinale au niveau de la largeur que la longueur (Figures 4.6 A et 4.6B). En effet, la longueur des trachéides varie de 1,95 à 2,34 mm (CV de 7) avec la hauteur alors que leur largeur a une étendue de variation de 20,1 à 22,6 μm (CV de 4). En plus, on remarque que les trachéides deviennent plus longues et plus larges avec la hauteur dans l'arbre en atteignant la valeur maximale à la hauteur de 4 m, par la suite, leurs dimensions sont légèrement réduites, mais elles restent supérieures à celles des hauteurs à 0,5 et à 1,3 m. À n'importe quelle hauteur dans l'arbre, les trachéides sont courtes et plus étroites à la proximité de la moelle puis elles augmentent dans le bois juvénile avec l'âge cambial suivi d'une tendance à une constance dans le bois mature, à l'exception de la hauteur à 0,5 m où les trachéides continuent à augmenter ses dimensions avec l'âge cambial (Figures 4.6C et 4.6D). Des patrons similaires de variation radiale et longitudinale de la morphologie des trachéides ont été rapportés par Ourais (2012) pour l'épinette noire, Kasraoui (2011) pour le pin gris et Molteberg et Hoibo (2006) pour l'épinette de Norvège.

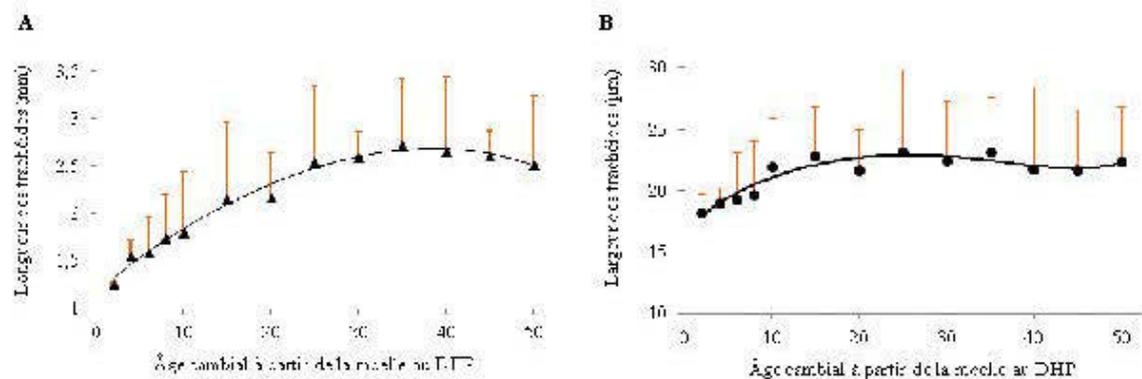


Figure 4.5 Variation radiale de la longueur et de la largeur des trachéides du bois d'épinette noire en fonction de l'âge cambial au DHP (1.3 m)

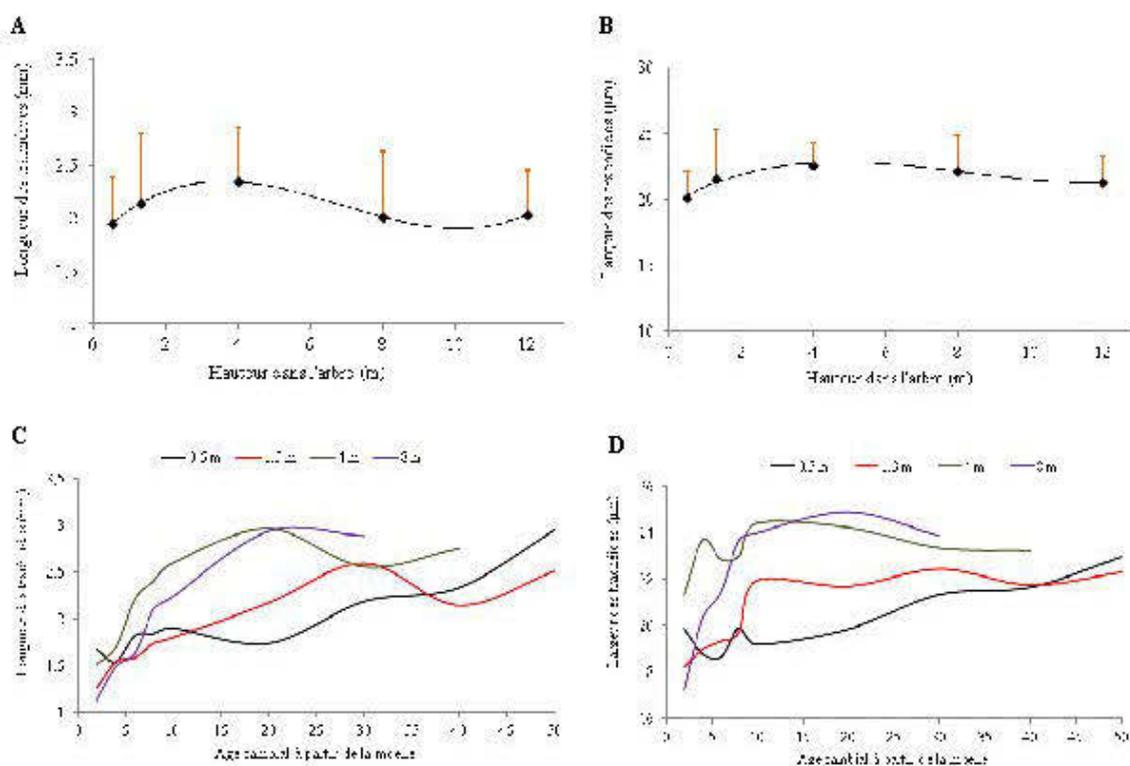


Figure 4.6 Variation longitudinale de la morphologie des trachéides : A. Longueur moyenne des trachéides; B. Largeur moyenne des trachéides; C. Longueur moyenne des trachéides selon l'âge cambial; D. Largeur moyenne des trachéides selon l'âge cambial

4.2.4 Conclusions sur les variations radiale et longitudinale

L'étude des variations radiales et longitudinales des propriétés du bois a révélé que les variations radiales sont plus importantes que les variations longitudinales et que les tendances de variation sont claires et vont vers une stabilité pour la plupart des propriétés examinées à partir d'un âge avancé ($\geq 30-35$ ans). Ceci veut dire que les variations radiales sont plus prononcées dans la phase juvénile du bois. De plus, on a pu également vérifier que des changements de la morphologie des trachéides pourraient être la cause des changements de la largeur des cernes.

4.3 Effets des coupes partielles sur les propriétés du bois étudiées

Les résultats présentés et discutés dans cette section concernent l'effet des coupes partielles sur les propriétés morphologiques des trachéides, la croissance annuelle et la masse volumique du bois d'épinette noire. Pour les trois peuplements étudiés, les effets des traitements de coupes partielles ont été étudiés sur des arbres ayant un âge avancé, dans le bois mature. Le Tableau 4.3 contient les résultats de l'analyse statistique de variance concernant l'effet des coupes partielles sur les propriétés étudiées. Quant aux effets aléatoires, ils ne sont pas significatifs. Des études précédentes ont trouvé que l'arbre n'a pas eu d'effet significatif lors de l'étude des effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale, la masse volumique et les dimensions des trachéides de l'épinette noire (Ourais, 2012) et du pin gris (Kasraoui, 2011).

Tableau 4.3 Résultats de l'analyse de variance des effets fixes sur la largeur et la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final et sur la longueur et la largeur des trachéides

Source de variation	Masse volumique			Largeur			Trachéides	
	Cerne	Bois initial	Bois final	Cerne	Bois initial	Bois final	Longueur	Largeur
Tests des effets fixes (valeurs de p)								
Constante	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Site (S)	0,08ns	0,05ns	0,002*	0,046*	0,008*	0,026*	< 0,001*	0,005*
Traitement (T)	0,57ns	0,64ns	0,51ns	0,54ns	0,93ns	0,6ns	0,29ns	0,96ns
Âge (A)	< 0,001*	< 0,001*	0,003*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Classe de DHP	< 0,001*	0,0001*	0,23ns	0,0002*	0,0002*	0,63ns	< 0,001*	< 0,001*
Hauteur (H)	< 0,001*	< 0,001*	0,004*	< 0,001*	< 0,001*	0,0001*	< 0,001*	< 0,001*
Temps (t)	0,34ns	0,86ns	0,91ns	< 0,001*	< 0,001*	0,0017*	0,002*	< 0,001*
T:A	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	0,13ns	0,0006*	< 0,001*	< 0,001*
T:H	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	0,0001*	< 0,001*	< 0,001*
T:t	0,15ns	0,19ns	0,52ns	< 0,001*	0,0005*	0,09	0,82ns	< 0,001*

* Significatif à $\alpha = 0.05$ ns non significatif

4.3.1 Impacts des coupes partielles sur la croissance annuelle

L'effet du traitement sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final est significatif mais il est modulé par l'âge de l'arbre, la hauteur dans l'arbre et le temps après coupe. En effet, l'interaction traitement vs âge de l'arbre est significative pour les largeurs du cerne et du bois final, mais pas pour celle du bois initial. Ceci s'explique par le fait que l'effet des coupes partielles apparaît plus à la période fin été/début automne (bois final). En plus, on observe que l'effet des 3 intensités des coupes partielles n'est positif que sur les arbres de 35 ans et moins alors que les arbres de plus de 35 ans ne réagissent plus au traitement. Il n'y a pas de différence de gain en croissance après coupe entre les traitements pour les arbres de 35 ans et moins.

L'interaction significative traitement vs hauteur dans l'arbre pour les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final indique que l'impact des coupes partielles sur la croissance varie d'une hauteur à l'autre et que cet impact diffère pour le bois juvénile et pour le bois mature. La variation de la réponse en croissance aux coupes partielles entre les hauteurs dans l'arbre ne suit pas un patron linéaire et varie selon le traitement considéré. Un résultat similaire d'interaction entre le traitement d'éclaircie commerciale et la hauteur dans l'arbre a été rapporté pour l'épinette noire par Ourais (2012).

De la même façon, l'interaction traitement vs temps après intervention est significative pour les largeurs du cerne et du bois initial. Cet effet s'explique par le fait que l'effet des coupes partielles varie d'une année à l'autre après le traitement. En effet, d'après le Tableau 4.4 on remarque que l'effet du traitement sur la croissance est significatif seulement pour les 3 premières années après le traitement par la suite l'effet s'estompe. Des résultats semblables de l'interaction traitement d'éclaircie commerciale vs temps après traitement pour l'épinette noire ont été trouvés par Ourais (2012) et Vincent (2010). Les Figures 4.8 et 4.9 illustrent les interactions du traitement avec la hauteur dans l'arbre, l'âge de l'arbre et le temps après coupe.

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le Tableau 4.3 et la Figure 4.7A relèvent que le site et l'âge de l'arbre ont un effet significatif sur la croissance radiale (largeurs du cerne, du bois initial et du bois final). Ceci peut être expliqué par les conditions de croissance et la qualité du site entre les sites de l'étude et le type de traitement présent

dans chaque site. Ce résultat était déjà attendu comme l'indique le Tableau 4.2 où on y voit qu'il y a une différence de croissance radiale entre les trois sites.

