

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE

EFFET DES COUPES PARTIELLES SUR LA LARGEUR DES CERNES, LA MASSE VOLUMIQUE
DU BOIS ET LES PROPRIÉTÉS ANATOMIQUES DES TRACHÉIDES DE L'ÉPINETTE BLANCHE
(*PICEA GLAUCA* [MOENCH] VOSS) DANS UN PEUPEMENT MIXTE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

EXTENSIONNÉE

DE

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR

ZAHIA AIT SI SAID

AVRIL 2017



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

Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur, le professeur Ahmed Koubaa pour l'opportunité qu'il m'a offerte de travailler avec lui et pour tous les efforts qu'il a fournis dans la supervision de ces travaux. Je tiens particulièrement à le remercier pour sa générosité et sa patience. Je remercie également mon codirecteur, le professeur Brian Harvey pour le soutien et l'encadrement qu'il n'a cessé de m'apporter. Mes sincères gratitude vont à Ahmed et à Brian pour avoir cru en moi et m'encourager tout au long de ma maîtrise.

Merci à Jean-Marc Saint-Armant (anciennement de Tembec) et Yvon Grenier (anciennement de l'UQAT) pour leur travail dévoué dans le lancement du projet et l'établissement des expériences de récolte partielle. Je suis reconnaissante de plusieurs professeurs, dont les professeures Suzanne Brais et Nicole Fenton et le professeur Osvaldo Valeria pour leur soutien dans de nombreux aspects du projet de ma maîtrise. Je suis redevable au Dr. Besma Bouslimi et au Dr. Cyriac Mvolo ainsi qu'à Jessica Smith, Dr. Louiza Moussaoui, William Marchand et à Joëlle Castonguay pour m'avoir fourni des conseils et une aide précieuse dans de nombreuses facettes de ma maîtrise. Je voudrais remercier également les techniciens de laboratoire : Gilles Villeneuve et Williams Belhadef. Un vif merci s'adresse à mes collègues étudiants, avec une pensée particulière pour Marouan, Fatma, Fedy, Sara, Nahla, Ahmed, Lili, Victor, Mohamed, Morgane, Dalenda, Emna et Dominique.

Un grand merci à mon époux Fahim Meziane, mes parents Younes et Malika Ait Si Said et à mes beaux-parents Cherif et Ferroudja Meziane, pour leur soutien moral nécessaire et l'encouragement de longue durée. Merci à ma sœur Radia et à mes frères Karim et Yazid Ait Si Said, merci également à mes belles-sœurs et mes beaux-frères. Merci aux nombreux amis de l'UQAT qui ont aidé cette jeune fille algérienne à s'adapter et à s'intégrer à la vie universitaire au Québec.

AVANT PROPOS

Le présent travail a été réalisé sous la direction de M. Ahmed Koubaa Ph.D., professeur chercheur à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), titulaire de la chaire de recherche du Canada sur la valorisation, la caractérisation et la transformation du bois. La codirection était assurée par M. Brian Harvey Ph.D., professeur en écologie forestière appliquée et sylviculture à l'UQAT, chercheur attaché à la Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQÀM en aménagement forestier durable.

Ce document a été préparé sous la forme d'un mémoire classique. Il a été conçu pour respecter les critères de présentation en vigueur dans le cadre des programmes de deuxième cycle en sciences biologiques de l'Université du Québec à Montréal. Outre l'introduction générale, le mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Le chapitre 2 de la revue de littérature regroupe le contexte et la problématique ainsi que des éléments de la revue de littérature; Le chapitre 3 est consacré à l'approche méthodologique ainsi qu'une description des objectifs et des hypothèses. Le chapitre 4 présente les résultats et la discussion. Le chapitre 5, la conclusion générale considère les implications pratiques des résultats et quelques perspectives découlant de cette étude.

Mise à part l'expérience de coupes partielles dans des peuplements mélangés et la collecte d'échantillons d'épinettes blanches réalisée dans le cadre de cette étude, les analyses anatomiques et physiques ont été entièrement réalisées dans les laboratoires de la Chaire de recherche du Canada sur la Valorisation, la Caractérisation et la Transformation du Bois.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTES DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES.....	XIV
RÉSUMÉ	XVI
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE II	
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
2.1 Contexte et problématique.....	5
2.1.1 Étendue et importance de la forêt boréale mixte	5
2.1.2 Aménagement écosystémique.....	6
2.1.3 Importance de la coupe partielle dans l'aménagement écosystémique ..	8
2.2 Le bois et ses particularités.....	10
2.2.1 Le bois : un matériau biologique	10
2.2.2 Le bois : un matériau anisotrope.....	13
2.2.3 Le bois : un matériau hétérogène	14
2.3 Qualité du bois.....	17
2.3.1 Variabilité physiologique.....	18
2.3.1.1 Croissance radiale (accroissement annuel)	18
2.3.1.2 Caractéristique physique	20
2.3.1.3 Caractéristiques anatomiques.....	23
2.3.2 Relation entre l'accroissement annuel et la qualité du bois.....	24
2.3.3 Variabilité due aux coupes partielles	26
CHAPITRE III	
APPROCHE MÉTHODOLOGIE.....	30

3.1	Objectifs et hypothèses	30
3.2	Aire d'étude	31
3.2.1	Dispositif expérimental.....	33
3.2.2	Échantillonnage	33
3.3	Analyse des données.....	36
3.3.1	Mesure des propriétés physiques et anatomiques	36
3.3.1.1	Mesure de la largeur et de la masse volumique du cerne.....	36
3.3.1.2	Mesure des propriétés anatomiques	39
3.3.2	Résumé de l'approche méthodologique.....	45
3.4	Analyses statistiques.....	47
CHAPITRE IV		
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		50
4.1	Statistiques descriptives.....	50
4.2	Variations intra-arbres des propriétés physiques et anatomiques du bois	53
4.2.1	Variation radiale et longitudinale de la largeur des cernes	53
4.2.2	Variation radiale et longitudinale de la masse volumique du cerne	57
4.2.3	Variation radiale et longitudinale de la morphologie des trachéides....	61
4.3	Effet des coupes partielles	65
4.3.1	Croissance radiale (largeur du cerne)	65
4.3.2	Masse volumique	71
4.3.3	Morphologie des trachéides	76
CHAPITRE V		
CONCLUSIONS GÉNÉRALES		86
5.1	Récapitulatif.....	86
5.2	Implications pratiques et industrielles	87
5.3	Limites et perspectives	88
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE		90

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Différenciation des cellules du xylème et du phloème à partir de la zone cambiale.....	11
2.2 Section transversale de la zone cambiale (CZ) chez le pin maritime (<i>Pinus pinaster</i>), montrant : F- une initiale fusiforme, R- une initiale de rayon, CZ- la zone cambiale, X- la différenciation centripète de la CZ en xylème et P- la différenciation centrifuge de la CZ en phloème. La flèche vide montre une récente division anticlinale et la flèche pleine montre une récente division périclinale.....	12
2.3 Axes et plans naturels d'observations	13
2.4 A. Différentes échelles d'observation d'un bois de résineux d'après. B. Échelle d'observation dans le cadre de cette étude.	15
2.5 Transition et dimension des cellules du bois initial au bois final chez le pin noir (<i>Pinus nigra</i> Var. <i>Laricio</i>).....	16
2.6 A. Représentation tridimensionnelle d'un plan ligneux. B. Structure d'une trachéide d'un résineux.....	16
2.7 Variation radiale des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final.....	20
2.8 Variation radiale de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final.....	22
3.1 A. Localisation du site expérimental. B. Dispositif expérimental.	32

3.2	A. Densitomètre à rayon X et B. Exemple d'un échantillon scanné par le densitomètre. C. Point de transition du bois initial au bois final selon la méthode de point d'inflexion au niveau d'un cerne chez le bois de l'épinette blanche.....	38
3.3	A. Découpage longitudinal d'éclipse de bois. B. Trachéides macérées du bois de l'épinette blanche. C. Analyseur de la qualité de la fibre cellulosique <i>le Kajaani FS300 de Metso®</i>	41
3.4	A. Microscope optique et une image d'une coupe mince analysée avec WinCell (<i>Regent Instrument Inc.</i>). B. Microtome (<i>Thermo scientific TM HM325</i>) et un exemple d'une coupe mince sur le plan transversal du bois de l'épinette blanche montée sur une lame	44
3.5	Sommaire de l'approche méthodologique	46
4.1	Variation des largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche en fonction de l'âge cambial au DHP	54
4.2	Variation longitudinale des composantes de la largeur moyenne du cerne du bois de l'épinette blanche selon l'âge cambial : A. Largeurs moyennes du cerne et de ses composantes (les barres représentent les écarts-types) ; B. Largeur moyenne du cerne ; C. Largeur moyenne du bois initial (BI) ; D. Largeur moyenne du bois final (BF). * hauteurs relatives par rapport à la hauteur totale de l'arbre.	56
4.3	Variation des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche en fonction de l'âge cambial au DHP.....	59
4.4	Variation longitudinale de la masse volumique moyenne du bois de l'épinette blanche : A. Masses volumiques moyennes du cerne et de ses composantes en fonction des hauteurs relatives ; B. Masse volumique	

	moyenne du cerne, C. Masse volumique du bois initial, D. Masse volumique moyenne du bois final en fonction de l'âge cambial	60
4.5	Variation des dimensions des trachéides du cerne et de ses composantes chez l'épinette blanche en fonction de l'âge cambial. A. Variation radiale de la longueur des trachéides. B. Variation radiale du diamètre des trachéides selon l'âge cambial au DHP.	62
4.6	Variation longitudinale de la longueur moyenne des trachéides de l'épinette blanche : A. Longueur moyenne des fibres du cerne et de ses composantes en fonction des hauteurs ; B. Longueur moyenne des fibres du cerne, C. Longueur moyenne des fibres du bois initial, D. Longueur moyenne des fibres du bois final en fonction de l'âge cambial.....	63
4.7	Variation longitudinale du diamètre moyen des trachéides de l'épinette blanche : A. Diamètre moyen des fibres du cerne et de ses composantes, B. Diamètre moyen des fibres du cerne, C. Diamètre moyen des fibres du bois initial, D. diamètre moyen des fibres du bois final en fonction de l'âge cambial à différentes hauteurs	64
4.8	Effet des coupes partielles sur la croissance radiale du cerne de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.	69
4.9	Effet des coupes partielles sur A. Croissance radiale du bois initial (BI) et B. Croissance radiale du bois final (BF) de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.....	70
4.10	A. Largeur du bois final de l'épinette blanche après la récolte de 100 % de [ST] de feuillu récoltée par rapport à B. Largeur du bois final à 0 % [ST] de feuillu récoltée. Grossissement 100x.	71
4.11	Effet des coupes partielles sur A. Croissance et B. Masse volumique du cerne de l'épinette blanche en fonction de la hauteur dans l'arbre.....	73

4.12	Effet des coupes partielles sur la masse volumique du cerne de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.	74
4.13	Effet des coupes partielles sur A. Masse volumique du bois initial et B. Masse volumique du bois final de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.	75
4.14	Effet des coupes partielles sur A. Longueur et B. Diamètre des trachéides du cerne de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.	77
4.15	Masse volumique moyenne du cerne en relation avec l'épaisseur moyenne de la paroi cellulaire de l'épinette blanche en fonction des coupes partielles.....	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
3.1 Caractéristiques des 12 unités expérimentales (PEX)	34
3.2 Caractéristiques de l'épinette blanche échantillonnées en 2012 dans la forêt mixte	35
3.3 Caractéristiques des arbres de l'épinette blanche analysés au WinCell	43
3.4 Détails des réalisations au laboratoire	45
4.1 Valeurs moyennes et coefficients de variation (% entre parenthèses) des longueurs et du diamètre des trachéides du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche pour tous les traitements, les hauteurs des trois classes sociales.....	51
4.2 Valeurs moyennes et coefficients de variation (% entre parenthèses) des largeurs, des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche pour tous les traitements, les hauteurs et les cernes des trois classes sociales	52
4.3 Valeurs moyennes ajustées plus ou moins l'écart type de l'épaisseur des parois cellulaires (ÉPC), de largeur de bois final et de la masse volumique du cerne de l'épinette blanche en fonction des différentes intensités de coupes partielles.....	79
4.4 Résultats de l'analyse de variance des effets fixes valeurs de F (valeur de p entre parenthèses) sur la largeur et la masse volumique du cerne ; du bois	

- initial et du bois final ; et sur la longueur et le diamètre des trachéides du cerne et de ses composantes de l'épinette blanche.80
- 4.5 Largeur moyenne (mm) du cerne et de ses composantes, des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O) des épinettes blanches, avant (Av) et après (Ap) traitement ; et largeur moyenne du cerne et de ses composantes après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée (Numéro avec la même lettre majuscule, en colonne, sont statiquement non différents à 0,05. Numéro avec lettre minuscule, en ligne, sont statiquement non différent à 0,05).81
- 4.6 Masse volumique moyenne (kg m^{-3}) du cerne et de ses composantes, des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O) des épinettes blanches, avant (Av) et après (Ap) traitement ; et masse volumique du cerne et de ses composantes après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée (Numéro avec la même lettre majuscule, lu en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05. Numéro avec lettre minuscule, lu en ligne, sont statistiquement non différent à 0,05).82
- 4.7 Longueur moyenne (mm) des fibres du cerne et de ses composantes, des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O) des épinettes blanches, avant (Av) et après (Ap) traitement ; et longueur moyenne des fibres du cerne et de ses composantes après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée (Numéro avec la même lettre majuscule, lu en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05. Numéro avec lettre minuscule, lu en ligne, sont statistiquement non différent à 0,05).83
- 4.8 Diamètre moyen (μm) des fibres du cerne et de ses composantes, des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O) des épinettes

- blanches, avant (Av) et après (Ap) traitement ; et diamètre moyen des fibres du cerne et de ses composantes après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée (Numéro avec la même lettre majuscule, lu en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05. Numéro avec lettre minuscule, lu en ligne, sont statistiquement non différent à 0,05).84
- 4.9 Épaisseur moyenne de la paroi cellulaire (ÉPC) (μm) des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O), avant (Av) et après (Ap) les différentes intensités de coupe partielle (Numéro avec la même lettre majuscule, lu en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05)85

LISTES DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Ap	Après coupe partielle
Av	Avant coupe partielle
BF	Bois final
BI	Bois initial
Co	Codominants
CP	Coupe partielle
CPRS	Coupe avec protection de la régénération et des sols
CS	Classe sociale
CV	Coefficient de variation
CZ	Zone cambiale
D	Diamètre des fibres
D	Dominant
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
ÉPC	Épaisseur des parois cellulaires
H	Hauteur
L	Largeur du cerne
L _f	Longueur des fibres
L _N	Longueur moyenne arithmétique

LR	longitudinal radial
LT	Longitudinal tangentiel
L _w	Longueur moyenne pondérée selon la longueur
L _{ww}	Longueur moyenne pondérée selon le poids
Max.	Maximum
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Min.	Minimum
Moy.	Moyenne
MRN	Ministère des ressources naturelles
MV	Masse volumique
O	Opprimé
OIFQ	Ordre des ingénieurs forestiers du Québec.
OSB	Panneaux à lamelles orientées (<i>Oriented Strand Lumber</i>)
P	Phloème
PEP	Placette d'échantillon permanente
PEX	Parcelle expérimentale
QMS	Quintek Measurements System
RT	Radial tangentiel
ST	Surface terrière
T	Temps
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
X	Xylème

RÉSUMÉ

L'aménagement des forêts mixtes pose un défi de taille pour les aménagistes forestiers, parce qu'ils doivent tenir compte de la complexité de leur composition et de leur dynamique et du fait que toutes les essences n'ont pas la même valeur, voire intérêt, pour l'industrie de transformation. C'est dans ce contexte que de nouvelles stratégies dont les coupes partielles se sont développées. Les coupes partielles peuvent être prescrites pour plusieurs raisons : favoriser l'implantation de la régénération naturelle, maintenir un habitat faunique convenable ou bien prendre en compte des considérations esthétiques. On peut aussi avoir pour but l'amélioration de la croissance et le maintien ou même l'amélioration de la qualité du bois et de la valeur des produits.

Dans le cadre de la présente étude, nous avons évalué l'effet de différentes intensités de coupes partielles, concentrées principalement sur le prélèvement d'essences feuillues, sur la croissance radiale et sur des attributs de la qualité du bois d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench.) Voss). À cette fin, 10 ans après les coupes partielles à différentes intensités dans des peuplements mixtes situés en Abitibi, Québec, 72 arbres résiduels d'épinette blanche de taille marchande ont été abattus. Des sections de troncs ont été prélevées pour évaluer l'influence, à l'échelle du cerne et de la cellule, de la hauteur et de la classe sociale de l'arbre (dominant, codominant, opprimé), de l'intensité et du temps depuis la coupe partielle sur la croissance radiale, la masse volumique du bois et sur la longueur et le diamètre des trachéides et l'épaisseur des parois cellulaires.

Les résultats de densitomètre à rayon X et d'analyse de la qualité des fibres ont permis d'établir les patrons de variations radiales et longitudinales des composantes de la largeur, de la masse volumique du cerne; et de la longueur et de la largeur des trachéides du bois de l'épinette blanche. Ils ont montré une très grande variation radiale de la largeur, de la masse volumique des cernes et de la morphologie des trachéides, particulièrement dans le bois juvénile. La variation radiale de la masse volumique du bois de l'épinette blanche se caractérise par une diminution initiale depuis la moelle jusqu'à la zone de transition du bois juvénile au bois mature (entre 20 et 30 ans), suivie d'une légère augmentation et finalement d'un plateau constant aux alentours de 450 kg m⁻³. La masse volumique moyenne était de 451,41 kg m⁻³ avec un coefficient de variation de 10 % entre les trois classes sociales. La masse volumique du bois final de l'épinette blanche était plus dense de 42 % que celle du bois initial. De plus la masse volumique de bois de l'épinette blanche en Abitibi Témiscamingue était 27,8 % plus

dense que celle rapportée précédemment dans d'autres régions du Québec. La largeur du cerne augmente durant les premières années (7ans) puis diminue de son maximum pour atteindre son minimum dans la zone de transition (30ans) ou elle augmente légèrement par la suite. La variation de la largeur moyenne du cerne était très importante, avec une moyenne de 1,83 mm et un coefficient de variation de 62% entre les classes sociales de l'arbre. La longueur et le diamètre des trachéides ont montré une variation radiale caractérisée par une augmentation constante de la moelle vers l'écorce avec une moyenne de 2,3 mm, 22 μ m respectivement, et un coefficient de variation de 24%, 13% respectivement.

L'effet des coupes partielles sur la croissance radiale est significatif, mais varie d'une année à l'autre après traitement et selon la position sur la tige. De la même façon, l'effet des coupes partielles sur la masse volumique et les dimensions de la fibre varie selon le temps après coupe et la hauteur sur la tige, mais n'a pas d'implications pratiques sur la qualité du bois. Une augmentation de la croissance a été observée seulement à la suite du traitement extrême (100 % de tremble récolté). En termes de croissance relative, les arbres opprimés ont eu la plus grande hausse de croissance annuelle. Comparativement aux arbres témoins, les taux de croissance radiale annuelle ont été supérieurs de 14,2 % pour les dominants, 32,7 % pour les codominants et 57,4 % pour les arbres supprimés, au cours de 10 ans suivant le traitement. Ce même traitement a induit l'augmentation de la masse volumique, de la proportion du bois final et de l'épaisseur de la paroi cellulaire toute classe sociale confondue, et ce, au cours des premières années suivant le traitement, puis l'effet s'est estompé. Comparativement aux arbres témoin, le taux de la hausse a été de 4 % pour la masse volumique annuelle, de 40 % pour le bois final et de 20 % pour l'épaisseur de la paroi cellulaire après la récolte de 100 % de la [ST] de feuillu, ceci toutes classes sociales confondues. La coupe partielle n'a pas eu d'effet sur le diamètre des trachéides, mais en a diminué leur longueur ; cet effet est sans implication pratique.

Nos résultats suggèrent que, dans des conditions semblables, un prélèvement relativement intensif de la strate dominante de tremble favoriserait un accroissement plus important des tiges résiduelles d'épinette blanche et un maintien voire même une amélioration de certains attributs de la qualité du bois.

MOTS-CLÉS : Épinette blanche, coupes partielles, croissance radiale, masse volumique du bois, propriétés anatomiques, qualité du bois.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La zone de la forêt boréale mixte est une importante source d’approvisionnement de matière ligneuse au Canada. Elle est caractérisée par des peuplements mélangés d’espèces résineuses et feuillues commerciales (épinettes, pins, sapins, bouleaux et peuplier), considérées parmi les plus productifs de la forêt boréale (MFFP, 2015). Tandis que la productivité élevée des peuplements mélangés constitue une opportunité importante de production pour l’industrie forestière, ces peuplements présentent aussi un défi de taille sur le plan d’aménagement, entre autres, par la complexité de leur composition et leur dynamique et par le fait que toutes les essences n’ont pas la même valeur, voire intérêt, pour l’industrie de transformation (Forrester, 2014).

À travers le monde, les objectifs de l’aménagement des territoires forestiers et des pratiques sylvicoles ne cessent d’évoluer et de changer (Rowe, 1994 ; Kimmins, 1995). L’aménagement écosystémique constitue un nouveau paradigme de la foresterie, particulièrement en Amérique du Nord ; un des principes de l’approche écosystémique veut que les interventions sylvicoles s’inspirent ou tentent de reproduire les patrons des perturbations naturelles et de la dynamique naturelle des peuplements (Bergeron et Harvey, 1997 ; Seymour et Hunter, 1999 ; Bergeron *et al.*, 2002). Depuis le début de la mécanisation de l’exploitation forestière au Québec dans les années 1950 et 1960, la forêt boréale a été essentiellement récoltée par des variantes de coupes totales comme la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS). Adoptée et généralisée en forêt boréale québécoise suite au changement du régime forestier en 1986, la 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).

Une proposition pour réduire les écarts entre les mosaïques forestières naturelles et aménagées et, par la même stratégie, protéger 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 les peuplements mélangés, la coupe partielle permettrait de créer et de maintenir leur composition mixte tout en exploitant les espèces selon l'autoécologie de chacune. Les coupes partielles pourraient donc constituer une pratique sylvicole qui permet de favoriser à la fois un approvisionnement en fibres et le maintien de la biodiversité.

On peut appliquer des coupes partielles pour plusieurs raisons : augmenter l'accroissement des arbres résiduels, favoriser l'implantation de la régénération naturelle, maintenir un habitat faunique convenable ou bien prendre en compte des considérations sociales. Les coupes partielles peuvent augmenter la croissance des arbres résiduels par la réduction de la compétitivité entre les individus rémanents d'un peuplement. Cependant, l'évidence des effets des coupes partielles sur la qualité du bois et sur les propriétés de la fibre demeure peu documentée et, parfois, ambiguë ou contradictoire (Alteyrac, 2005).

D'ailleurs, les effets peuvent varier d'une espèce à une autre. Pour l'épinette blanche, il y a un manque de connaissance quant à l'effet réel des coupes partielles sur la croissance et les répercussions sur les propriétés physiques et anatomiques. L'épinette blanche est une espèce candidate de haut niveau parmi les essences pour la qualité de sa fibre à cet égard, l'acquisition de connaissances sur les effets des coupes partielles est plus que pertinente.

De par son origine biologique, le bois est un matériau hétérogène dont la qualité est définie en fonction de son adéquation à un usage bien déterminé. La qualité du bois fait interagir plusieurs domaines de recherche. Elle constitue le reflet de l'ensemble des caractéristiques physico-mécaniques, structurelles et chimiques. La qualité du bois est dictée par la biosynthèse du bois, qui dicte les modalités et les variations de sa structure multi-échelle (dimension et proportion des cellules constitutives, arrangements et organisations des tissus cellulaires, ainsi que la composition chimique), et par les conditions environnementales (Zobel et Van Buijtenen, 1989). Il convient donc d'étudier l'épinette blanche afin de comprendre et d'évaluer l'impact des coupes partielles sur la variabilité de la qualité de son bois.