L'âge de l'arbre a un effet significatif sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final. Tel qu'illustré dans la Figure 4.7B, on voit que les arbres qui ont plus de 35 ans présentent des largeurs du cerne et du bois initial supérieures à celles des arbres âgés de moins de 35 ans. D'ailleurs, il n'y a pas de différence entre les largeurs du cerne et du bois initial des arbres qui ont plus de 35 ans. Pour le bois final, on remarque que la seule différence significative observée se trouve entre les arbres âgés de plus de 60 ans et les arbres âgés de 45 et 55 ans où la largeur du bois final est plus importante pour les arbres âgés de 60 ans et plus. Ce résultat était attendu puisque les variations intra-arbre de la croissance radiale (Figure 4.1) nous ont montré que les largeurs du cerne et du bois initial diminuent avec l'âge de la moelle vers l'écorce (jusqu'à 30-35 ans environ) puis elles migrent vers une constance. Ceci pourrait être expliqué par le fait qu'à partir du bois mature, la variation radiale de la croissance est très faible. De plus, la variation intra-arbres nous a également montré que la variation du bois final est plutôt faible.

La croissance radiale varie avec la dimension de l'arbre où cet effet est significatif seulement sur les largeurs du cerne et du bois initial mais pas sur celle du bois final. En effet, d'après la Figure 4.7C on note que la croissance radiale varie selon le DHP de l'arbre où les arbres qui ont un $DHP \geq 9,1$ cm présentent des largeurs du cerne et du bois initial plus élevées que les arbres à $DHP < 9$ cm. De plus, il n'y a pas de différence de croissance radiale entre les arbres qui ont un $DHP \geq 9,1$ cm. En dernier, on peut conclure qu'à la période fin été/début automne (bois final) il n'y a pas de différence de croissance due à la classe de diamètre de l'arbre.

La hauteur dans l'arbre a également un effet significatif sur la largeur du cerne et de ses composantes. Ce résultat était déjà attendu tel qu'illustré dans la Figure 4.2 qui montre les variations des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final selon la hauteur. Cette variation de la croissance radiale selon la hauteur a été également trouvée par Ourais (2012) pour l'épinette noire et par Jaakkola *et al.* (2007) pour l'épinette de Norvège. De surcroît, Alteyrac (2005) a reporté que la hauteur a eu un effet important sur les caractéristiques du bois d'épinette noire.

Pour ce qui est du temps, on observe au Tableau 4.3 qu'il a aussi un effet significatif sur la largeur du cerne et de ses composantes. Cet effet du temps est dû aux différentes conditions climatiques (températures, précipitations, etc.) ainsi que physiologiques (âge cambial) entre les années. Des résultats similaires ont été observés par Ourais (2012) pour l'épinette noire et par Savva *et al.* (2007, 2008) et Kasraoui (2011) pour le pin gris. De plus, la largeur des cernes dépend fortement des conditions climatiques chez l'épinette noire (Dang et Lieffers, 1998).

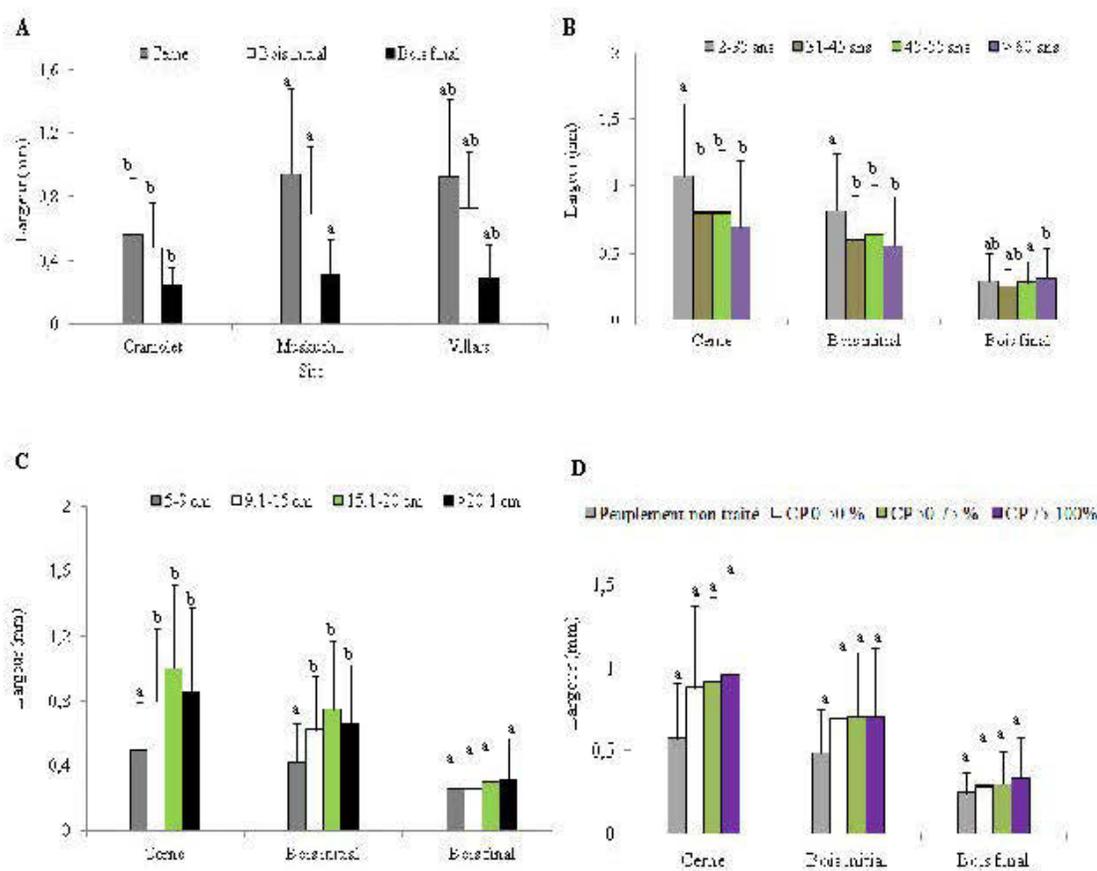


Figure 4.7 Largeurs du cerne et de ses composantes : A. En fonction du site, B. En fonction de l'âge de l'arbre, C. En fonction de la dimension de l'arbre, D. En fonction du traitement (CP = coupes partielles)

* Les lettres sont des comparaisons entre les sites, les classes de DHP, les classes d'âge de l'arbre et les traitements pour une même propriété. Des lettres différentes représentent une différence significative

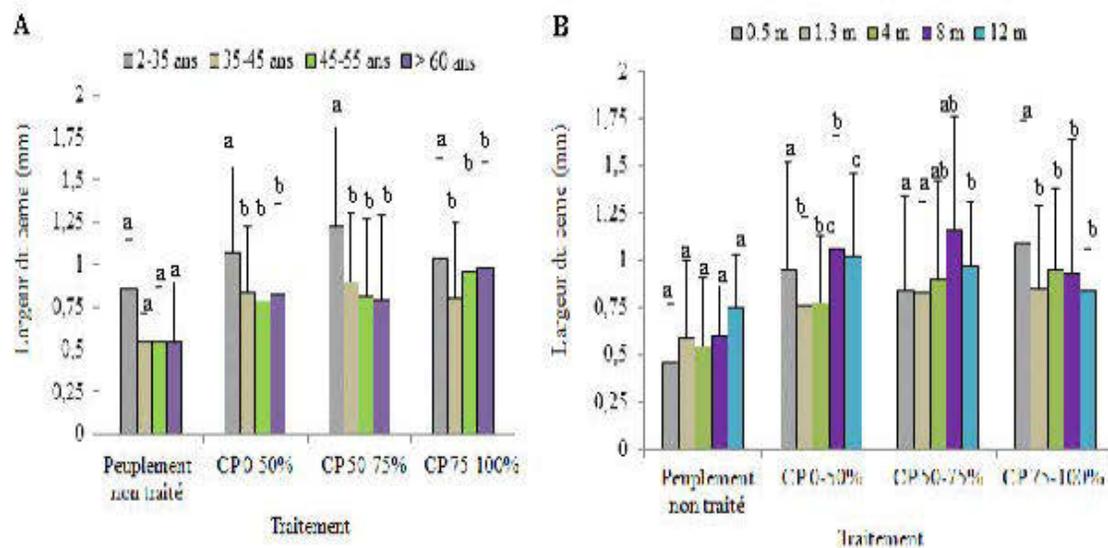


Figure 4.8 Impacts du traitement sur la largeur du cerne. A. Selon l'âge de l'arbre; B. Selon la hauteur dans l'arbre

* Les lettres sont des comparaisons des effets d'un traitement entre les hauteurs et les classes d'âge appartenant au même traitement. Des lettres différentes représentent une différence significative

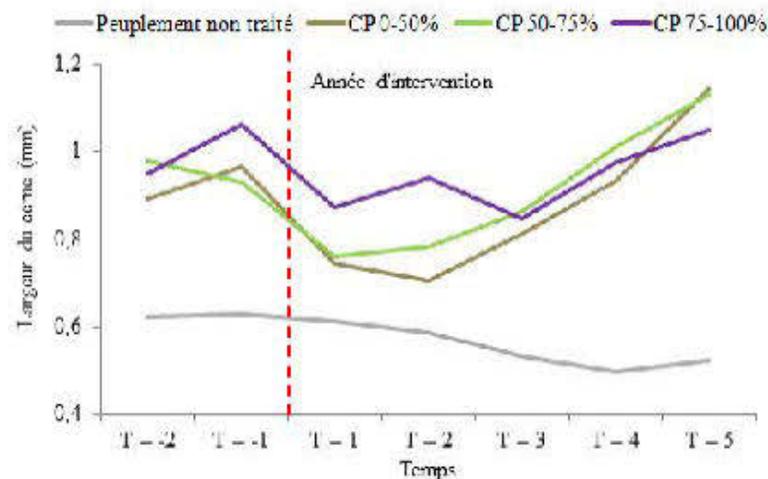


Figure 4.9 Impacts du traitement sur la largeur du cerne selon le temps (-2 et -1 représentent les années avant l'année d'intervention et 1, 2, 3, 4 et 5 les années après)

4.3.2 Impacts des coupes partielles sur la masse volumique

L'effet du traitement sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final est significatif mais il est modulé par l'âge de l'arbre et la hauteur dans l'arbre. L'interaction significative traitement vs âge de l'arbre était déjà attendue comme l'indiquent les variations radiales de la masse volumique avec l'âge cambial volumique (Figure 4.3). Les changements de la masse volumique suite aux coupes partielles sont faibles peu importe l'âge de l'arbre, où il y a une légère augmentation de la masse volumique sur des arbres de plus de 60 ans pour le traitement intense seulement (75-100 % de la surface terrière récoltée).

L'interaction traitement vs hauteur dans l'arbre est également significative sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final et s'explique par le fait que la réponse au traitement sur la masse volumique sera différente pour le bois juvénile (plus de proportion vers le haut de l'arbre) et pour le bois mature (plus de proportion vers le bas de l'arbre). Cependant, les changements de la masse volumique entre les hauteurs à l'intérieur d'un traitement sont faibles.

Contrairement à la croissance radiale, l'interaction traitement vs temps après intervention n'est pas significative sur la masse volumique du cerne et de ses composantes. Ce résultat s'explique par le fait que la variation des largeurs du cerne et de ses composantes avec le temps après traitement n'affectera pas leurs masses volumiques. Les interactions du traitement avec l'âge de l'arbre, la hauteur et le temps sont illustrées dans les Figures 4.11 et 4.12.

Malgré l'effet significatif du traitement sur la masse volumique, les changements de cette propriété dus aux coupes partielles sont faibles, peu importe l'âge de l'arbre et la hauteur dans l'arbre.