En effet, peu d'études portent sur l'impact des coupes partielles sur la qualité du bois en général et en particulier sur le bois de l'épinette blanche, une essence qui de par sa valeur économique, représente une ressource ligneuse très importante pour les industries de pâte à papier et de bois d'œuvre.

À notre connaissance, très peu d'études ont documenté l'évolution des propriétés physiques (Gagné *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2016)) et aucune les propriétés anatomiques à une échelle aussi réduite, cerne et ses composantes, dans les deux sens : radial (de la moelle vers l'écorce) et longitudinale (de la base vers le sommet de l'arbre) en fonction des différentes classes sociales à la suite de coupes partielles dans les peuplements mixtes boréaux. Gagné *et al.*, (2012) rapportent l'impact d'une éclaircie commerciale sur le taux de croissance et la masse volumique de l'épinette blanche. Selon ces mêmes auteurs, le meilleur résultat, en termes de rendement, a été observé après l'application d'éclaircie à intensités intermédiaires. De plus, ils remarquent que la masse volumique a été maintenue. Smith *et al.*, (2016) sont parmi les rares chercheurs qui ont investigué l'effet des coupes partielles sur la croissance de l'épinette blanche. Ces auteurs rapportent que seule une coupe partielle de forte intensité a

augmenté la croissance radiale et volumétrique de l'épinette blanche, toutes classes sociales confondues.

C'est dans ce contexte qu'en 2001, un partenariat impliquant Tembec Industries Inc. et des chercheurs de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) ont établi un dispositif sylvicole expérimental visant à tester l'effet de différentes intensités de prélèvement du peuplier faux-tremble mature (0 %, 50 %, 60 % et 100 % de la surface terrière) dans des peuplements mélangés, sur la croissance, la qualité et les propriétés du bois des tiges résiduelles d'épinette blanche.

Notre étude donne suite à celle de Smith *et al.*, (2016) qui s'est penchée sur l'étude de la croissance radiale et volumétrique de l'épinette blanche dans la forêt mixte du Québec. Notre objectif principal est de déterminer l'effet des coupes partielles sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette blanche.

CHAPITRE II

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Contexte et problématique

2.1.1 Étendue et importance de la forêt boréale mixte

La forêt boréale couvre 90 % des terres boisées au Canada, couvrant le pays de la Colombie-Britannique et le territoire du Yukon à Terre-Neuve (Inventaire forestier national, 2015). La forêt boréale mixte ou mélangée, aussi appelée la zone thermo-boréale représente 16 % de la couverture forestière totale au Canada (Inventaire forestier national, 2015). Au Québec, on associe la forêt boréale mixte au domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc et la forêt tempérée mixte au domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (Saucier *et al.*, 2009). Ces territoires constituent une zone de transition entre la forêt feuillue au sud, dominée par l'érable à sucre et la forêt résineuse au nord dominée par la pessière à mousse. Les peuplements mélangés de la sapinière à bouleau blanc se situent approximativement entre le 48° et le 49° degré de latitude au Nord. Dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, au nord-ouest du Québec, des peuplements mélangés sont bien répandus et composés principalement d'essences feuillues intolérantes à l'ombre, spécifiquement les peupliers faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) et baumier (*Populus balsamifera* L.) et le bouleau blanc (*Betula papyrifera*), et d'essences résineuses plus tolérantes,

dont le sapin baumier (*Abies balsamea*) (L.) Mill. et les épinettes blanches (*Picea glauca* (Moench.) Voss) et noires (*Picea mariana*) (Bergeron et Harvey, 1997).

La forêt mixte du Québec jouit d'une importance sociale, écologique et économique (Paquette et Messier, 2011). En effet, elle est un lieu privilégié pour des activités récréatives de toutes sortes, qui reposent en grande partie sur la beauté de ses paysages. Sur le plan écologique, la composition de la forêt mixte joue un rôle important dans le maintien de la biodiversité, de l'habitat pour la faune, des cycles biogéochimiques et de la séquestration du carbone. De plus, la productivité élevée des peuplements mélangés du Québec constitue une source d'approvisionnement cruciale, où l'industrie forestière peut combler ses besoins variés et de qualité. Il est, ainsi, nécessaire de préserver la biodiversité et la composition des peuplements mixtes afin de conserver toutes leurs fonctions (Man et Lieffers, 1999).

2.1.2 Aménagement écosystémique

Depuis 1992, la sylviculture des peuplements mélangés est inscrite au Manuel d'aménagement forestier du Québec (MRN, 1992). « La gestion et l'utilisation des terres forestières du domaine de l'État doivent se faire de façon à maintenir la diversité biologique, la productivité, la capacité de régénération, la vitalité et le potentiel de remplir leurs fonctions écologiques, économiques et sociales » (MRN, 1992). Le maintien de la composition mixte est devenu le principal objectif de l'aménagement afin qu'il soit durable. Or, l'aménagement des peuplements mélangés constitue un défi de taille parce qu'il doit tenir compte d'espèces dont le mode de reproduction, les taux de croissance et de longévité sont différents (Forrester, 2014). De plus, l'aménagement des peuplements mélangés doit tenir compte du fait que la demande industrielle pour les diverses espèces les constituant n'est pas égale. Concrètement, les essences résineuses (et surtout les épinettes) sont beaucoup plus recherchées et donc de plus

haute valeur que les feuillus ; il arrive même de manquer de « preneurs » industriels pour toute ou une partie de la composante feuillue des forêts mélangées.

Dans les peuplements mélangés de la sapinière à bouleau blanc, l’envahissement des essences de lumière, dont le peuplier faux-tremble, et d’autres végétations compétitrices suite aux coupes totales constitue un défi pour la régénération de la composante résineuse. En effet, le peuplier faux-tremble se reproduit abondamment par drageonnement et sa croissance est très rapide, mais selon Pothier *et al.*, (2004), il entre généralement en phase de sénescence vers 60-64 ans dépendamment des méthodes de calculs décrites par ces auteurs. Par contre, le sapin et l’épinette blanche qui le côtoient présentent une croissance initiale plus lente mais une présence plus longue dans les peuplements mélangés.

En dépit de leurs possibilités commerciales respectives, alors que l’épinette blanche et le tremble cohabitent dans les peuplements mixtes, leurs différences inhérentes quant à la régénération, la croissance ainsi que d’autres caractéristiques des deux espèces, rendent difficile de maximiser le rendement total du peuplement en utilisant un traitement de récolte unique. Autrefois, et même encore aujourd’hui, le peuplier faux-tremble est une essence de valeur économique moindre par rapport à l’épinette blanche et aux autres essences résineuses en général. Ceci étant dit, le développement technologique dans la transformation du bois et l’évolution des marchés vers l’utilisation de nouveaux produits à base de feuillus dans la construction ont fait en sorte que le peuplier faux-tremble soit devenu très sollicité par l’industrie forestière (Ressources Naturelles Canada, 2014). En effet, le peuplier faux-tremble est actuellement le constituant principal dans la fabrication de panneaux à lamelles orientées (OSB pour *Oriented Strand Lumber*) qui ont pratiquement remplacé le contreplaqué dans la plupart des constructions des logements du Canada et des États-Unis.

Le Canada est le premier exportateur de bois d'œuvre et de pâtes et papiers au monde, lui rapportant environ 12 milliards de dollars en chiffre d'affaires annuellement (Ressources Naturelles Canada, 2014). Son économie repose principalement sur l'exploitation de produits d'essences résineuses (en particulier l'épinette noire, l'épinette blanche, le sapin baumier et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.)). De ce fait, il est important de s'interroger sur les méthodes d'aménagement de peuplements mixtes qui permettraient la pérennité de cette ressource, la préservation et la fructification du capital que représentent les tiges d'avenir (la proportion résineuse), mais aussi le maintien de la structure des peuplements, tout en évitant sa dégradation par la prolifération des espèces compétitrices telle que le peuplier faux-tremble. C'est dans ce contexte que se sont développées les coupes partielles. Les coupes partielles ont pour objectif, entre autres, d'augmenter la croissance et la productivité des arbres résiduels au travers d'une réduction de la compétitivité entre les individus rémanents du peuplement.

2.1.3 Importance de la coupe partielle dans l'aménagement écosystémique

Le terme générique de « coupe partielle » englobe une gamme d'intensités de prélèvement de tiges marchandes et les coupes partielles peuvent être appliquées avec différents objectifs et dans des peuplements ayant des caractéristiques très différentes. Dans le contexte de l'aménagement écosystémique, la coupe partielle est interpellée, entre autres, pour maintenir davantage des caractéristiques structurelles et des fonctions écologiques de peuplements naturels complexes et, par le fait même, maintenir plus de diversité naturelle dans des territoires forestiers aménagés (Seymour et Hunter, 1999 ; Bergeron *et al.*, 2002). Dans ce sens, l'utilisation de la coupe partielle dans des peuplements mélangés devrait s'inspirer des perturbations secondaires naturelles et de la dynamique propre de ces types de peuplements. Ainsi, comme un analogue au dépérissement graduel de tiges d'essences de lumière suite à leur attente à la maturité,

la coupe partielle pourrait contribuer à ouvrir graduellement le peuplement par la récolte de tiges de peuplier et à favoriser l'implantation et la croissance de la régénération des essences résineuses plus tolérantes à l'ombre (Harvey et Brais, 2007).

D'après le Conseil canadien des ministres des forêts (2002), la coupe à blanc est le système de récolte le plus pratiqué au Canada depuis des années 1950-1960. Au Québec, la coupe à blanc proprement dite a été remplacée par la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) au début des années 1990 (Harvey et Brais, 2002). Cette opération consiste à récolter tous les arbres marchands du peuplement (100 % du volume marchand) tout en protégeant la régénération préexistante et en minimisant les perturbations du sol par le biais de sentiers espacés occupant 25 % (maximum) de la superficie d'un parterre. Groot *et al.*, (2005) affirment que la CPRS est une méthode de coupe adaptée à des peuplements aménagés selon un régime équienn. Par contre, ce mode d'exploitation risque de transformer des peuplements de structure inéquienn en structure régulière ou équienn. Contrairement à la CPRS, la coupe partielle pourrait, en principe, contribuer à maintenir l'ensemble de la composition et de la structure des peuplements des mosaïques forestières naturelles (Bergeron *et al.*, 2001 ; Harper *et al.*, 2002).

Le bois, contrairement aux autres matériaux de construction, est un matériau biologique, anisotrope, hétérogène, hygroscopique et instable dimensionnellement et dégradable (Panshin et de Zeeuw, 1980). Cette variabilité rend son utilisation plus complexe. L'étude de la qualité du bois nécessite la compréhension de la variabilité du bois en fonction de ses différentes caractéristiques afin de mieux définir les objectifs et les hypothèses de recherche et de pouvoir interpréter nos résultats. Je propose donc de définir les principales caractéristiques du bois (biologique, anisotropie, et hétérogénéité), et les éléments influents sur sa qualité en fonction de ces différentes caractéristiques.

2.2 Le bois et ses particularités

2.2.1 Le bois : un matériau biologique

Le bois est un polymère complexe qui possède une organisation microcellulaire extrêmement élaborée. Les tissus ligneux, assurant le soutien, la conduction et la mise en réserve, constituent la majeure partie de la biomasse de l'arbre (Panshin et de Zeeuw, 1980). Le bois est issu d'un processus biologique long. Sa formation implique la division cellulaire, l'expansion des cellules, le dépôt de la paroi secondaire, et la mort cellulaire (Mellerowicz *et al.*, 2000).

La division cellulaire est l'étape qui assure la croissance de l'arbre. En effet, les tissus ligneux du bois sont à l'origine du fonctionnement de l'assise libéro-ligneuse, communément, appelés le cambium ou la zone cambiale (Fahn, 1995). Le cambium est constitué d'une fine couche de cellules méristématiques dites les initiales du cambium. Les initiales du cambium peuvent être de deux types : fusiformes et isodiamétriques (Figure 2.1) (Larson, 1994 ; Plomion, *et al.*, 2001).