L'effet de l'âge de l'arbre est également significatif sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final. En effet, on observe dans la Figure 4.10B que les masses volumiques du cerne et du bois initial des arbres âgés de plus de 60 ans sont légèrement plus importantes que celles des arbres âgés de moins de 60 ans. De plus, il n'y a pas de différence entre les masses volumiques du cerne et du bois initial des arbres qui ont un âge inférieur à 60 ans. D'ailleurs, les résultats présentés dans la section 4.2.2 ont montré que les masses volumiques du cerne et du bois initial varient très peu entre la plage d'âge de 25 et 55 ans. Pour le bois final, il n'y a pas de différence de masse volumique entre les classes

d'âges malgré l'effet significatif de la variable âge de l'arbre. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'ajout de la variable âge de l'arbre dans le modèle statistique nul a un effet sur la masse volumique du bois final mais cet effet sera constant pour n'importe quel âge de l'arbre. De plus, malgré les variations présentées avec l'âge cambial (25-55 ans) dans la Figure 4.3, elles ne sont pas statistiquement différentes.

Le Tableau 4.3 révèle que la dimension de l'arbre a un effet significatif sur les masses volumiques du cerne et du bois initial mais pas sur celle du bois final. Tel que présenté dans la Figure 4.10C, les masses volumiques du cerne et du bois initial des arbres dont le DHP est supérieur ou égal à 15,1 cm sont légèrement supérieures à celles des arbres qui ont un DHP inférieur à 15 cm. De plus, il n'y a pas de différence de masse volumique du cerne entre les arbres dont le DHP est inférieur à 15 cm ni entre ceux qui ont un DHP supérieur ou égal à 15,1 cm non plus. Finalement, la masse volumique du bois final ne présente pas de différence quoi qu'il soit le DHP de l'arbre.

La hauteur quant à elle a également un effet significatif sur la masse volumique du cerne et de ses composantes malgré la faible variation longitudinale de cette propriété (Figure 4.4). Des résultats semblables ont été rapportés par Ourais (2012) et par Alteyrac (2005) pour l'épinette noire et par Kasraoui (2011) pour le pin gris. De plus, Jaakola *et al.* (2006) ont souligné que la hauteur a un effet significatif sur la masse volumique du cerne et de ses composantes pour le bois d'épinette de Norvège.

Pour ce qui est du temps, on observe au Tableau 4.3 qu'il n'y a pas un effet significatif de cette variable sur la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final. Cette absence de l'effet du temps pourrait être expliquée par le fait que malgré les différentes conditions climatiques (températures, précipitations, etc.) entre les années qui ont eu effet sur la largeur du cerne et de ses composantes, elles n'ont pas affecté les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final d'épinette noire. Ces résultats sont différents de ceux trouvés par Ourais (2012) pour l'épinette noire et par Kasraoui (2011) pour le pin gris.

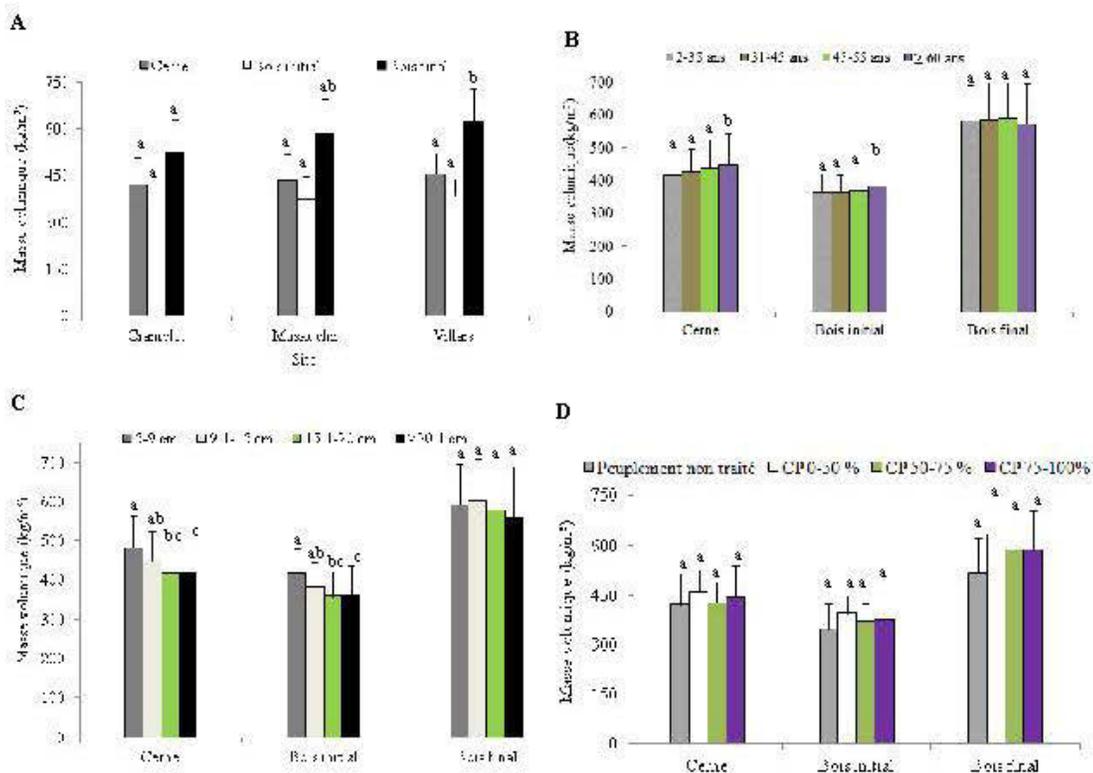


Figure 4.10 Masses volumiques du cerne et de ses composantes : A. En fonction du site, B. En fonction de l'âge de l'arbre, C. En fonction de la dimension de l'arbre, D. En fonction du traitement (CP = coupes partielles)

* Les lettres sont des comparaisons entre les sites, les classes de DHP, les classes d'âge de l'arbre et les traitements pour une même propriété. Des lettres différentes représentent une différence significative

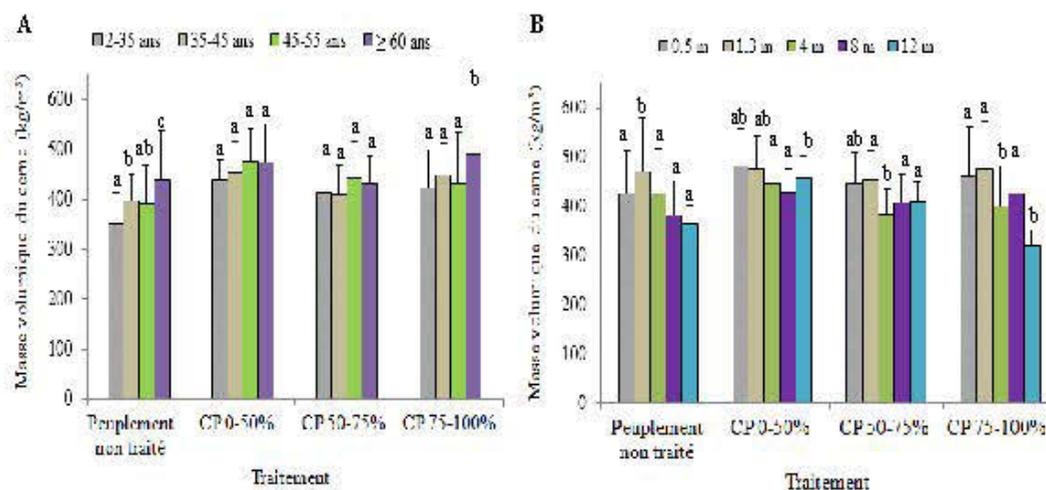


Figure 4.11 Impacts du traitement sur la masse volumique du cerne. A. Selon l'âge de l'arbre; B. Selon la hauteur dans l'arbre

* Les lettres sont des comparaisons des effets d'un traitement entre les hauteurs et les classes d'âge appartenant au même traitement. Des lettres différentes représentent une différence significative

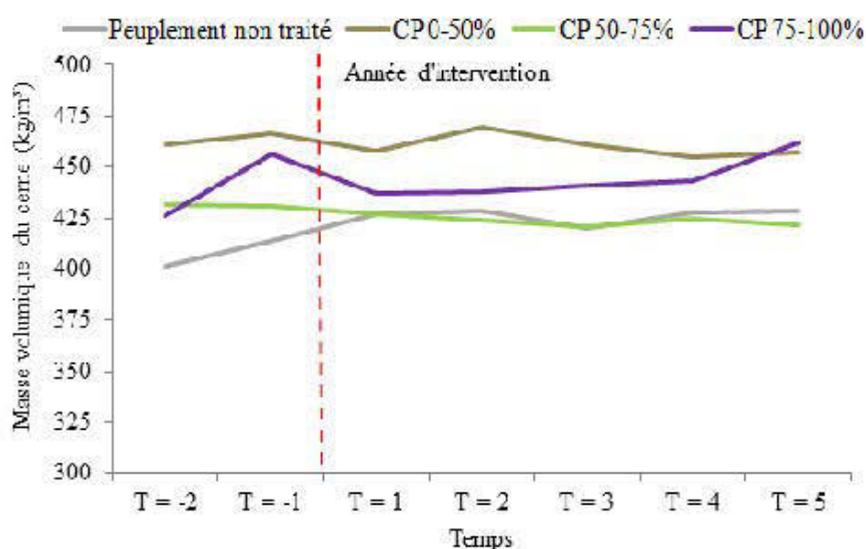


Figure 4.12 Impacts du traitement sur la masse volumique du cerne selon le temps (-2 et -1 représentent les années avant l'année d'intervention et 1, 2, 3, 4 et 5 les années après)

4.3.3 Impacts des coupes partielles sur la morphologie des trachéides

La présence d'interactions significatives entre le traitement et d'autres variables nous indiquent que la réponse des dimensions des trachéides aux coupes partielles est modulée par l'âge de l'arbre, la hauteur dans l'arbre et le temps après traitement. En effet, l'interaction traitement vs âge de l'arbre est significative sur la longueur et la largeur des trachéides. Les arbres de plus de 35 ans présentent des trachéides légèrement plus longues et plus épaisses que les arbres de moins de 35 ans après les coupes partielles à faible intensité (0-50 % de la surface terrière récoltée). Cette augmentation est considérée pourtant faible. Pour les coupes partielles modérées et fortes (50-75% et 75-100% de la surface terrière récoltée, respectivement), il n'y a pas de différence de dimensions des trachéides entre les classes d'âges de l'arbre. Autrement dit, ces traitements ne causeront aucun changement de la longueur et de la largeur des trachéides. Ce résultat était déjà attendu comme l'indiquent les variations radiales de la longueur et de la largeur des trachéides (Figure 4.5) où ces propriétés varient avec l'âge cambial surtout lors des premières années de croissance.

L'interaction traitement vs hauteur dans l'arbre est également significative sur les dimensions des trachéides et s'explique par le fait que la réponse des dimensions des trachéides au traitement n'est pas la même qu'on soit dans le bois juvénile (haut de l'arbre) ou dans le bois mature (bas de l'arbre). Les changements des dimensions des trachéides entre les hauteurs dans l'arbre à l'intérieur d'un traitement sont considérés faibles. Ce résultat était déjà attendu comme l'indiquent les Figures 4.6 A et 4.6 B où la longueur et la largeur des trachéides varient avec la hauteur dans l'arbre.

L'interaction traitement vs temps est significative sur la largeur des trachéides, mais pas sur leur longueur. Ce résultat s'explique par le fait que seulement la réponse de la largeur des trachéides variera selon le temps après l'application du traitement alors que pour la longueur des trachéides, l'effet du traitement sera constant et ne variera pas entre les années suivant le traitement. Les Figures 4.15, 4.16 et 4.17 illustrent les interactions du traitement avec l'âge de l'arbre, la hauteur et le temps pour la longueur et la largeur des trachéides, respectivement.

Malgré l'effet significatif du traitement sur les dimensions des trachéides et ses interactions avec quelques variables, les changements de la longueur et de la largeur des

trachéides sont considérés faibles, peu importe l'âge de l'arbre, la hauteur dans l'arbre et le temps après coupe considéré.

L'analyse de variance des effets fixes sur la morphologie des trachéides est présentée dans le Tableau 4.4. On y observe que le site a un effet significatif sur la longueur et la largeur des trachéides (Figures 4.13A et 4.14A). Ce résultat était déjà attendu comme indiqué dans le Tableau 4.1 où l'on observe une variation des dimensions des trachéides entre les 3 sites à l'étude. Ceci peut être expliqué par des différences de conditions de croissance entre les sites, le type de traitement présent dans chaque site ainsi que les différents âges présents dans les peuplements (plage d'âge variant de 30 à plus de 90 ans).

L'effet de l'âge de l'arbre est également significatif sur la morphologie des trachéides. En effet, on observe dans les Figures 4.13B et 4.14B que la longueur et la largeur des trachéides des arbres âgés de 30 ans et moins sont différentes de ceux qui sont âgés de plus de 30 ans. De plus, il n'y a pas de différence de longueur ni de largeur des trachéides entre les arbres âgés de 30 ans et plus. Ce résultat était déjà attendu comme l'indique la Figure 4.5 où les variations radiales de la longueur et de la largeur des trachéides ont montré une variation plus importante dans le bois juvénile et une tendance à une constance dans le bois mature.

La longueur et la largeur des trachéides varient sur la dimension de l'arbre. En effet, tel que présenté dans les Figures 4.13C et 4.14C, la longueur des trachéides varie selon le DHP de l'arbre, mais à partir du moment que l'arbre atteint un DHP supérieur à 15,1 cm la longueur des trachéides aura une tendance à être constante. La largeur des trachéides suit à peu près le même patron où les différences de largeur des trachéides sont significatives entre les arbres dont le DHP est inférieur ou égale à 9 cm et supérieur ou égale à 9,1 cm et aussi entre les arbres qui ont un DHP compris entre 9 et 15 cm et supérieur ou égale à 20,1 cm.

La hauteur a également un effet significatif sur les dimensions des trachéides où la variation de la longueur et de la largeur des trachéides selon la hauteur dans l'arbre était déjà attendue comme l'indique la Figure 4.6. Ce constat peut s'expliquer par le fait que les dimensions des trachéides sont différentes entre le bois juvénile (haut de l'arbre) et le bois mature (bas de l'arbre).

Finalement, pour ce qui est du temps, on observe qu'il a un effet significatif sur la longueur et la largeur des trachéides. Étant donné que le temps est un facteur indicatif des fluctuations environnementales, ce résultat indique que les dimensions des trachéides sont

sensibles aux changements des conditions climatiques (précipitations, températures, etc.). Ourais (2012) a étudié les effets du traitement d'éclaircie commerciale sur les dimensions des trachéides de l'épinette noire. L'auteure a trouvé que le temps a eu un effet significatif sur la longueur des trachéides. Kasraoui (2011) a évalué les effets de l'éclaircie commerciale sur la longueur et la largeur des trachéides du pin gris et a observé que la longueur et la largeur du bois final du pin gris sont sensibles aux variations des conditions climatiques.

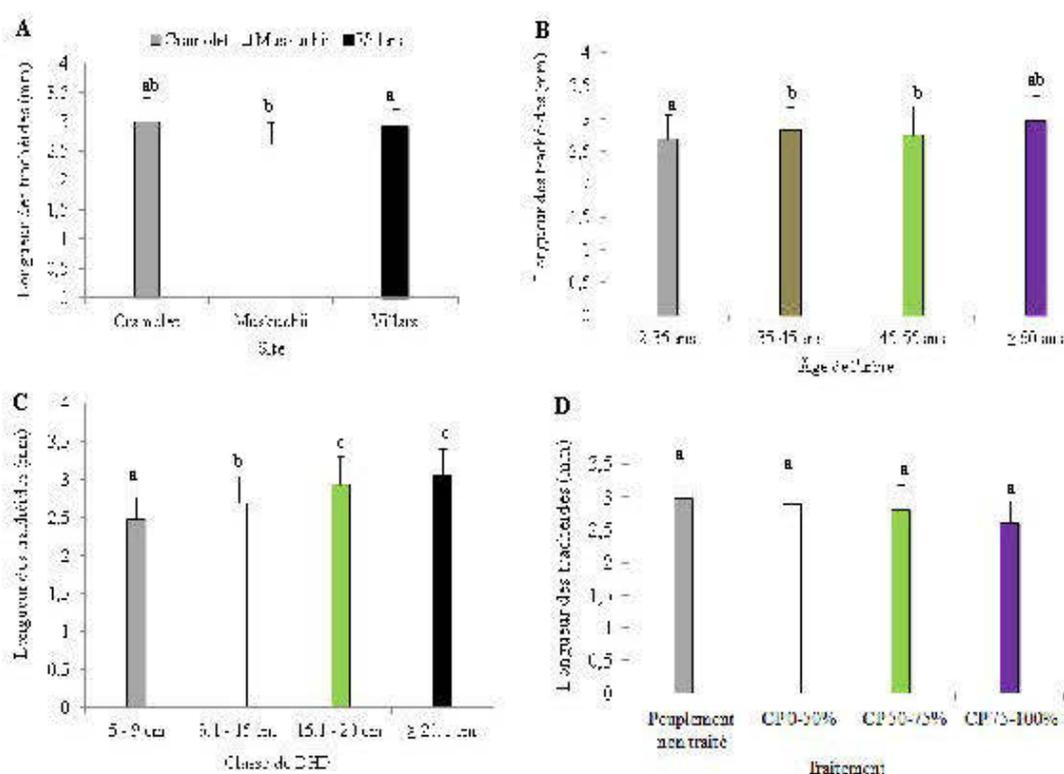


Figure 4.13 Longueur des trachéides : A. En fonction du site, B. En fonction de l'âge de l'arbre, C. En fonction du DHP de l'arbre, D. En fonction du traitement en tant que facteur principal

* Les lettres sont des comparaisons entre les sites, les classes de DHP, les classes d'âge de l'arbre et les traitements pour une même propriété. Des lettres différentes représentent une différence significative

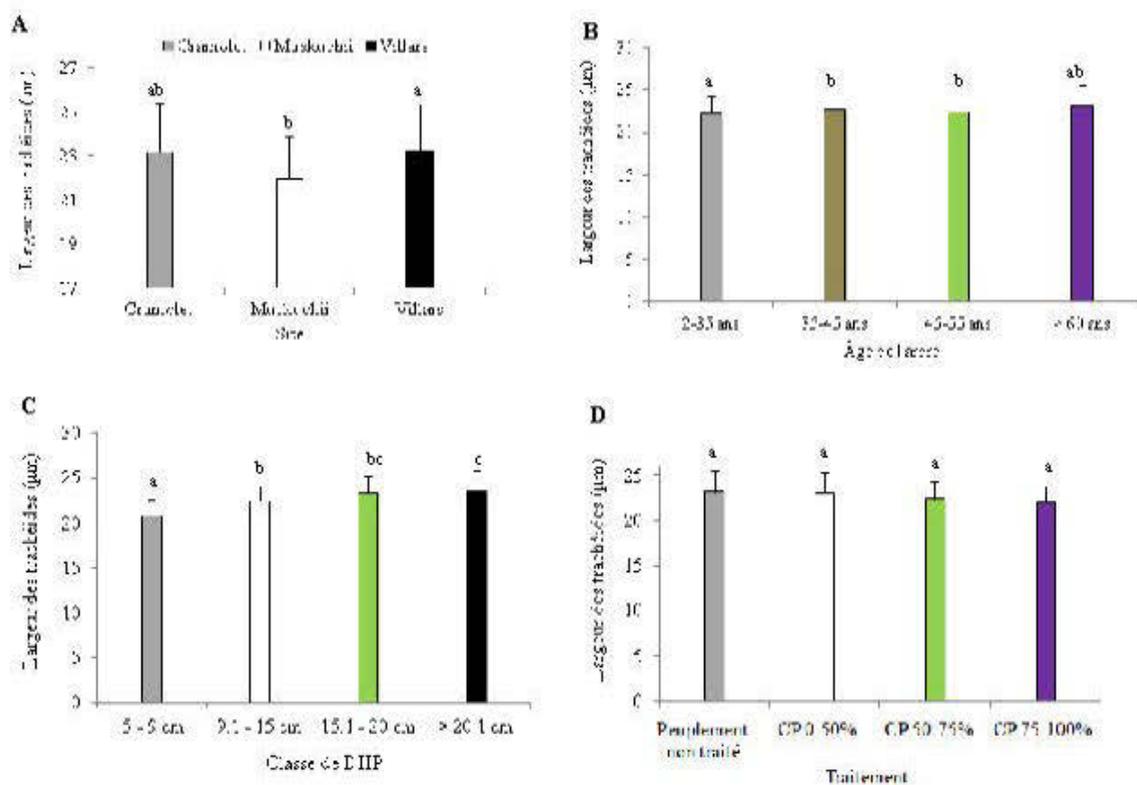


Figure 4.14 Largeur des trachéides : A. En fonction du site, B. En fonction de l'âge de l'arbre, C. En fonction du DHP de l'arbre; D. En fonction du traitement en tant que facteur principal

* Les lettres sont des comparaisons entre les sites, les classes de DHP, les classes d'âge de l'arbre et les traitements pour une même propriété. Des lettres différentes représentent une différence significative

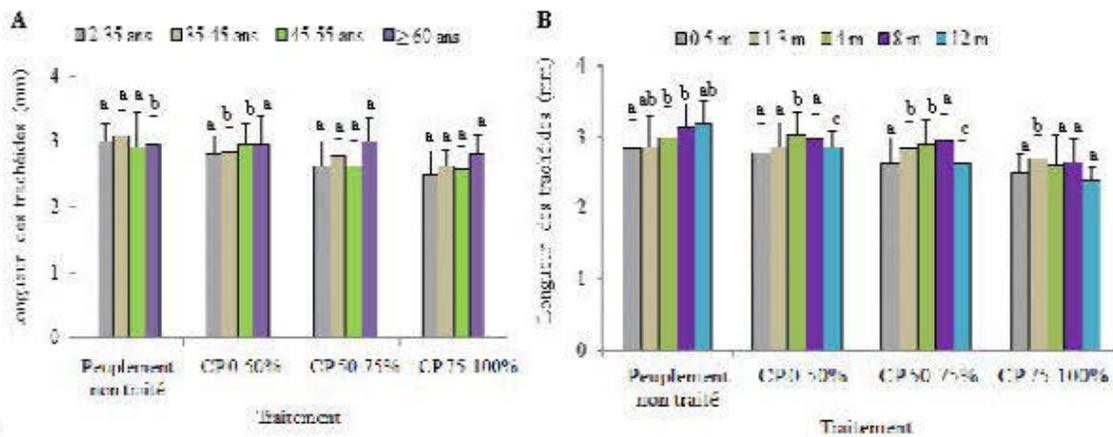


Figure 4.15 Impacts du traitement sur la longueur des trachéides. A. Selon l'âge de l'arbre; B. Selon la hauteur dans l'arbre

* Les lettres sont des comparaisons des effets d'un traitement entre les hauteurs et les classes d'âge appartenant au même traitement. Des lettres différentes représentent une différence significative