La division cellulaire des initiales du cambium donne naissance aux composantes du phloème, par division centrifuge vers l'extérieur, et celles du xylème, par division centripète vers l'intérieur (Fromm, 2013) (Figure 2.2). La croissance circonférentielle du xylème et du phloème est assurée par la division anticlinale des initiales fusiformes (selon le plan radial), alors que la croissance diamétrale advient grâce à la division périclinale des cellules mères issues des initiales isodiamétriques (selon le plan transversal) (Figure 2.3) (Bannan, 1967 ; Bannan et Bindra, 1970).

Le cambium a un autre rôle fondamental, à savoir le transport de l'information (hormones) d'une extrémité à l'autre de l'arbre (Plomion, *et al.*, 2001). L'une des plus importantes est l'acide indole 3 -acétique (IAA, auxine). L'auxine est une hormone de

croissance. Dans des conditions optimales de luminosité et de disponibilité hydrique, l'auxine est synthétisée, par les bourgeons et les feuilles dans la cime vivante, durant la phase de croissance végétative. L'auxine est responsable des caractéristiques typiques du bois formé. La production de cellules courtes, à diamètre large et aux parois cellulaires minces, caractéristiques du bois initial, est réalisée durant cette période où les conditions de croissance sont optimales. Quand la disponibilité hydrique diminue et la croissance longitudinale cesse, la formation du bois final commence à la base de l'arbre (Larson *et al.*, 2001). À cette période, le produit de la photosynthèse, qui était utilisé pour la formation des jeunes feuilles et l'élongation des bourgeons, contribue à l'épaississement de la paroi secondaire, typique du bois final (Larson, 1964).

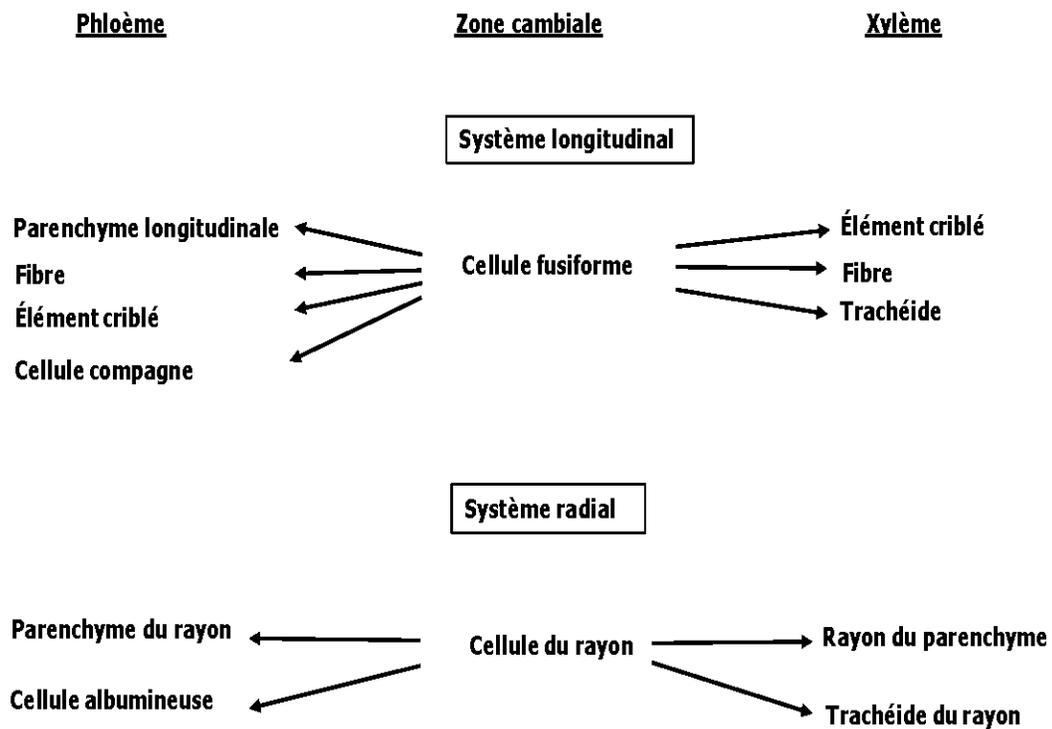


Figure 2.1 Différenciation des cellules du xylème et du phloème à partir de la zone cambiale (Fromm, 2013)

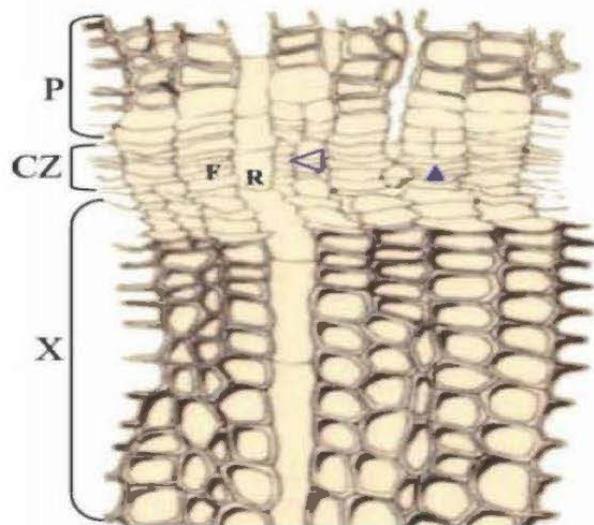


Figure 2.2 Section transversale de la zone cambiale (CZ) chez le pin maritime (*Pinus pinaster*), montrant : F- une initiale fusiforme, R- une initiale de rayon, CZ-la zone cambiale, X- la différenciation centripète de la CZ en xylème et P- la différenciation centrifuge de la CZ en phloème. La flèche vide montre une récente division anticlinale et la flèche pleine montre une récente division périclinale (Plomion *et al.*, 2001).

De par sa nature biologique, le bois est un matériau très variable aussi bien entre les espèces, dans la même espèce et au sein d'un individu (Panshin et de Zeeuw, 1980). En effet, sous l'influence de facteurs intrinsèques (le caractère génétique) et externes (aire de distribution naturelle ou artificielle, macro climat, etc.), les modalités de croissance sont modifiées, d'un peuplement ou d'un individu, sur le plan spatial et temporel, ce qui contribue à la fluctuation des caractéristiques du tissu ligneux.

2.2.2 Le bois : un matériau anisotrope

Les variations radiales (de la moelle vers l'écorce), longitudinales (en hauteur) et intracernes (bois initial/ bois final), chez un même individu, entre individus (dans la même espèce), et entre espèces des propriétés du bois témoignent de la grande anisotropie de ce matériau (Panshin et de Zeeuw, 1980 ; Larson *et al.*, 2001).

L'anisotropie du bois détermine les changements de ses propriétés (telles que sa croissance, sa masse volumique, etc.) en fonction de la direction dans laquelle elles sont mesurées. Les trois directions fondamentales selon lesquelles la variation des propriétés du bois pourrait être considérée sont : la direction longitudinale (selon un plan ligneux parallèle à l'axe de l'arbre) ; la direction radiale (selon un plan ligneux passant par la moelle, parallèle aux rayons ligneux et tangent à la direction longitudinale) ; et la direction tangentielle (selon le plan ligneux tangent aux cernes de croissance et perpendiculaire aux rayons ligneux) (Figure 2.3) (Panshin et de Zeeuw, 1980).

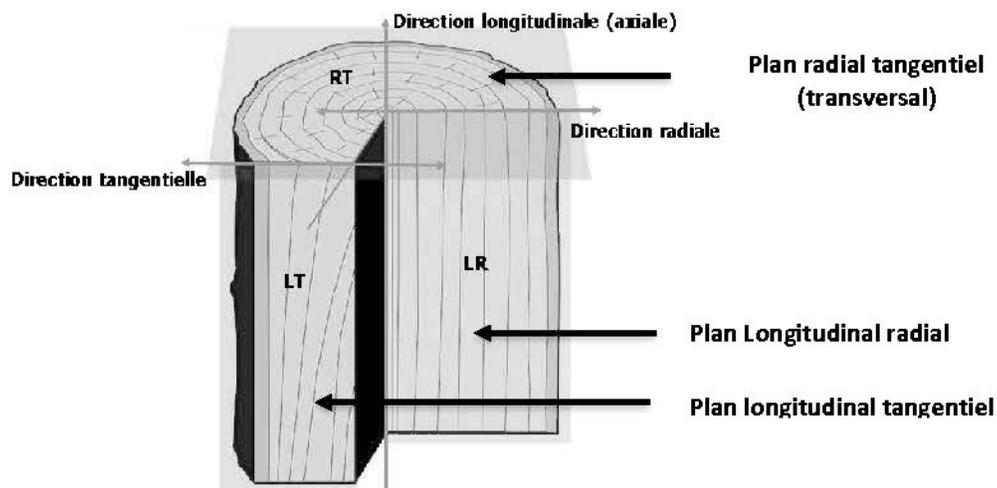


Figure 2.3 Axes et plans naturels d'observations (adapté de Kollmann et Côté, 1968).

2.2.3 Le bois : un matériau hétérogène

L'hétérogénéité du bois est liée aux cycles annuels de croissance des arbres. Au printemps, la reprise de croissance nécessite un transport important de sève. Les trachéides ainsi formées se caractérisent par des sections dites lumen plus larges et des parois cellulaires plus minces. En été, ce besoin est moins important et se forme des trachéides aux lumens plus étroits et aux parois cellulaires plus épaisses (Panshin et de Zeeuw, 1980). Chez l'épinette blanche, le bois initial et le bois final se distinguent au niveau de leur apparence et de leur structure.

Chez les essences résineuses, on observe différentes échelles sur lesquelles le bois paraît de façon bien différente (Figure 2.4). À l'échelle de l'arbre ou de la bille, la coupe transversale d'un tronc permet de distinguer de l'extérieur vers l'intérieur : l'écorce ; le bois ; le cambium et le xylème (le bois auquel on s'intéresse).

À l'échelle macroscopique, le bois de l'épinette blanche présente des cercles concentriques très marqués sur la section transversale du tronc de l'arbre qu'on appelle des cernes de croissance ou cernes annuels (Figure 2.5). Ces cernes annuels sont dus à la croissance saisonnière du tissu ligneux, plus active au printemps qu'en hiver et en automne. Cette saisonnalité se traduit par deux types de bois au niveau du cerne, un bois de printemps dit bois initial (plus clair et caractérisé par des cellules grosses aux parois minces) et un bois d'été dit bois final (plus sombre et caractérisé par des cellules étroites aux parois épaisses). Le rôle des cellules constitutives du bois initial et du bois final justifie leur rôle dans l'arbre. En effet, au printemps avec la reprise de la végétation, le bois initial forme des cellules de grandes dimensions facilitant la conduction de la sève brute. Dans le bois final, les cellules jouent le rôle de soutien (propriété mécanique) ce qui justifie la formation des parois cellulaires plus épaisses aux lumens étroits. L'hétérogénéité est forte à l'échelle du cerne. La différence entre la densité du bois initial et du bois final est très importante.

À l'échelle microscopique, on rencontre les cellules appelées trachéides qui présentent l'élément de conduction et de soutien (Figure 2.6A). Chez l'épinette blanche, les trachéides représentent 92,5 % du volume du bois et les rayons n'occupent que 1 %. Les trachéides font en moyenne 3,5 mm (entre 3 et 4,5 mm) de long et entre 25 et 30 μm de diamètre. Ainsi, le bois de l'épinette blanche est uniforme. Les trachéides longitudinales, sur le plan longitudinal, sont parallèles à l'axe de l'arbre (Zhang et Koubaa, 2009).