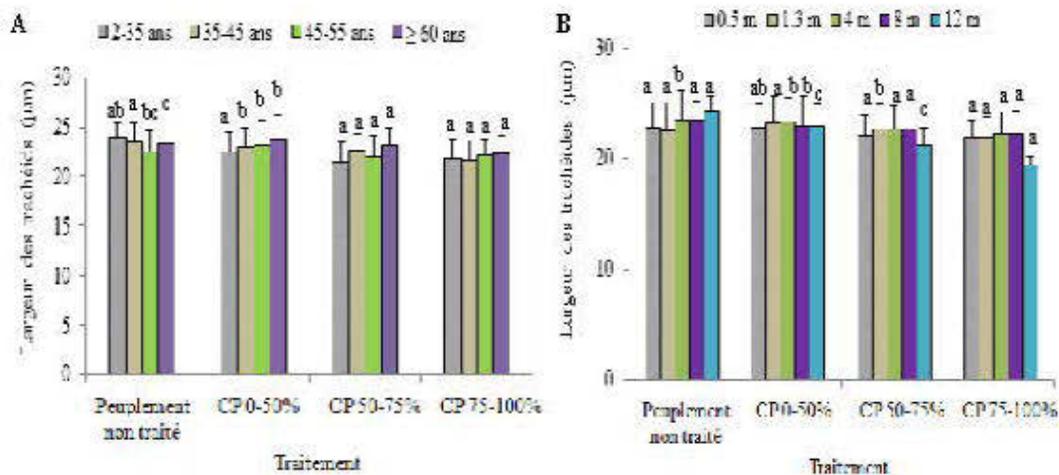


Figure 2.16 Impacts du traitement sur la largeur des trachéides. A. Selon l'âge de l'arbre ; B. Selon la hauteur dans l'arbre

* Les lettres sont des comparaisons des effets d'un traitement entre les hauteurs et les classes d'âge appartenant au même traitement. Des lettres différentes représentent une différence significative

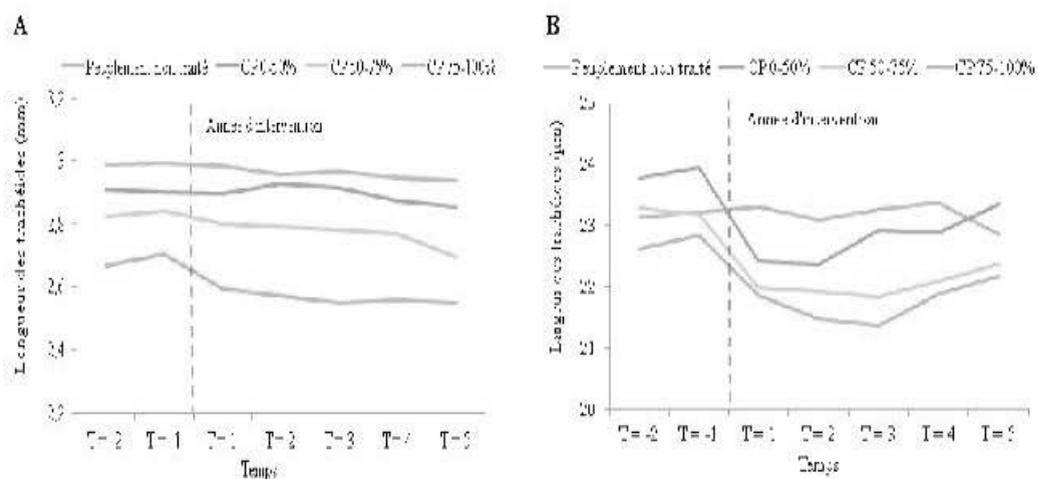


Figure 4.17 Impacts du traitement sur la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides selon le temps (- 2 et -1 sont les années avant l'année d'intervention et 1, 2, 3, 4 et 5 sont les années après)

4.4 Implications pratiques et industrielles

Dans un contexte mondial de tendance vers un aménagement intensif afin de répondre à la demande accrue pour le bois et les fibres tout en préservant l'environnement, l'approvisionnement en bois a connu des changements significatifs en termes de qualité du bois. Les changements de la qualité de l'approvisionnement en bois ont un profond impact sur la transformation et l'utilisation du bois à travers la chaîne de valeur (Zhang, 1997). Ces changements peuvent éventuellement avoir une influence sur les industries des produits forestiers. La qualité du bois produit doit respecter les normes des industries afin d'assurer que le produit est de qualité. La qualité d'un produit forestier final dépendra de l'état des arbres marchands (défilement du tronc, masse volumique, dimensions des fibres, quantité et la taille de nœuds entre autres) qui est étroitement lié aux interventions sylvicoles (Pamerleau-Couture, 2010).

Les résultats de la présente étude sur les effets des coupes partielles sur la croissance radiale des tiges nous ont révélé des informations qui pourraient venir en aide auprès des sylviculteurs et des aménagistes. En effet, les coupes partielles ont un effet positif sur la croissance radiale seulement sur les arbres âgés de moins de 35 ans, lesquels présentent la

réponse optimale au traitement, alors que les arbres de plus de 35 ans ne réagissent plus au traitement.

Par ailleurs, la masse volumique n'a pas connu de changements nuisibles suite à l'application des coupes partielles, même si les effets de cette pratique sylvicole varient selon l'âge de l'arbre, la hauteur dans l'arbre et le temps. À titre d'exemple, la masse volumique du cerne a varié, en moyenne des traitements, de 426 kg/m³ (peuplement non traité) à 460 kg/m³ (CP 0-50%), à 424 kg/m³ (CP 50-75 %) et à 444 kg/m³ (CP 75-100%). Sachant que la masse volumique du bois est l'un des principaux indicateurs de la qualité du matériau bois (Jyske, 2008 et Koubaa *et al.*, 2002;), les résultats de la présente étude indiquent que les coupes partielles n'ont pas d'implications pratiques ni industrielles sur la qualité du bois d'épinette noire issu des sites de l'étude. En effet, l'impact des traitements étudiés sur la masse volumique du bois serait de faible importance pratique (Megraw, 1985, 1986). Des conclusions similaires ont été rapportées par Ourais (2012) et Pamerlau-Couture (2010) pour l'épinette noire.

Concernant les dimensions des trachéides, les coupes partielles n'ont pas causé des changements radicaux sur la longueur et la largeur des trachéides. Effectivement, la longueur des trachéides présente une faible réduction après le traitement, en allant, en moyenne des traitements, de 2,97 mm (peuplement non traité) à 2,90 mm (CP 0-50%), à 2,79 mm (CP 50-75%) et à 2,60 mm (CP 75-100%), ce qui résulte à une réduction maximale d'environ 12% de la longueur (0,37 mm). Pour ce qui est de la largeur des trachéides, suite au traitement la valeur de cette propriété varie de 23,2 µm (peuplement non traité) à 23,10 µm (CP 0-50%), à 22,4 µm (CP 50-75%) et à 22,1 µm (CP 75-100%). Ces résultats indiquent une réduction maximale d'environ 4,8 % de la largeur (1,1 µm). La longueur des trachéides ainsi que l'épaisseur des parois cellulaires sont des critères importants pour la qualité de la fibre, puisqu'ils ont une grande influence sur le procédé de fabrication de la pâte et la résistance du papier (Antal et Micko, 1994; Law et Valade, 1997). Par conséquent, on considère que les coupes partielles n'ont pas d'implications pratiques sur la qualité de la fibre (trachéides) de l'épinette noire. Ourais (2012) a constaté que les éclaircies commerciales n'entraînent pas d'implications pratiques sur la longueur et la largeur des trachéides de l'épinette noire. Des résultats similaires de l'absence d'impact des éclaircies commerciales sur les dimensions des trachéides chez le pin gris ont été rapportés par Kasraoui (2011). De plus, Jaakkola *et al.*

(2005b) sont arrivés à la conclusion que les éclaircies commerciales pratiquées en Finlande ont eu un effet faible ou presque négligeable sur les dimensions des trachéides de l'épinette de Norvège issues de peuplement âgés de 86 ans. Jyske *et al.* (2008), Lindström (1996) et Tuula (2008) ont également constaté un faible ou presque aucun impact préjudiciable des traitements d'éclaircie sur les propriétés de la fibre du bois d'épinette de Norvège.

D'une manière générale, les coupes partielles sont une pratique sylvicole de succession qui devrait être appliquée dans le but de reconstituer la structure des peuplements surannés. Cependant, notre étude a prouvé que les coupes partielles ont aussi un effet positif sur la croissance radiale des arbres de moins de 35 ans. En effet, si la régénération pousse mieux (arbre de moins de 35 ans) la rotation entre 2 coupes sera réduite et donc il y a un gain possible surtout si la mortalité des tiges de plus de 35 ans est faible.

De plus, d'un point de vue industriel, les résultats obtenus par cette étude prouvent qu'il n'y a aucun risque de changements nuisibles sur la qualité de la fibre et du bois d'épinette noire suite à l'application des coupes partielles.

CHAPITRE IV

CONCLUSIONS

Les variabilités intra-arbre et intra-cerne des composantes de la croissance radiale, de la masse volumique ainsi que de la longueur et de la largeur des trachéides furent étudiées. Dans une première partie des hypothèses de la présente étude, on a vérifié si les variations intra-arbres sont plus importantes dans le bois juvénile que dans le bois mature. L'analyse des patrons de variations des paramètres indicateurs de la qualité du bois chez l'épinette noire nous a relevé les conclusions suivantes :

- ✓ Les variations radiales de la croissance radiale, la masse volumique et les dimensions des trachéides sont plus importantes que les variations longitudinales. En effet, les largeurs et les masses volumiques du cerne, du bois initial et le bois final ainsi que la longueur et la largeur des trachéides varient beaucoup plus avec l'âge cambial que de la base vers le sommet de l'arbre.
- ✓ Les variations radiales sont plus importantes dans la phase juvénile du bois et tendent vers une constance dans le bois mature.

Dans la deuxième partie des hypothèses de cette étude, seulement une partie a pu être validée qui stipule que les coupes partielles améliorent l'augmentation de la croissance des arbres et la largeur des trachéides mais réduit la masse volumique et la longueur des trachéides des arbres. Les résultats ont révélé que l'effet des coupes partielles sur la croissance radiale est positif sur la croissance radiale pour les arbres âgés de 35 ans et moins. Cependant, les coupes partielles appliquées ne nuisent pas à la qualité de la fibre et du bois de l'épinette noire. Cependant, les effets de cette pratique sylvicole sur ces propriétés ne sont pas constants et varient selon l'âge de l'arbre, la hauteur dans l'arbre et le temps après coupe. Les coupes partielles ont plutôt une application écologique, en étant utilisées afin de régulariser la structure des peuplements équiennes et réguliers.

L'hypothèse de cette étude qui stipule que les variations radiales et longitudinales des propriétés étudiées sont plus importantes que celles dues aux coupes partielles a été également validée. En effet, les variations intra-arbre de la morphologie des trachéides, de la croissance radiale et de la masse volumique du cerne et de ses composantes sont plus importantes que les changements dus aux coupes partielles appliquées à un âge avancé (dans le bois mature).

Les résultats de la présente étude doivent être interprétés avec prudence et être considérés comme des résultats préliminaires. La raison est due au nombre limité de sites expérimentaux (seulement 3 parmi 11 et en plus les sites sont concentrés dans une seule région, la Ceinture d'Argile d'Abitibi-Témiscamingue) et au nombre d'arbres échantillonnés (seulement 4 par classe de diamètre par traitement).

Par ailleurs, la présente étude a examiné l'évolution de la croissance radiale et de la qualité de la fibre et du bois seulement 5 années après les coupes partielles. Il est possible que cette pratique sylvicole ait un impact positif sur la croissance radiale des tiges résiduelles après la cinquième année suivant l'intervention ainsi que ses effets puissent varier selon la localisation des peuplements d'épinette noire.

Finalement, un plus grand nombre de paramètres affectant la qualité du bois pourrait être incorporés dans l'étude, tels que l'angle des microfibrilles et la masse linéique des trachéides aussi bien que des propriétés mécaniques et anatomiques du bois.

Un échantillonnage plus vaste prenant en compte différents sites expérimentaux et un nombre plus grand d'arbres par traitement serait conseillé afin de pouvoir confirmer les résultats de notre étude. De plus, un suivi à plus long terme de ces peuplements serait également crucial afin de s'assurer la présence d'une amélioration de la croissance radiale et de l'absence d'effets nuisibles des coupes partielles sur la qualité de la fibre et du bois de l'épinette noire.

BIBLIOGRAPHIE

- ALAZARD, P. 1994. Stand density and spacing of *Pinus pinaster*: consequences for growth and tree quality. *Afocel Arnef*, 2: 129-144.
- ALTEYRAC, J. 2005. 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 de doctorat, Université de Laval, Québec, 150p.
- ALTEYRAC, J., ZHANG, S.Y., CLOUTIER, A., RUEL, P.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 and Fiber Science*, 37 (1): 83-94.
- ANTAL, M., MICKO, M.M., 1994. Variation and field estimation of wood quality parameters for black spruce. *Holzforschung. Holzverw*, 46: 70-72.
- AUSSENAC, G., GRANIER, A., BREDA, N. 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Revue Forestière Française*, 1: 54-62.
- BARBOUR R.J., CHAURET G., COOK J., KARSH M.B., RAN S. 1994. Breast-height relative density and radial growth in mature jack pine (*Pinus banksiana*) for 38 years after thinning. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 2439-2447.
- BARBOUR, R.J., BAILEY, R.E., COOK, J.A. 1992. Evaluation of relative density, diameter growth, and stem form in a red spruce (*Picea rubens*) stand 15 years after precommercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research*, 22: 229-238.
- BEAULIEU, J., CORRIVEAU, A., DAOUST, G. 1989. Stabilité phénotypique et délimitation de zones d'amélioration de l'épinette noire au Québec, Sainte-Foy, Québec, Canada, Forêts Canada, Centre de foresterie des Laurentides, 39 p.
- BÉDARD, S.; BRASSARD, F. 2002. Les effets réels des coupes de jardinage dans les forêts publiques du Québec en 1995 et 1996. Ministère des Ressources Naturelles (MRN), ISBN :2-550-40237-5.
- BÉDARD, S., BEGIN, J., DE GRANDPRÉ, L., DUCHESNE, L., GRONDIN, P., JETTE, J.-P., JOBIDON, R., LUSSIER, J.-M., POTHIER, D., PRÉGENT, G, RUEL, J.-C. 2002. Éclaircie pré commerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM. Avis scientifique du Comité consultatif scientifique du Manuel d'aménagement forestier. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Forêt Québec. 126 p.

- BERGERON, Y., LEDUC, A., HARVEY, B. D., GAUTHIER, S. 2002. Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest. *Silva Fennica*. 36: 81–95.
- BERGERON, Y., GAUTHIER, S., KAFKA, V., LEFORT, P., LESIEUR, D, 2001. Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Canadian Journal of Forest Research*. 31: 384-391.
- BERGERON, Y., HARVEY, B. 1997. Basing silviculture on natural ecosystem dynamics: an approach applied to the southern boreal mixedwood forest of Quebec. *Forest Ecology and Management*. 92: 235-242.
- BOWYER, J.L., SHMULSKY, R., HAYGREEN, J.G. 2007. Forest product and wood science. An introduction. 5e éd. Blackwell Publishing Ltd., Oxford. 558 p.
- BOUCHARD, M., 2008. La sylviculture dans un contexte d'aménagement écosystémique en forêt boréale et en forêt mixte. (Chap. 13), *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presses de l'Université du Québec, 335-359.
- BOURIAUD, O., LEBAN, J.-M., BERT, D., DELEUZE, C. 2005. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Physiology*, 25(6): 651-660.
- BURDON, R.D., KIBBLEWHITE, R.P., WALKER, J. CF., MEGRAW, R.A., EVANS, R. COWN, D.J. 2004. Juvenile versus mature wood: A new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *Pinus taeda*. *Forest Science*, 50 (4):399-415.
- BRIGGS, D.G. 1995. Pruning in relation to forest inventory, wood quality, and products. Chapitre 2, dans: HANLEY, D.P.; OLIVER, C.D.; MAGUIRE, D.A.; BRIGGS, D.G; FIGHT, R.D. (éd.). *Forest Pruning and Wood Quality of Western North American Conifers*. Institute of Forest Resources. University of Washington. Contribution 77: 21-35
- BRIGGS, D.G., SMITH, W.R. 1986. Effect of silvicultural practices on wood properties of conifers. A review. In *Douglas fir: stand management for the future*. C, Olivier, D. Hanley and J. Johnson (Eds). University of Washington Press. Seattle, 108-117.
- BSI 1996 BS EN 942 Timber in Joinery – General Classification of Timber Quality. British Standards Institute, London.
- BURNS, R.M., HONKALA, B.H., éd. 1990. *Silvics of North America, Volume 1: Conifers*, Washington, D.C., United States, Department of Agriculture, 675 p. (Agriculture Handbook; 654).
- BUSTOS, C. 2003. Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada. 133 p.

- CANADIAN COUNCIL OF FOREST MINISTERS. 2002. Compendium of Canadian Forestry Statistics. In : Service, C.F. (Ed.), Ottawa, Ontario, 1997.
- CECH, M.Y., PFAFF, F. 1980. Kiln operator's manual for eastern Canada, Ottawa, Ontario, Forintek Canada Corp., 189 p. (Special Publication; SP-504E).
- CENTRE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE EN FORESTERIE DE SAINTE-FOY INC. (CERFO). 2011. La coupe progressive irrégulière en réponse à plusieurs enjeux de biodiversité. Notes techniques 2011-01.
- CENTRE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE EN FORESTERIE DE SAINTE-FOY INC. (CERFO). 2007. Sylviculture adaptée aux peuplements mixtes : les coupes progressives irrégulières. CERFO, 4p.
- 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 Products Journal, 44(11/12): 14-20.
- CLOUTIER, A. 2005. Laboratoire d'anatomie du bois avancée SBO-66409, documents de laboratoire, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Hiver 2005.
- COMITÉ CONSULTATIF SCIENTIFIQUE DU MANUEL D'AMÉNAGEMENT FORESTIER. 2002. Coupe avec protection des petites tiges marchandes – Avis scientifique. MRNF, Direction de la recherche forestière, Québec, Qc, 146 p.
- COULOMBE, G., HUOT, J., ARSENAULT, J., BAUCE, E., BERNARD, J.-T., BOUCHARD, A., LIBOIRON, M.A., SZARAZ, G., 2004. Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise. 307 p.
- COWN, D.J. 1980. Radiata pine: Wood age and wood property concepts. New Zealand Journal of Forestry Science 10:504.
- DANG, Q., LIEFFERS, V. 1989. Climate and annual ring growth of black spruce in some Alberta peatlands. Canadian Journal of Botany, 67:1885-1889.
- DAY, R.J., NANANG, D.M. 1997. Principles of thinning for improved growth, yield and economic profitability of lodgepole and jack pine, 1-12 in Proceedings, Commercial Thinning Workshop, Whitecourt, AB. 17-18, Oct. 1996.
- DE KORT, I., LOEFFEN, V., BAAS, P., 1991. Ring width, density and wood anatomy of Douglas fir with different crown vitality. IAWA Bulletin, 12: 453-465.
- DICKSON, R.L., WALKER, J.C.F. 1997. Selecting wood quality characteristics for pines. TIA/IUFRO workshop. Timber management toward wood quality and end-product value. Pages IV.45-IV.50. August 18- 22.

- DONALDSON, L. 2008. Microfibril angle: measurement, variation and relationships – a review. *IAWA Journal*, 29: 345–386.
- DOUCET, R., BOILY, J. 1996. Accroissement quinquennal de peuplements d'épinette noire soumis au dépressage, Sainte-Foy, Québec, Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, 12 p. (Note de recherche forestière; 75)
- DOUCET, R. 1976. Les méthodes de coupe. Service de l'information. Ministère des Terres et Forêts. Gouvernement du Québec. Feuille d'information TFI-4401-2a, 3 p.
- DOWNES, G.M., DREW, D.M., 2008. Climate and growth influences on wood formation and utilization. *Southern Forests*, 70: 155–167.
- DUCHESNE, I., WILHELMSSON, L., SPANGBERG, K. 1997. Effects of in-forest sorting of Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) on wood and fibre properties. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 790–795.
- DUTILLEUL P.; HERMAN M., AVELLA-SHAW, T. 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 56-68.
- FARRAR, J.L. 1995. Trees of the northern United States and Canada, Ottawa, Ontario, Fitzhenry and Whiteside Ltd., 502 p.
- FENTON, N., BESCOND, H., IMBEAU, L., BOUDREAU, C., DRAPEAU, P., BERGERON, Y. 2010. Évaluation sylvicole et écologique de la coupe partielle dans la forêt boréale de la ceinture d'argile. (Chap. 15), Aménagement écosystémique en forêt boréale. Presses de l'Université du Québec. 393-416.
- FENTON, N.J., IMBEAU, L., WORK, T.T., JACOBS, J., BESCOND, H., DRAPEAU, P., BERGERON, Y. 2013. Lessons learned from 12 years of ecological research on partial cuts in black spruce forests of northwestern Québec. *The Forestry Chronicle*, 89(03): 350-359.
- FLEMING, R.L.; MOSSA, D.S., MAREK, G.T. 2005. Upland black spruce stand development 17 years after cleaning and pre commercial thinning. *The Forestry Chronicle* 81: 31-4.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. 2010. Wood Handbook : Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508 p.
- GAGNÉ, L., LAVOIE, L., BINOT, J-M. 2012. Croissance et propriétés mécaniques du bois après éclaircie commerciale dans une plantation d'épinette blanche (*Picea glauca*) âgée de 32 ans. *Canadian Journal of Forest Research*, 42: 291–302.

- GARTNER, B.L. 2006. Predictions of wood structural patterns in trees by using ecological models of plant water relations. In: STOKKE, D.D., Groom, L.H. (Eds.), Characterization of the Cellulosic Cell Wall. Blackwell Publishing, Ames, IA, 274p.
- GINGRAS, J.F., SOTOMAYOR, J. 1992. Wood moisture variation in woodlands inventory: a case study, Pointe- Claire, Québec, Institut Canadien de recherche en génie forestier (FERIC), 6 p. (Technical Note; TN-192).
- GIORDANO, E. 1970. Interaction de la sélection et de la culture intensive. Revue internationale des forêts et des produits forestiers. FAO - L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 24 (97-98).
- GRABNER, M., WIMMER, R., GIERLINGER, N., EVANS, R., DOWNES, G. 2005. Heartwood extractives in larch and effects on X-ray densitometry. Canadian Journal of Forest Research, 35: 2781-2786.
- GREYER, W.A, GILMORE, AR. 1965. Effect of spacing on wood specific gravity in loblolly pine in southern Illinois. Agric. Exp. Stat. Note 113, Urbana, IL: University of Illinois. 5 p.
- GRIGAL, D.F., SUCOFF, E.I. 1966. Specific gravity variation among thirty jack pine plot. Tappi 1, 49: 497-498
- GROOT, A., HORTON, B.J. 1994. Age and size structure of natural and second-growth peatland *Picea mariana* stands. Canadian Journal of Forest Research, 24(2): 225-233.
- GROOT, A., LUSSIER, J.M., MITCHELL, A.K., MACSAAC, D.A. 2005. A silvicultural systems perspective on changing Canadian forestry practices. The Forestry Chronicle, 81: 50-55.
- HARPER, K., BERGERON, Y., GAUTHIER, S., DRAPEAU, P. 2002. Post-fire development of canopy structure and composition in black spruce forests of Abitibi, Quebec: A landscape scale study. Silva Fennica, 36: 249-263.
- HARVEY, B.D., LEDUC, A., GAUTHIER, S., BERGERON, Y. 2002. Stand-landscape integration in natural disturbance-based management of the southern boreal forest. Forest Ecology and Management 155: 369-385.
- HAYGREEN J.G., BOWYER, J.L., SHMULSKY, R. 2007. Forest products and wood science an introduction. Fifth ed. Blackwell Publishing, 558p.
- HEIN, S., WEISKITTEL, A.R., KOHNLE, U. 2008. Effect of wide spacing on tree growth, branch and sapwood properties of young Douglas-fir [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] in south-western Germany. European Journal of Forest Research, 127: 481-493.