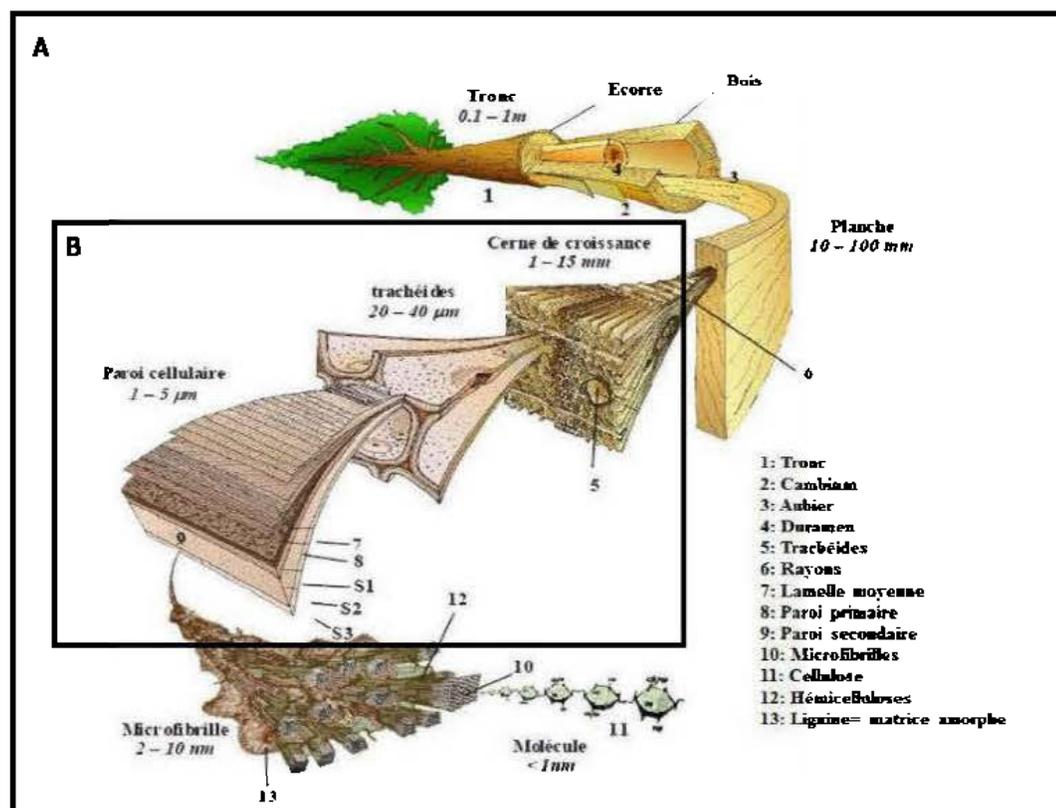


Figure 2.4 A. Différentes échelles d'observation d'un bois de résineux d'après Harrington, 2013. B. Échelle d'observation dans le cadre de cette étude.

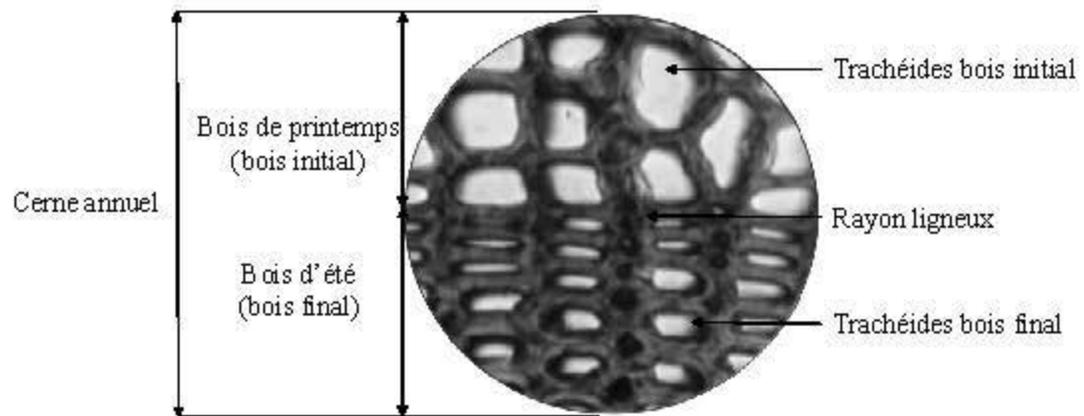


Figure 2.5 Transition et dimension des cellules du bois initial au bois final chez le pin noir (*Pinus nigra* Var. *Laricio*) (Plomion *et al.*, 2001)

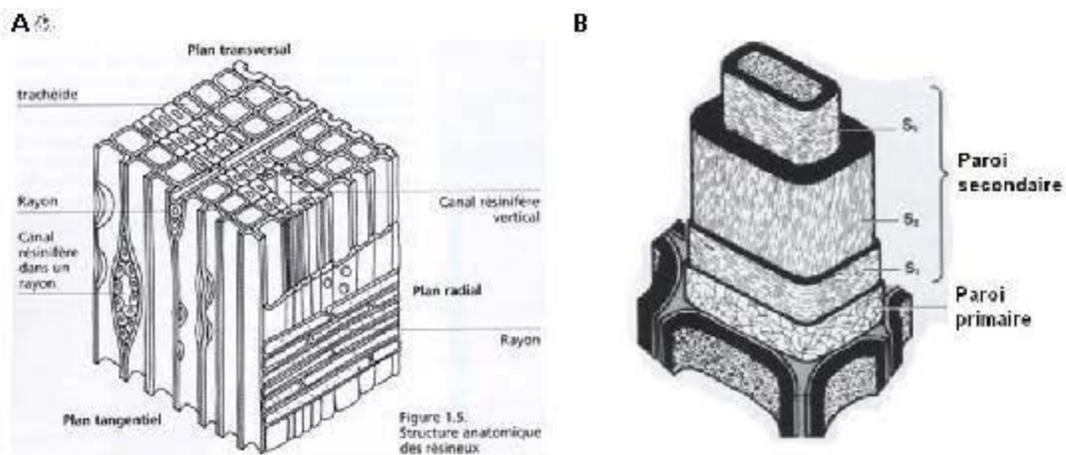


Figure 2.6 A. Représentation tri dimensionnelle d'un plan ligneux. B. Structure d'une trachéide d'un résineux (Plomion *et al.*, 2001).

À l'échelle nanoscopique, on observe les parois cellulaires. La paroi cellulaire et sa description ont été étudiées par Salmén et Olsson, (1998) et Rowell *et al.*, (2005). Selon ces auteurs, la paroi cellulaire est constituée de plusieurs strates (Figure 2.6B) : la lamelle moyenne permet l'adhésion entre les cellules adjacentes ; la paroi primaire, une gaine très mince couvrant la paroi secondaire, composée à son tour de trois couches (S1, S2, S3). Ces trois couches se distinguent entre elles par le degré d'inclinaison et les angles des microfibrilles. Par sa structure et son volume, la paroi secondaire confère la résistance mécanique aux cellules.

2.3 Qualité du bois

Il est important de définir la qualité du bois, car elle est perçue différemment par les forestiers, les manufacturiers et les consommateurs. Considérant les multiples utilisations du bois, la qualité du bois est une notion qui réfère essentiellement à l'utilisation du produit final. Briggs et Smith, (1986) l'ont définie comme suit : « *La qualité de bois est une mesure de son aptitude à satisfaire aux exigences liées à l'utilisation à laquelle le bois est destiné* ». Josza et Middleton, (1994) l'ont défini aussi comme étant l'aptitude du bois à être utilisé pour un usage précis. L'appréciation de la qualité du bois est définie en fonction de son adéquation aux applications envisagées. En effet, chaque propriété du bois contribue à sa qualité dépendamment de l'usage qu'on peut lui associer. Ainsi, une propriété particulière du bois sera bien sollicitée une utilisation particulière alors que dans d'autres cas ça sera la propriété opposée qui le sera.

L'épinette blanche est largement sollicitée par les industries papetières et celles du bois solide pour la qualité de son bois d'œuvre et celle de sa fibre. Ses longues fibres résistantes produisent de la pâte de qualité supérieure, qui sert à fabriquer diverses sortes de papier, des panneaux isolants et des panneaux de particules. Son bois léger

adapté à la fabrication des panneaux, des planches et des poutrelles utilisés dans la construction. Aussi, le bois de l'épinette blanche est très apprécié pour fabriquer des tables d'harmonie pour les pianos, des violons, et des rames (Zhang et Koubaa, 2009). Ainsi, la qualité du bois pour de tels usages peut être définie par ses caractéristiques physiques telles que la masse volumique et les propriétés anatomiques telles que la longueur, le diamètre des trachéides et l'épaisseur de leurs parois.

Les caractéristiques du bois, en général et de l'épinette blanche en particulier, dépendent fortement des facteurs physiologiques, environnementaux et des traitements sylvicoles. Avec pour conséquence, un matériau d'une grande variabilité selon les variations d'âge et de position longitudinale chez un même individu, entre différents individus (dans la même espèce), et d'espèces (Larson, 1962 ; Panshin et de Zeeuw, 1980 ; Larson *et al.*, 2001).

2.3.1 Variabilité physiologique

La variation physiologique est l'une des plus importantes sources de variation. Elle est reliée à l'activité cambiale et à la proportion de la cime vivante et varie avec l'âge, les saisons, le climat et les conditions environnementales. La variabilité intercerne à l'intérieur de l'arbre, dans un même contexte environnemental, est principalement due au vieillissement du cambium.

2.3.1.1 Croissance radiale (accroissement annuel)

L'accroissement annuel ou la largeur du cerne correspond à l'épaisseur de la couche de bois formée par le cambium au cours d'une année de croissance. La largeur du cerne informe sur le temps nécessaire à l'espèce pour atteindre le diamètre d'exploitation et

permet d'estimer la vitesse de croissance radiale de l'arbre. La largeur moyenne du cerne ou, autrement dit, l'accroissement annuel est un paramètre fondamental dans le cadre de l'aménagement durable d'une forêt. Il aide à fixer les délais de rotation pour les interventions ; à déterminer le volume exploitable sans risque d'appauvrissement du peuplement et à ajuster la coupe à la capacité des peuplements (Lei *et al.*, 1997).

Les largeurs des cernes diminuent avec l'âge cambial de l'arbre; ce qui a pour conséquence la formation des cernes plus denses vers la périphérie chez les résineux (Nepveu, 1994). Le profil de variation radiale des largeurs moyennes des cernes, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche tracé par Zhang et Koubaa, (2009) révèle une augmentation de la largeur de cerne et celle du bois initial de la moelle jusqu'à atteindre leur maximum vers l'âge de six à sept ans, puis elles diminuent de façon significative, vers l'âge de douze ans, de 2 à 1 mm (une diminution assez importante) puis, elle finissent par se stabiliser avec l'âge. La variation des proportions et des caractéristiques des tissus constitutifs (proportion des trachéides, épaisseur des parois) du cerne au fur et à mesure que l'arbre vieillit expliquerait cette tendance. La variation radiale du bois final a un patron différent qui se caractérise par une diminution au niveau des premiers cernes, jusqu'à l'âge de 2 à 3 ans, suivi d'un plateau constant (Figure 2.7).

Peu d'études ont investigué la variation longitudinale des propriétés du bois, des résineux en général et de l'épinette blanche en particulier, et les résultats sont contradictoires (Alteyrac, 2005 ; Park *et al.*, 2009 ; Bouslimi *et al.*, 2014; Mvolo *et al.*, 2015 a). Des études montrent que les largeurs du cerne et du bois initial augmentent de la base au sommet de l'arbre. La proportion de bois final est élevée à la base de l'arbre, surtout si cette dernière est dépourvue d'appareil foliaire actif (Larson *et al.*, 2001). Cette variation a été justifiée par le fait qu'à un âge cambial donné, le cambium a tendance à produire plus de cernes larges à une hauteur élevée (Bouslimi *et al.*, 2014).

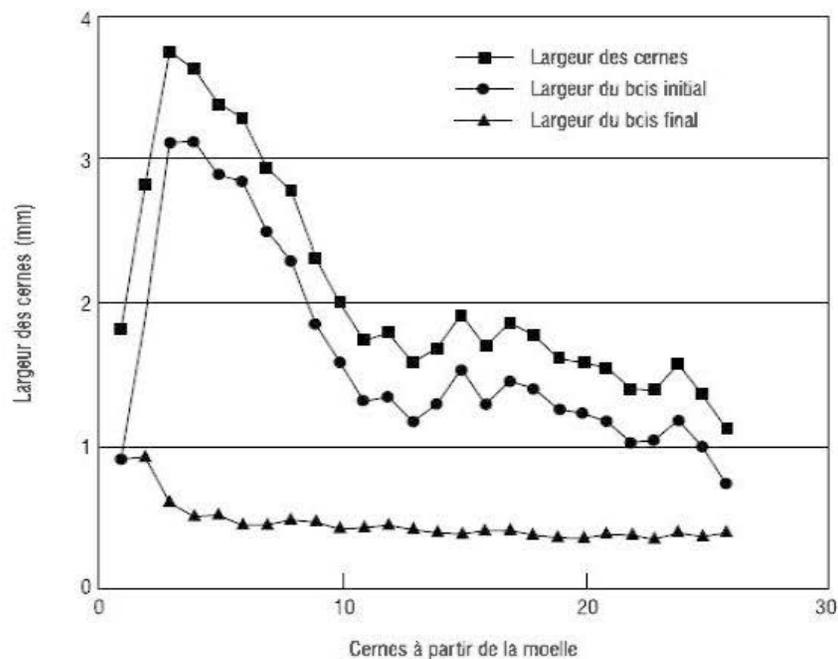


Figure 2.7 Variation radiale des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche (Zhang et Koubaa, 2009).

2.3.1.2 Caractéristiques physiques

La masse volumique est déterminée par le rapport de la masse d'un échantillon du bois sur son volume. Cette propriété varie considérablement d'une espèce à l'autre, au sein d'une même espèce et à l'intérieur d'un même individu (de la base au sommet et de la moelle vers l'écorce et même à l'intérieur d'un même cerne annuel) et d'une provenance à l'autre.

La masse volumique est certainement le critère le plus important de la caractérisation physique du bois. La masse volumique du bois est corrélée plus ou moins étroitement avec les principales propriétés mécaniques du bois (Guilley et Nepveu, 2004). En connaissant la masse volumique, on peut prédire efficacement les autres propriétés du

bois, telles que sa résistance, sa rigidité, sa stabilité dimensionnelle, son potentiel de rendement en pâte ainsi que sa qualité papetière (Josza et Middleton, 1994 ; Raven *et al.*, 2000 ; Koubaa *et al.*, 2002). On considère même la masse volumique du bois comme étant l'indicateur de base de ses propriétés mécaniques (Yang et Lu, 1997).

Selon Corriveau *et al.*, (1990), le profil radial de la masse volumique du cerne de l'épinette blanche à la hauteur de poitrine suit le modèle II décrit par Panshin et de Zeeuw, (1980). Ainsi, il révèle une diminution de la masse volumique au cours des premières années, à laquelle succède une phase de stabilisation suivie elle-même d'une lente, mais constante remontée de la masse volumique du bois (Zhang et Koubaa, 2009) (Figure 2.8). La variation intracerne de la masse volumique chez l'épinette blanche est très importante, passant de 370 (320-417) kg m⁻³ dans le bois initial à 629 (589-696) kg m⁻³ dans le bois final.

Certaines études ont mis en évidence le lien entre la masse volumique du bois et le statut social ou la taille de l'arbre (Wellwood, 1952; Tsoumis et Panagiotidis, 1980). D'une part, les travaux de Beaulieu et Corriveau, (1985) révèlent l'existence d'une relation entre la densité du bois et le diamètre de l'arbre à la hauteur de poitrine. Ainsi, un arbre de fort diamètre tend, en général, à avoir un bois de densité moindre. Tsoumis et Panagiotidis, (1980) trouvèrent que la masse volumique était plus grande chez les individus dominants de pin noir tandis que Wellwood, (1952) ne constate aucun effet de la classe sociale de l'arbre sur la masse volumique du bois.

Contrairement à la variation radiale de la masse volumique, peu d'études portent sur sa variation longitudinale et celles qui existent sont contradictoires. Les résultats de Taylor *et al.*, (1982) ont montré que la masse volumique du bois de l'épinette blanche augmente constamment et de façon significative avec la hauteur de l'arbre. Packee *et al.*, (1992) ont également observé une augmentation constante, mais non significative de la masse volumique du bois avec la hauteur de l'arbre. La masse volumique du bois

de l'épinette blanche augmente légèrement, puis diminue pour finalement suivre un plateau constant (Wang et Micko, 1984).

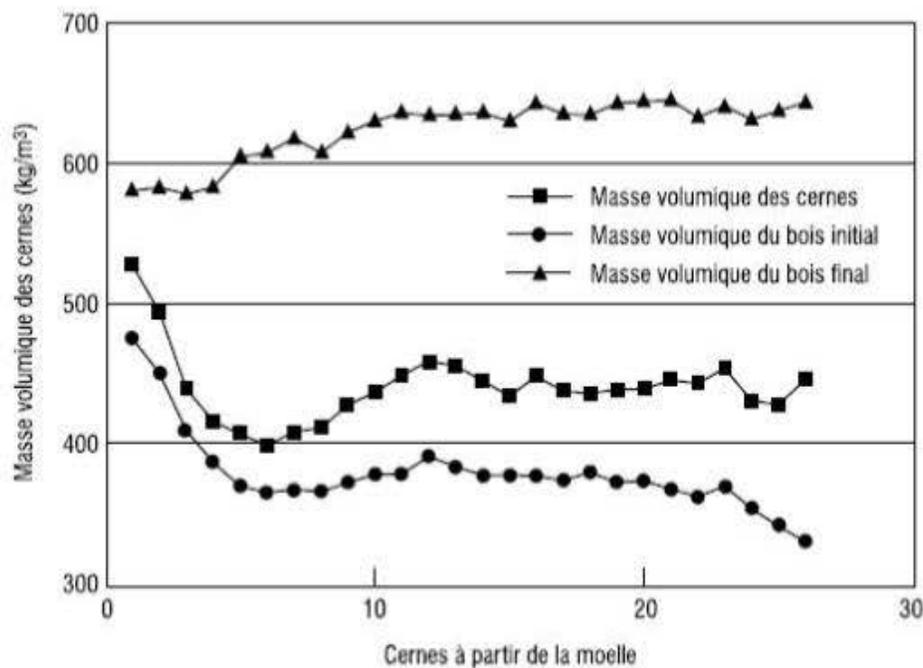


Figure 2.8 Variation radiale des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche (Zhang et Koubaa, 2009)

La variation longitudinale de la masse volumique peut varier en fonction de la classe de diamètre. Selon Wang et Micko, (1984), la masse volumique du bois des arbres de grand diamètre est constante de la base de l'arbre à mi-hauteur et augmente ensuite légèrement. Les arbres de petit et moyen diamètre présentent une masse volumique du bois élevée près de la base, puis celle-ci diminue à mi-hauteur pour augmenter ensuite.

2.3.1.3 Caractéristiques anatomiques

Au niveau de la cellule, les propriétés anatomiques concernent la longueur et le diamètre des trachéides et l'épaisseur des parois cellulaires. Les trachéides, en plus de leur rôle de conducteur de sève, jouent un rôle dans le soutien mécanique. La connaissance de la longueur, le diamètre ainsi que l'épaisseur des parois cellulaires des trachéides est très importante dans la détermination des propriétés mécaniques. Aussi, ces propriétés influencent grandement le procédé de fabrication de pâte et la résistance du papier (Law et Valade, 1997).

Indépendamment des facteurs externes, les dimensions des cellules du cambium se traduisent par une augmentation de la moelle vers l'écorce, et de la base vers la cime de l'arbre (Panshin de Zeeuw, 1980, Mvolo *et al.*, 2015 b). Cela s'explique par la diminution de la fréquence des divisions anticlinales avec l'âge du cambium. En effet, l'âge cambial augmente de la moelle vers l'écorce et de la base vers le sommet de l'arbre, avec comme conséquence une perte de la vigueur végétative dans ces deux directions (Larson, 1994).

Comme la masse volumique du bois, les dimensions des trachéides diffèrent en fonction de l'âge cambial, à différentes hauteurs dans l'arbre et en fonction de la classe sociale. Ainsi, le profil de variation radiale des dimensions des trachéides montre que la longueur des fibres présente un accroissement rapide et non linéaire durant les premières années de croissance radiale, puis une croissance graduelle dans le bois mature jusqu'à atteindre une taille maximale (Zhang et Koubaa, 2009 ; Mvolo *et al.*, 2015).

Le diamètre des trachéides montre le même patron de variation que celui de la longueur des trachéides (Mvolo *et al.*, 2015 b). Le diamètre des trachéides se caractérise par une augmentation rapide et non linéaire durant les premières années de croissance, puis une

croissance graduelle jusqu'à atteindre un diamètre maximal contrôlé génétiquement et par les facteurs environnementaux (Panshin et de Zeeuw, 1980).

Concernant la variation en hauteur, Taylor *et al.*, (1982) et Wang et Micko, (1984) ont remarqué que les trachéides du sommet de l'arbre de l'épinette blanche sont plus longues que celles à la base de l'arbre. Avec la forte croissance en hauteur des arbres, les tissus de conduction, les trachéides pour ce qui est des conifères, doivent vaincre la résistance hydraulique et alimenter les feuilles en eau et nutriments issus des racines (Rosner, 2013). La diminution vers le haut du diamètre des trachéides permet d'accomplir cette fonction, indépendamment de la taille (Enquist, 2003), de la forme ou de l'environnement (Olson *et al.*, 2014). Cela permet ainsi au houppier de continuer à synthétiser et contrôler la variabilité du bois.

Toutefois, les variations des dimensions des trachéides sous l'effet des conditions de croissance ont aussi été mises en évidence chez le pin noir pour lequel il a été noté que la longueur des trachéides variait avec la localisation géographique et le statut social de l'arbre (Tsoumis et Panagiotidis, 1980). Ainsi, les arbres dominants ont généralement des trachéides plus longues et une plus faible proportion de bois final.

2.3.2 Relation entre l'accroissement annuel et la qualité du bois

La masse volumique du bois et les propriétés anatomiques seraient reliées à l'accroissement annuel. Selon Zhang et Koubaa, (2009), il existe une corrélation négative entre la largeur des cernes et la masse volumique du bois. D'autres études mettent en évidence cette relation, mais identifient d'autres facteurs entrant en jeu, tel que l'âge cambial, l'intensité d'un traitement sylvicole, la vitesse de croissance.

Dutilleul *et al.*, (1998) trouvèrent que la largeur des cernes de l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.)) était corrélée négativement avec la masse volumique du bois, mais

que cette relation tendait à disparaître lorsque l'accroissement annuel dépassait 2,2 cm ce qui est largement au-dessus des taux de croissance radiale des épinettes blanches matures en forêt boréale de l'Est du Canada. Peu d'années montraient une corrélation significative entre la largeur du cerne et la masse volumique du bois en fonction de l'âge cambial pour les épicéas à croissance rapide, alors que la corrélation serait négative systématiquement et significative en de nombreuses années pour les arbres à croissance lente. Koga *et al.*, (2002), observèrent une diminution de la masse volumique du bois du sapin baumier suite à l'augmentation de la largeur de bois initial au détriment du bois final sous l'effet d'une éclaircie précommerciale.

La proportion de bois final est un des facteurs les plus importants pour définir la masse volumique du bois (Ivkovich *et al.*, 2002). En effet, le bois final est constitué de petites cellules aux parois proportionnellement plus épaisses (Raven *et al.*, 2000) ce qui contribuerait à augmenter la masse volumique du bois. Selon Nicholls, (1984) la proportion de la paroi cellulaire influe sur la masse volumique du bois. En effet, plus l'épaisseur de la paroi cellulaire est importante, plus la masse volumique augmente. Il y a donc des relations entre la masse volumique du bois, l'épaisseur des parois cellulaires et le pourcentage de bois final (De Kort *et al.*, 1991).

De nombreuses études ont démontré qu'une augmentation de croissance affectait les paramètres des fibres (Dutilleul *et al.*, 1998; Mäkinen *et al.*, 2002a) soit il y a augmentation du diamètre des trachéides (augmentation de l'aire du lumen et/ou diminution de l'épaisseur des parois cellulaires) (Mäkinen *et al.*, 2002a; Jaakkola *et al.*, 2005 b). Erickson et Arima, (1974) ont conclu que la largeur des cernes serait inversement proportionnelle à la longueur des trachéides. Les travaux de Dutilleul *et al.*, (1998) ont révélé une corrélation négative entre la largeur des cernes et la longueur des fibres et donc plus la croissance est rapide, plus les fibres sont courtes. Evans, (1994) a constaté que les relations entre la masse volumique du bois et l'épaisseur des parois sont très fortes dans le bois initial, mais plus faible dans le bois final. Pourtant,

il semble que la longueur des fibres soit liée à la masse volumique du bois chez le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) (Babos, 1973) de même que l'épaisseur des parois et que ces deux paramètres augmentent avec l'âge cambial.