- HEINSELMAN, M. 1981. Fire succession in the conifer forests of northern North America. In *Forest Succession: Concepts and application*. Springer-Verlag, New York, 375-405.
- HERNÁNDEZ, R.E.; J. BOULANGER. 1997. Effect of the rotation speed on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter. *Forest Products Journal*, 47(4): 43-49.
- HERNÁNDEZ, R.E.; J. LESSARD. 1997. Effect of cutting width and cutting height on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter. *Forest Products Journal*, 47(3): 89-95.
- HOLLAND, C., REYNOLDS, T. 2005. *Timber Grading and Scanning*. BRE, Watford. BRE Digest, 492p.
- HUANG, C.-L., LINDSTRÖM, H., NAKADA, R., RALSTON, J. 2003. Cell wall structure and wood properties determined by acoustics – a selective review. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61: 321–335.
- JAAKKOLA, T., MAKINEN, H., SARANPAA, P. 2007. Effects of thinning and fertilization on tracheid dimensions and lignin content of Norway spruce. *Holzforschung*, 61(3): 301-310.
- JAAKKOLA, T., MAKINEN, H., SARANPAA, P. 2006. Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation. *Forest Ecology and Management*, 237: 513-521.
- JAAKKOLA, T., MÄKINEN, H., SARANPÄÄ, P. 2005a. Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 1767-1778.
- JAAKKOLA, T., MAKINEN, H., SARÉN, M.-P., SARANPAA, P. 2005b. Does thinning intensity affect the tracheid dimensions of Norway spruce? *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 2685-2697.
- JACK, S.B., LONG, J.N., 1996. Linkages between silviculture and ecology: an analysis of density management diagrams. *Forest Ecology and Management*, 86: 205–220.
- JANAS, P.S.; BRAND, D.G. 1988. Comparative growth and development of planted and natural stands of jack pine. *The Forest Chronicle*, 64 (4): 320-328.
- JANSE-TEN KLOOSTER, S., THOMAS, E.J.P., STERCK, F.J. 2007. Explaining interspecific differences in sapling growth and shade tolerance in temperate forests. *Journal of Ecology*, 95: 1250–1260.
- JESSOME, A.P. 2000. Strength and related properties of woods grown in Canada, Sainte-Foy, Québec, Forintek Canada Corp., 37 p. (Special Publication; SP-514E).

- 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.
- JOHNSON, E. A. 1992. Fire and vegetation dynamics: studies from the North American boreal forest. Cambridge University Press. Great Britain, Cambridge. p. 129.
- JOZSA, L.A., MIDDLETON, G.R. 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: nature et conséquences pratiques. Forintek Canada Corp. 42 p.
- JOSZA, L.A., MIDDLETON, G.R. 1994. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois : nature et conséquences pratiques (publication spéciale sp-34f). Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Québec.
- JYSKE, T. 2008. The effects of thinning and fertilisation on wood and tracheid properties of Norway spruce (*Picea abies*) - the results of long-term experiments. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management.
- KANTOLA, A., HÄRKÖNEN, S., MÄKINEN, H., MÄKELÄ, A. 2008. Predicting timber properties from tree measurements at felling: evaluation of RetroSTEM model and TreeViz software for Norway spruce. Forest Ecology and Management. 255: 3524–3533.
- KASRAOUI, H. 2011. Effets de l'éclaircie commerciale de la fertilisation sur la masse volumique du bois et sur la morphologie des trachéides du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Mémoire de maîtrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 98 pp.
- KARSH, M.B., LAVIGNE, M.B., DONNELLY, J.G. 1994. Growth responses of the balsam fir and black spruce spacing trials, St. John's, Terre-Neuve, Canada, ministère des Ressources naturelles, Service canadien des forêts, Région de Terre-Neuve-et-Labrador, 35 p. (Information Report; N-X-291).
- 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 Bulletin, 11(2): 127-128.
- KELLISON, R.C., PEARSON, R.H. 1985. More plantation wood means quality problems. Forest Industries, 112(9) : 24–26
- KERSHAW, J. A., MAGUIRE, D. A. 2000. Influence of vertical foliage structure on the distribution of stem cross-sectional area increment in western hemlock and balsam fir. Forest Science, 46 (1): 86–94.
- KLEM, G.S. 1968. Quality of wood from fertilized forests. Tappi 1. 51 (11):99-103.
- KOGA S., TSUTSUMI J., ODA K. 1995. Juvenile wood percentages of karamatsu (*Larix leptolepis*). Bulletin of the Kyushu University Forests. 72: 217-227.

- KOGA S., ZHANG, S.Y. 2004. Inter-tree and intra-tree variations in ring width and wood density components in balsam fir (*Abies balsamea*). *Wood Science and Technology*, 38: 149-162.
- KOUBAA, A., ISABEL, N.; ZHANG, S.Y.; J. BEAULIEU, J., BOUSQUET, J. 2005. Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea Mariana* (Mill.) B.S.P.). *Wood and Fiber Science*, 37(3): 445-455.
- KOUBAA, A., S.Y, Z., MAKNI, S. 2002. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of Forest Science*, 59: 511-518.
- KOUBAA, A., ZHANG, S.Y., ISABEL, N., BEAULIEU, J., BOUSQUET. J. 2000. Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce, *Wood and Fiber Science*, 32 (1): 61-71.
- KRZYZEWSKI, J., RALPH, C.D., SPICER, B.G. 1980. Performance of preservative treated fence posts after 43 years of tests, Ottawa, Ontario, Forintek Canada Corp., 34 p.
- LALIBERTÉ, J. 2010. Conséquences de l'éclaircie pré commerciale pour la qualité du bois et la croissance des tiges : Le cas des peuplements mixtes à feuillus intolérants. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Faculté de foresterie, Département des sciences du bois et de la forêt. 55p.
- LAPLANTE, S. 2009. Effet de l'éclaircie pré commerciale et de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale et la qualité du bois de l'épinette noire de la sapinière à bouleau blanc du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi. 61 p.
- LAW, K.N.; 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. pp 3-7.
- LARSON, P.R. 1962. A biological approach to wood quality. *Tappi*. 45 :443-448.
- LEGRIS, J., COUTURE, G. 1999. L'éclaircie pré commerciale au Québec dans un cadre d'aménagement durable des forêts, Québec, ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de l'environnement forestier, 80p.
- LINDSTRÖM, H. 1996. Basic density in Norway spruce. Part III. Development from pith outwards. *Wood Fiber Science*, 28: 391-405.
- LIN, C-J., S-Y. WANG, T-H. YANG, M-J. TSAI, Ming-Jer. 2006. Compressive strength of young *Taiwania* (*Taiwania cryptomerioides*) trees grown with different thinning and pruning treatments. *Journal of Wood Science*, 52: 337-341.

- LIU, C., RUEL, J.C., ZHANG, S.Y. 2007. Immediate impacts of partial cutting strategies on stand characteristics and value. *Forest Ecology and Management*, 250: 148-155.
- LU W., ZHOU Y., GUO L., 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.
- LUSSIER, J.M. 2012. Les coupes partielles en forêt résineuse: les fonctions sylvicoles des coupes partielles. Partenariat innovation forêt, transfert de connaissances [ressource en ligne], <http://www.partenariat.qc.ca/pdf2/OT-59.pdf>. Consulté en février 2012.
- MÄKINEN, H., JAAKKOLA, R., PIISPANEN, R., ET SARANPÄÄ, P. 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, 241: 175-188.
- MÄKINEN, H., HEIN, S. 2006. Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. *European Journal of Forest Research*, 125: 239-248.
- MÄKINEN, H., SARANPÄÄ, P., LINDER, S. 2002a. Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. *Canadian Journal of Forest Research*, 32: 185-194.
- MÄKINEN, H., SARANPÄÄ, P., LINDER, S., 2002b. Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holzforschung*, 56: 449-460.
- MARGUERIE D, BÉGIN Y., COURNOYER L., 2000. Distinction anatomique du bois du mélèze (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch), de l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), et de l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B. S. P.), en vue de l'analyse des macrorestes. *Géographie physique et Quaternaire* 54 (3), 317-325.
- MAYOR, X., RODÀ, F. 1993. Growth response of holm oak (*Quercus ilex* L) to commercial thinning in the Montsen mountains (NE Spain). *Annals of Forest Science*, 50: 247-256.
- MEGRAW, R. A. 1985. Wood Quality Factors in Loblolly Pine: The Influence of Tree Age, Position in Tree, and Cultural Practice on Wood Specific Gravity, Fiber Length, and Fibril Angle. Atlanta, GA, Tappi Press.
- MEGRAW, R.A. 1986. Douglas-fir wood properties. In: Oliver, C.D.H., D. P., Johnson, J.A. (Ed.), Douglas-fir Stand management for the future, College Forest Resources, University of Washington, 81-96.
- MEIER, E. 2012. The Wood Date Base: Black spruce [ressource en ligne], <http://www.wood-database.com/lumber-identification/softwoods/black-spruce/>. Consulté en février 2012.

- 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. 66p.
- MRN (Ministère des Ressources Naturelles). 2013. Ressources et industries forestières - Portrait statistique édition 2013. ISBN 978-2-550-69204-1 (PDF).
- MRNFP (Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune). 2010. Les forêts du Québec: immenses et fascinantes. <http://www.mern.gouv.qc.ca/publications/international/quebec-forets.pdf>
- MRNFP (Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune et des Parcs du Québec). 2003. Manuel d'aménagement forestier (4e édition). Direction des programmes forestiers. ISBN : 2-550-41174-9. Pagination multiple.
- MRNFP (Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec). 1999. Les coupes progressives dans les sapinières du Québec. La foresterie sans détour, série : Traitement des peuplements forestier. Numéro 10, 6 p.
- MRNQ (Ministère des Ressources Naturelles du Québec). 2000. Normes de vérification pour le sondage en forêt: placettes-échantillons permanentes, placettes-échantillons temporaires, points d'observations écologiques (Édition 2000). Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers.
- MOORE, J., ACHIM, A., LYON, A., MOCHAN, S., GARDINER, B. 2009. Effects of early re-spacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber. *Forest Ecology and Management*. 258(7): 1174–1180.
- MÖRLING T. 2002. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. *Annals of Forest Science*, 59: 29-40.
- MORRIS, P.I. 1996. Permeability and durability of major North American softwoods, Vancouver, Colombie-Britannique, Forintek Canada Corp., 2 p. (Infotech).
- MORRIS, D.M.; BOWLING, C.; HILLS, S.C. 1994. Growth and form responses to pre commercial thinning regimes in aerially seeded jack pine stands: 5th year results. *The Forest Chronicle*, 70: 780-787.
- MOLTEBERG, D., HOIBO, O. 2006. Development and variation of wood density, kraft pulp yield and fibre dimensions in young Norway spruce (*Picea abies*). *Wood Science and Technology*, 40: 173-189.
- NYLAND, R.D. 2002. *Silviculture: concepts and applications*. 2e éd., McGraw-Hill Series in Forest Resources, McGraw-Hill, New York, NY, 682 p.

- NYLAND, R.D. 1996. *Silviculture: concepts and applications*. McGraw-Hill, Inc., New York, É.-U.
- O'HARA, K.L. 2001. The silviculture of transformation – a commentary. *Forest Ecology and Management*, 151: 81-86.
- OLIVER, C.D., LARSON, B.C. 1996. *Forest Stand Dynamics*. John Wiley & Sons, New York, É.-U.
- OURAIS, M. 2012. Variations intra-arbres de la largeur du cerne, de la masse volumique du bois et des propriétés morphologiques des trachéides de l'épinette noire (*Picea mariana* (mill.) B.S.P) avant et après traitements sylvicoles. Mémoire de maîtrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 96 pp.
- PANSHIN A.J., DE ZEEUW C. 1980. *Textbook of wood technology*. McGraw-Hill Book Co., New York. 772 pp.
- PAPE, R., 1999. Effects of thinning regime on the wood properties and stem quality of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14: 38-50.
- PAMERLEAU-COUTURE, E. 2010. Impact de trois interventions sylvicoles sur la Croissance et la qualité du bois de l'épinette noire en Forêt boréale. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 98 p.
- PARK, Y.I., KOUBAA, A., SUZANNE, B., MAZEROLLE, M. 2009. Effects of cambial age and stem height on wood density and growth of jack pine grown in boreal stands. *Wood and Fiber Science*, 41(4): 346–358
- PAYETTE, S. 1992. Fire as a controlling process in the North American boreal forest. In *A system analysis of the global boreal forest*. Cambridge University Press, Cambridge, 144-169.
- PELTOLA, H., MIINA, J., ROUVINEN, I., KELLOMAKI, S. 2002. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine. *Silva Fennica*, 36: 813-825.
- POSEY, C.E. 1965. Effects of fertilization upon wood properties of Loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Proceedings of 8th Southern Conference on Forest Tree Improvement*, Savannah, GA, June 16-17, 1965. Committee on Southern Forest Tree Improvement, 24, 126-130.
- RAYMOND, P., BÉDARD, S., TREMBLAY, S., LAROUCHE, C. 2010. La coupe progressive irrégulière, un outil prometteur pour la mise en œuvre de l'aménagement écosystémique au Québec. *Avis de recherche forestière*, n°18.
- RIOPEL, M., BÉGIN, J., RUEL, J.C. 2011. Coefficients de distribution de la régénération, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes appliquées

dans des sapinières et des pessières noires du Québec. *The Forestry Chronicle*, 87: 669-683.

RUEL, J.-C., ROY, V., LUSSIER, J.-M., POTHIER, D., MEEK, P., FORTIN, D. 2007. Mise au point d'une sylviculture adaptée à la forêt boréale irrégulière. *The Forestry Chronicle*, 83: 367-374.

SANDY, L. 2009. Effet de l'éclaircie pré commerciale et de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale et la qualité du bois de l'épinette nomme de la sapinière à bouleau blanc du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Mémoire de maîtrise en ressources renouvelables, l'Université du Québec à Chicoutimi, 61p.

SAVVA, Y., BERGERON, Y., DENNELER, B., KOUBAA, A., TREMBLAY, F. 2008. Effect of interannual climate variations on radial growth of jack pine provenances in Petawawa, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 38: 619-630.

SAVVA, Y., DENNELER, B., KOUBAA, A., TREMBLAY, F.; BERGERON, Y., TJOELKER, M. 2007. Seed transfer and climate change effects on radial growth of jack pine populations in a common garden in Petawawa, Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*, 242: 636-647.

SCHÜTZ, J.P. 1997. *Sylviculture 2: La gestion des forêts irrégulières et mélangées*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse.

SEYMOUR, R.S., HUNTER, M.L. Jr., 1999. Principles of ecological forestry. In *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 22-61.

SHEEDY, G., BERTRAND, V. 1997. Résultats de 10 ans concernant les éclaircies en ligne réalisées dans les plantations de la forêt de Drummondville. Ministère des Ressources naturelles. Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 77. 20p.

SMITH, D.M., LARSON, B.C., KELTY, M.J., ASHTON, P.M.S. 1997. *The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology*. 9ième édition. Wiley, NY, 537 p.

SMITH, D.M. 1986. *The practice of silviculture*. 8ième édition., John Wiley & Sons, New York, N.Y., 578 p.

STAMM, A.J. 1970. Maximum effective pit pore radius of the heartwood and sapwood of six softwoods affected by drying and soaking. *Wood and Fiber Science*, 1(4): 263-269.

THEWOODEXPLORER.COM. 2006. Species data: Black spruce (*Picea mariana*). [ressource en ligne], <http://www.thewoodexplorer.com/maindata/we898.html>.

- THIFFAULT, N.; ROY, V.; PRÉGENT, G.; CYR, G. ; JOBIDON, R. MÉMÉTRIER, J. 2003. La sylviculture des plantations résineuses au Québec. *Le naturaliste canadien*, 27 (1) : 63-80.
- TIGNER, DANIEL. Atlas des arbres de l'Ontario : Épinette noire (*Picea mariana*). [ressource en ligne], <http://www.mnr.gov.on.ca/fr/Business/ClimateChange/2ColumnSubPage/268199.html>
- TROTTIER, F., LEBLOND, J., LEMIEUX, E., JONCAS, C. 2011. Guide de visualisation et vulgarisation des traitements sylvicoles [ressource en ligne], Projet Le Bourdon, <http://www.notreforet.com/files/file/Guide%20de%20vulgarisation%20et%20de%20visualisation%20des%20traitements%20sylvicoles.pdf>
- TUULA, J. 2008. The effects of thinning and fertilisation on wood and tracheid properties of Norway spruce (*Picea abies*) -The results of long-term experiments' Dissertations Forestales 55 ,55.59 p. Finnish Society of Forest Science Unioninkatu 40A, FI-00 170 Helsinki, Finland.
- VALINGER, E., ELFVING, B., MÖRLING, T. 2000. Twelve-year growth response of Scots pine to thinning and nitrogen fertilisation. *Forest Ecology and Management*, 134: 45-53.
- VAN DER KELLEN, G., LESSARD, G. 2004. Entre les coupes progressives et le jardinage par trouées : le cas des coupes progressives irrégulières, synthèse de littérature [ressource en ligne], Le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO), www.cerfo.qc.ca/index.php?id=22&no_cache=1&tx...159.
- VIA, B.K., STINE, M., SHUPE, T.F., CHI-LEUNG, S., GROOM, L. 2004. Genetic improvement of fiber length and coarseness based on paper product performance and material variability – a review. *IAWA Journal*, 25: 401–414.
- VIERECK, L.A., JOHNSTON, W.F. 1990. *Picea mariana* black spruce , dans R.M. Burns et B.H. Honkala, éd., *Silvics of North America, Volume 1 : Conifers*, Washington, D.C., United States, Department of Agriculture, 238-249. (Agriculture Handbook; 654)
- VINCENT, M. 2011. Impact des éclaircies commerciales sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire (*Picea mariana* (mill.) BSP) en forêt boréale. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 200p.
- VINCENT, M., KRAUSE, C., ZHANG, S. Y. 2009. Radial growth response of black spruce roots and stems to commercial thinning in Boreal forest. *Forestry* 82: 557-571.
- WANG, T., AITKEN, S.N., ROZENBER, G P., MILLIE, F. 2000. Selection for improved growth and wood density in lodgepole pine: effects on radial patterns of wood variation. *Wood Fiber Science*, 32(4): 391-403.

- WARD, D., GARDINER, J.J. 1976. The influence of spacing on tracheid length and density in Sitka Spruce. *Irish-Forestry*, 33(1): 39-56.
- WEBER, M.G., FLANNIGAN, M.D. 1997 Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impact on fire regimes. *Environmental Reviews*, 5: 145-166.
- WIMMER, R., DOWNES, G.M., EVANS, R. 2002. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. *Tree Physiology*, 22: 449–457.
- YANG, J.J., LU, H.J. 1997. Wood density, mechanical properties and their conversion. *China Wood Industry* 11: 35-38.
- YANG, K.C., HAZENBERG, G. 1994. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana*. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 996-1007.
- YOUNGBERG, C.T.; WALKER, L.E.; HAMILTON, J.R., WILLIAMS, R.F., 1963. Fertilization of slash pine. *Cano Forest Research. Council. Pap. Macon Vol 17*.
- ZAHNER, R., WHITMORE, F.W. 1960. Early growth of radically thinned loblolly pine. *Journal of Forestry*. 58: 628-634.
- ZAVITKOVSKI, J., DAWSON, D.H. 1978. Structural and biomass production of 1-to 7-year-old intensively cultured jack pine plantations in Wisconsin. *USDA Forest Service, North Cent. For. Exp. Sta. Res. Pap NC-157.15p*.
- ZHANG, S.Y. 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories, *Wood Science and Technology*, 29 (6): 451-465.
- ZHANG, T.; CHAURET, G.; DUCHESNE, I.; SCHNEIDER, R. 2012. Transfert de connaissances : Maximisation de la valeur du pin gris. *Fiches techniques du partenariat innovation forêt [ressource en ligne]*, <http://www.partenariat.qc.ca/pdf2/OT-02.pdf>, consulté en avril 2012.
- ZHANG, S.Y.; CHAURET, G. ; REN, H.Q.; DESJARDINS, R. 2002. Impact of plantation black spruce initial spacing on lumber grade yield, bending properties and MSR yield. *Wood Fiber Science*, 34 (3): 460–475.
- ZHANG, S.Y., CHAURET, G. 2001. Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (*Picea mariana*). *Canadian Forest Service Report. Vol 35. Forintek Canada Corp. 47p*.

- ZHANG, S.Y., CHAURET, G., 2000. Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce, Sainte-Foy, Québec, Forintek Canada Corp., 40p.
- ZHANG, S.Y. 1997. Wood quality: its definition, impact and implications for value-added timber management and end uses. Part I: its definition and impact. In Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value.
- ZHANG, S.Y., KOUBAA, A. 2009. Les résineux de l'Est du Canada: Écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. FPIInnovations (ed) Publication spéciale—SP-526F, 400p.
- ZHANG, S.Y., GOSSELIN, R., CHAURET, G. 2000. Wood quality: its definition, impact and implication for value-added timber management and end uses. Timber management toward wood quality and end product value. Proceeding of CTIA/IUFRO international wood quality workshop, Québec City, Canada. 1997
- ZHANG, S.Y., SIMPSON, D., 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 Science, 28: 91-99.
- ZHANG S.Y., FUJIWARA S., BAAS, P. 1992. Hardwood density in relation to fibre morphology and tissue proportions. IAWA Bulletin, 13(3): 266-267.
- ZOBEL, B.J., VAN BUIJTENEN, J.P. 1989. Wood Variation – Its Causes and Control. Springer Verlag, Berlin, 363p.
- ZUBIZARRETA GERENDIAIN, A., PELTOLA, H., PULKKINEN, P., JAATINEN, R., PAPPINEN, A., KELLOMÄKI, S. 2007. Differences in growth and wood property traits in cloned Norway spruce (*Picea abies*). Canadian Journal of Forest Research, 37(12): 2600–2611.