Des résultats contradictoires laissent supposer que la relation entre les différents paramètres de qualité (masse volumique du bois, paramètres anatomiques) et la croissance des arbres est moins claire qu'elle y paraît. Beaulieu et Corriveau, (1985) ont déterminé plusieurs provenances d'épinette blanche à forte croissance donnant une masse volumique élevée de bois.

2.3.3 Variabilité due aux coupes partielles

De manière générale, l'espacement disponible pour croître exerce une influence déterminante sur la vitesse de croissance radiale de l'arbre et sur les propriétés du bois. En effet, l'espacement entre les arbres définit le degré de compétition pour les ressources nécessaires telles que la lumière, l'eau et des éléments nutritifs.

Très peu d'études ont considéré l'effet des coupes partielles, appliquées dans un contexte de préservation de la biodiversité, sur la croissance (Smith *et al.*, 2016). À notre connaissance, aucune étude n'existe sur les caractéristiques du bois (accroissement annuel, masse volumique et propriétés anatomiques, de l'épinette blanche) et les changements de celles-ci en fonction de ce type de coupe partielle, appliquée dans un contexte d'aménagement écosystémique. De plus, aucune n'est allée chercher des réponses à l'intérieur, même de l'arbre, c.-à-d. à une échelle aussi réduite, le cerne et ses composantes et la cellule, à différentes hauteurs, chez des arbres de classe sociale différente, et ce sur une période en moyenne de 13 ans (trois ans avant l'application du traitement et 10 ans après le traitement). Toutefois une analogie peut

être faite entre la coupe partielle et les éclaircies, car les deux ont un objectif en commun celui de réduire la compétition entre les individus du même peuplement.

L'effet des éclaircies sur la croissance des tiges résiduelles pour différentes espèces, dont l'épinette de Norvège (Pape, 1999), le pin sylvestre (Peltola *et al.*, 2007), le pin gris (Schneider *et al.*, 2008) et l'épinette blanche (Corriveau *et al.*, 1987; Yang, 2002; Gagné *et al.*, 2012). Ces études démontrent, de façon générale, qu'une diminution de la densité du peuplement favorise la croissance des tiges résiduelles.

Selon Gartner, (1995), le principal effet d'une éclaircie est celui d'augmenter la taille de la cime vivante et des racines, ce qui entraîne une croissance accélérée avec une formation plus importante de bois initial (Larson *et al.*, 2001). En effet, selon Koga *et al.*, (2002), le bois initial du sapin baumier a mieux répondu à une éclaircie pré-commerciale que le bois final. La proportion du bois final a diminué après une éclaircie, ce qui a causé la diminution de la masse volumique du cerne et la longueur des trachéides. Cependant, les effets des éclaircies sur les attributs de la qualité du bois dépendent de leur typologie et leur intensité (Jaakkola *et al.*, 2005, 2006)

Travaillant dans le même dispositif expérimental que le présent projet, Smith *et al.*, (2016) ont évalué l'impact des coupes partielles sur la croissance diamétrale et volumétrique du bois de l'épinette blanche en utilisant des procédures dendroécologiques pour compter et mesurer la largeur des cernes annuels traduisant la croissance radiale. Les résultats de ces auteurs ont révélé que seul le traitement, la coupe partielle, le plus sévère (100 % de [ST] de feuillus récoltée) a entraîné une augmentation du volume des tiges de l'épinette blanche par rapport aux arbres dans les peuplements témoins (0 % de [ST] de feuillus récoltée). Chez plusieurs espèces résineuses, une augmentation de l'accroissement en volume par tige se traduit à l'échelle du cerne par une augmentation de la largeur moyenne des cernes et une formation plus importante de bois initial (bois de printemps). Le bois initial répond mieux aux effets d'une coupe partielle (Koga *et al.*, 2002) ce qui conduit à une

diminution de la proportion du bois final (bois d'été) (Koubaa *et al.*, 2000). De surcroît, la coupe partielle pourrait nuire à la qualité du bois (Kang *et al.*, 2004).

Quelques auteurs, dont Mäkinen *et al.*, (2002 a), ont déterminé que les propriétés du bois et des trachéides étaient influencées par l'âge des arbres, l'hérédité et le taux de croissance. Cette dernière notion laisse croire que des interventions favorisant la croissance des tiges pourraient mener à des changements dans les propriétés des fibres (Jaakkola *et al.*, 2005 a ; Jaakkola *et al.*, 2005 b), dans la masse volumique du bois (Mäkinen *et al.*, 2002 b) et par le fait même, abaisser les propriétés mécaniques du bois. De ce fait, en réponse à une coupe partielle, il y aurait diminution du pourcentage de bois final et, probablement, diminution de la masse volumique moyenne des cernes de croissance associée à une augmentation de la largeur de ceux-ci.

L'épaisseur des parois cellulaires influence le procédé de fabrication de la pâte et la résistance du papier, ce qui est, en fait, un critère de qualité important (Law et Valade, 1997). En effet, une épaisseur importante de la paroi cellulaire des fibres est reconnue pour en augmenter leur résistance, ce qui augmenterait également celle du papier (Karlsson, 2006).

Plusieurs facteurs influencent la longueur des trachéides d'une même espèce, notamment le taux de croissance, qui se reflète par la fréquence des divisions anticlinales (Bannan, 1967 ; Larson, 1994). Ainsi, la diminution de la longueur des trachéides associée aux éclaircies est due à l'augmentation de la fréquence des divisions anticlinales (Bannan, 1967).

De nombreuses études ont démontré qu'une augmentation de croissance affectait les propriétés des fibres (Dutilleul *et al.*, 1998 ; Mäkinen *et al.*, 2002 a) par une augmentation du diamètre des trachéides (augmentation de l'aire du lumen et/ou diminution de l'épaisseur des parois cellulaires) (Mäkinen *et al.*, 2002 a ; Jaakkola *et al.*, 2005 b). Les différentes interventions, de par l'augmentation de la croissance des

tiges, peuvent donc nuire à la qualité du bois. De plus, la longueur des trachéides, tout comme l'épaisseur des parois cellulaires, est un critère important, car elle influence grandement le procédé de fabrication de la pâte et la résistance du papier (Law et Valade, 1997). Erickson et Arima, (1974) ont conclu que la largeur des cernes serait inversement proportionnelle à la longueur des trachéides, ce qui laisse présager un changement à la suite d'interventions sylvicoles qui augmentent l'espacement et favorisent une hausse de la croissance radiale des tiges résiduelles.

Des résultats contradictoires laissent supposer que la relation entre les différents paramètres de qualité (masse volumique du bois, paramètres anatomiques) et la croissance des arbres est moins claire qu'elle y paraît. En effet, la communauté scientifique ne s'entend pas sur les effets réels d'une augmentation de croissance sur les propriétés du bois. La qualité du bois de l'épinette blanche en forêt mixte après coupe partielle est notamment encore trop peu étudiée. Les résultats de Gagné *et al.*, (2012) ont révélé que l'éclaircie a augmenté l'accroissement volumétrique des dominants et des codominants des épinettes blanches et n'a pas diminué la masse volumique du bois, toute classe sociale confondue.

Dans le contexte actuel et futur de convergence vers les produits du bois à haute valeur ajoutée, l'assurance d'un produit final de qualité dépendra de l'état des arbres marchands qui est étroitement lié aux conditions de croissance et aux interventions sylvicoles. Cependant, il reste à développer des stratégies sylvicoles qui précisaient l'intensité des ouvertures permettant d'augmenter la croissance des tiges résiduelles tout en maintenant la qualité du bois.

CHAPITRE III

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

3.1 Objectifs et hypothèses

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer, à l'échelle du cerne et de la cellule, l'effet de différentes intensités de coupe partielle (de récolte d'espèces feuillues) sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette blanche en tenant compte de la classe sociale de l'arbre. Les objectifs spécifiques consistaient à :

1) Caractériser les variations intracernes (bois initial et bois final), radiales (de la moelle à l'écorce) et longitudinales (de la base au sommet) de la croissance, la masse volumique et les dimensions (longueur et diamètre) des trachéides.

Selon cet objectif, on s'attend à ce que : la variation au niveau du bois initial soit plus importante qu'au niveau du bois final ; la variation radiale soit plus importante que la variation longitudinale et ceux toutes classes sociales confondues. Afin de répondre à cet objectif des observations de courbes de tendances ainsi que des analyses descriptives ont été mises en œuvre.

2) Évaluer l'effet de la classe sociale de l'arbre et de l'intensité des coupes partielles sur la croissance, la masse volumique et les propriétés anatomiques à savoir la longueur et le diamètre des trachéides et l'épaisseur des parois cellulaires du bois de l'épinette blanche.

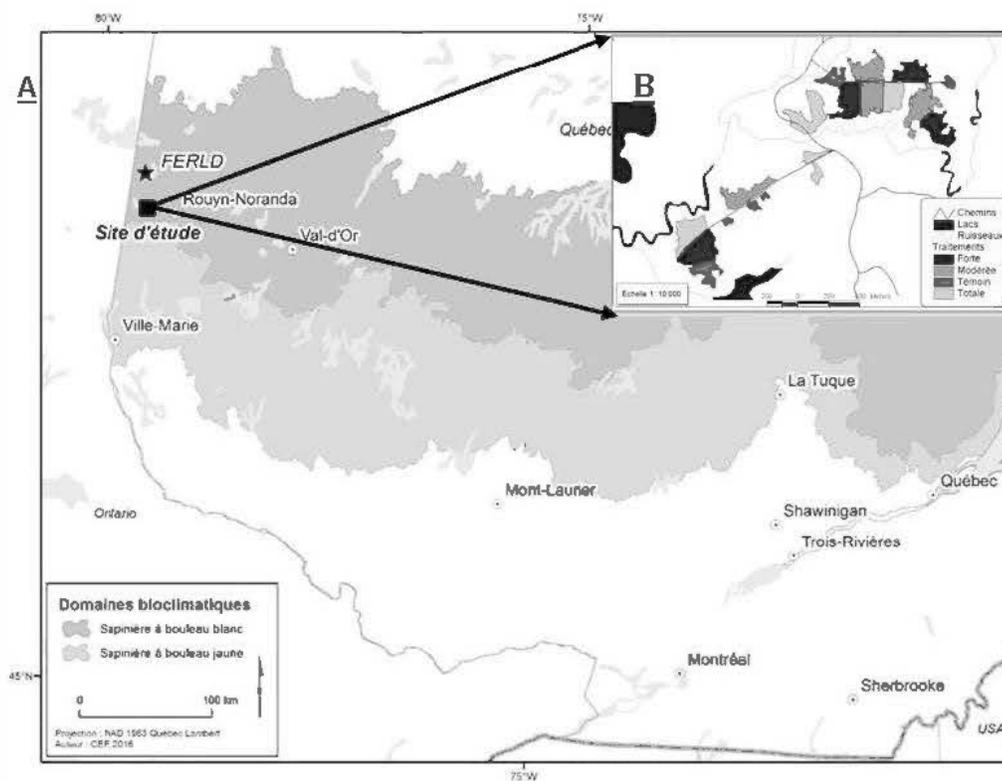
Selon cet objectif, nous avons émis les hypothèses suivantes : la croissance radiale des tiges, plus spécifiquement la croissance du bois initial, devrait augmenter après la récolte de 100 % de la surface terrière [ST] de feuillu (Smith *et al.*, 2016 ; Koubaa *et al.*, 2002). Par conséquent, le bois devrait produire plus de cellules larges et courtes aux parois minces (Larson *et al.*, 2001). La masse volumique devrait se maintenir après la récolte de 50 et 65 % [ST] de feuillu (Gagné *et al.*, 2012) et diminuer après la récolte de 100 % [ST] des feuillus. Toutes les classes sociales et les hauteurs dans l'arbre devraient répondre aux coupes partielles de la même façon pour toutes les propriétés étudiées. L'impact devrait se manifester au cours des premières années puis s'estomper. Afin de répondre à cet objectif, des analyses statistiques, de type modèle linéaire mixte à critère ont été effectuées pour démontrer l'impact des différents paramètres sur les propriétés étudiées ainsi que des comparaisons multiples de *Tukey*.

3.2 Aire d'étude

Le site d'étude est situé dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'Ouest (Saucier *et al.*, 2009). Il est localisé dans le canton de Beauchastel, à 30 km à l'ouest de Rouyn-Noranda, dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue au nord-ouest du Québec (48°14'N, 79°17'W) (Figure 3.1A). Le site est caractérisé par des sols mésiques, principalement des gris Luvisols, formés à partir des dépôts d'argile lacustres laissés par le lac Ojibway (Vincent et Hardy, 1977). Le climat est continental, avec une température annuelle moyenne de 1,7 °C et des précipitations annuelles de 883 mm (625 mm qui tombe sous forme de pluie) (Rivière Kinojévis météorologique Station [48 13=N, 78 52=O] ¹

¹ <http://climate.weather.gc.ca/>.

Les peuplements traités étaient mélangés (peuplier-conifère). La surface terrière moyenne [ST] était de 43,5 m²/ha. La surface terrière moyenne des espèces dans les témoins au moment des traitements était distribuée ainsi : 75 % peuplier faux-tremble, 20 % épinette blanche, 3 % sapin baumier, 1 % épinette noire et 1 % bouleau blanc. Le peuplier faux-tremble dominait la canopée tandis que les conifères associés étaient généralement distribués entre les classes sociales des arbres opprimés aux codominants. L'âge moyen du peuplement était de 60 à 70 ans avec quelques épinettes blanches qui pouvaient atteindre jusqu'à 120 ans tel que rapporté par Smith *et al.*, (2016) et appuyé par les résultats du densitomètre à rayon X dans le présent travail.



3.2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, d'une superficie d'environ 40 ha a été divisé en trois blocs. Chaque bloc a été par la suite divisé en quatre parcelles expérimentales (PEX) faisant l'objet de quatre traitements distincts. Cela dit, l'expérience comprend douze PEX (3 blocs X 4 PEX) (Figure 3.1B, Tableau 3.1). Les quatre traitements ont été appliqués entre l'été 2001 et l'automne 2002 : 1) témoin (aucune coupe), 2) coupe partielle (CP) modérée (50 % de la surface terrière [ST] des feuillus récoltées), 3) CP forte (65 % de la ST des feuillus récoltées) et 4) coupe totale (100 % de la [ST] des feuillus récoltées). Afin de suivre la réponse aux traitements à l'échelle du peuplement, un total de quarante placettes échantillons permanents (PEP) circulaires de 400 m², à raison de 12 pour chacun des deux traitements intermédiaires et 8 pour les témoins et la coupe totale, ont été établies dans le dispositif au cours de l'année des traitements. En 2012, dix ans après traitement, les tiges de l'épinette blanche destinées à l'étude ont été récoltées à proximité, mais pas à l'intérieur des parcelles d'échantillon permanentes.

3.2.2. Échantillonnage

Pour l'analyse de la croissance et des attributs de la qualité du bois, à l'été 2012 (dix ans après le traitement), un échantillonnage destructif a été entrepris sur 72 individus d'épinette blanche [2 arbres x 3 classes sociales x 4 traitements x 3 répliques]. Tous les arbres sélectionnés pour l'échantillonnage destructif étaient droits, avec très peu ou pas de signe de maladie ou de perte de vigueur (Tableau 3.2). Onze disques en coupe transversale ont été échantillonnés le long de la tige de chaque arbre. Le premier disque a été sectionné à 30 cm à hauteur de la souche et le second à 1,3 m à hauteur de poitrine. Les neuf disques restants ont été sectionnés à partir de positions espacées de manière égale par rapport à la longueur de la tige à partir de la hauteur de la poitrine vers le haut de l'arbre.

Tableau 3.1 Caractéristiques des 12 unités expérimentales (PEX) (Smith *et al.*, 2016).

Année de traitement	Répétition	Initial ST (m ² ha ⁻¹)	ST post- traitement (m ² ha ⁻¹)	ST 5 années post- traitement (m ² ha ⁻¹)	ST 10 années post- traitement (m ² ha ⁻¹)	% peuplement récolté	% faux- tremble récolté	PEX (ha)
Témoin								
N/A	1	39,89	42,65	47,2	49,4	0	0	1,2
N/A	2	38,56	40,32	37,5	39,4	0	0	0,8
N/A	3	39,14	46,91	49,2	54,8	0	0	1,0
50 % [ST] de feuillu récolté								
2002	1	37,50	25,69	29,7	31,1	31	53	2,8
2002	2	37,88	25,92	29,8	34,0	32	52	3,8
2002	3	38,79	22,32	28,3	33,6	42	52	3,4
65 % [ST] de feuillu récolté								
2002	1	44,19	26,20	27,3	28,8	41	64	2,4
2002	2	34,40	16,82	19,5	22,3	51	74	3,8
2001	3	41,30	23,49	22,1	26,4	43	61	3,5
100 % [ST] de feuillu récolté								
2002	1	51,08	14,12	8,0	11,4	72	93	2,0
2002	2	31,65	11,44	14,1	18,1	64	100	2,0
2001	3	58,04	10,03	7,3	12,4	83	99	3,5

ST : Surface terrière ; PEX : Parcelles expérimentales.

Tableau 3.2 Caractéristiques des épinettes blanches échantillonnées en 2012 dans la forêt mixte (Smith *et al.*, 2016)

Classe sociale	Moy. DHP (cm)	DHP ¹ min-mix (cm)	Moy. hauteur (m)	Hauteur min-max (m)	Long. cime (m)	Cime min-max (m)	Moy. Cime vivante ratio	Largeur moy cime (m)	Largeur cime min-max (m)
Témoin									
Dominant	34,3	29,8-38,1	23,5	19,4-26,9	16,3	10,5-19,3	0,69	5,9	5,3-6,7
Codominant	18,1	16,5-19,9	15,6	13,0-19,8	10,5	9,7-11,7	0,69	4,6	3,3-5,6
Opprimé	11,5	9,0-13,8	10,5	7,8-12,3	5,6	3,4-7,5	0,53	4,0	3,0-5,1
50 % [ST] de feuillu récolté									
Dominant	30,1	25,1-40,3	21,7	18,4-24,6	15,5	12,0-20,3	0,71	5,6	4,1-7,2
Codominant	19,3	13,6-24,1	14,8	11,3-20,4	10,1	6,6-14,2	0,67	4,9	3,5-5,8
Opprimé	12,4	9,7-14,3	10,9	10,4-11,3	6,4	5,3-8,6	0,59	3,6	3,1-4,4
65 % [ST] de feuillu récolté									
Dominant	38,2	28,2-49,2	25,4	22,3-30,2	20,9	17,2-23,8	0,83	6,9	5,1-8,6
Co-dominant	19,8	18,3-20,9	16,7	13,4-19,9	10,5	7,3-13,9	0,64	4,2	2,9-5,8
Opprimé	13,0	11,2-13,8	10,6	9,7-12,3	6,7	3,1-10,1	0,63	4,0	2,6-4,7
100 % [ST] de feuillu récolté									
Dominant	36,4	28,4-54,0	21,7	18,4-26,7	16,8	13,2-20,1	0,78	7,6	3,9-9,2
Co-dominant	19,5	17,8-20,9	13,7	12,4-16,0	8,5	5,7-10,4	0,63	4,8	3,9-5,7
Opprimé	12,7	10,3-15,5	9,5	6,8-12,4	5,6	3,2-8,5	0,61	3,9	2,2-4,8

DHP : Diamètre à hauteur de poitrine ; Moy : moyenne ; Long : Longueur ; Min : Minimum ; Max : Maximum

Tous les disques ont été marqués pour identifier le numéro de l'arbre et préciser la hauteur à laquelle chacun a été recueilli. Dans le cadre de notre étude, on a retenu six disques à différentes hauteurs. Le premier disque à (30 cm), le deuxième disque au DHP (1,3 m) et les quatre autres à des hauteurs relatives correspondantes à (15-20) % (35-40) % (55-65) % et (75-80) % de la hauteur totale de l'arbre (Figure 3.5).

La classe sociale d'un arbre correspond, généralement, à la position verticale de sa cime dans la canopée par rapport à toutes les autres cimes d'arbres dans le peuplement ou à toutes celles du voisinage immédiat de l'arbre en question. Dans le cadre de cette étude, la classe sociale a été déterminée selon la méthode de classification élaborée par Smith *et al.*, (2016) et appuyée par la méthode de Bose *et al.*, (2014). Cette dernière consiste à mesurer le diamètre à la hauteur de la poitrine (DHP, 1,3 m) des arbres de l'épinette blanche et à l'utiliser comme proxy de la hauteur de l'arbre. Cette approche s'avère juste pour refléter la hauteur relative des tiges d'épinette blanche les unes par rapport aux autres, en faisant abstraction à la composante feuillue (peuplier faux-tremble), mais elle ne reflète pas nécessairement le statut social des tiges par rapport à l'ensemble des arbres avoisinants des arbres sélectionnés.

3.3 Analyse des données

3.3.1 Mesure des propriétés physiques et anatomiques

3.3.1.1 Mesure de la largeur et de la masse volumique du cerne

Des sections de bois ont été prélevées au centre des disques, provenant des 72 arbres à 6 hauteurs différentes, dans le sens longitudinal-radial à l'aide d'une double scie circulaire à une épaisseur de 1,57 mm. Celle-ci est ensuite coupée au centre (la moelle) en deux parties. Une des deux parties a été utilisée pour l'analyse de la qualité de la

fibres. La deuxième a été recoupée dans le plan transversal en deux à l'aide d'une double scie à une largeur de 25 mm (Figure 3.5A2).

Les échantillons ayant les dimensions requises pour l'analyse de la largeur et de la masse volumique du cerne, soit une largeur de 25 mm et une épaisseur de 1,57 mm ont subi un traitement d'extraction dans une solution de 2 :1 (v/v) cyclohexane/éthanol durant 24 heures, puis dans de l'eau distillée pendant 24 h avec le *Soxhlet* ou extracteur de *Soxhlet*. Le traitement d'extraction consiste à enlever les extractibles du bois afin d'éviter qu'ils n'interfèrent avec la masse volumique du cerne mesurée (Grabner *et al.*, 2005). Les échantillons ont été ensuite séchés et conditionnés à l'air libre pour atteindre la teneur en humidité d'équilibre de la pièce (8 %) avant les mesures. L'épaisseur constante des échantillons est une condition nécessaire à la qualité des résultats puisque la mesure de la masse volumique s'effectue par la mesure de l'absorption des rayons X qui dépend de l'épaisseur de l'échantillon traversé par le rayon. Les échantillons sont mesurés au pied à coulisse. Le cas échéant, du papier à poncer est utilisé pour ajuster l'épaisseur des échantillons.

La largeur et la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final des échantillons ont été mesurées à l'aide du densitomètre à rayon X modèle *QTRS-01X Tree Ring Analyser* de *Quintek Measurements System, inc.* (QMS, Knoxville, Tennessee) (Figure 3.2A). Chaque échantillon placé dans le densitomètre est scanné de la moelle à l'écorce (Figure 3.2B). Le principe du densitomètre est basé sur l'atténuation d'un rayon X qui traverse l'échantillon avec une résolution linéaire de 0,02 mm. Il est piloté par le logiciel *Tree Ring Analyser* qui permet de déterminer la largeur et la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final ainsi que la proportion du bois final. La transition du bois initial au bois final a été déterminée en utilisant le logiciel *Matlab* selon la méthode de point d'inflexion de la courbe représentative de la variation intracerne de la masse volumique du bois (Koubaa *et al.*, 2002) (Figure 3.2C).

La transition du bois initial au bois final correspondait au point d'inflexion du polynôme du sixième degré. La proportion du bois final a été déterminée selon le rapport de la largeur du bois final sur celle du cerne. En plus de ces paramètres, ce logiciel nous a permis d'indiquer l'âge cambial des arbres à travers le calcul du nombre de cernes de la moelle vers l'écorce. Un total de 432 échantillons a été analysé au densitomètre à rayon X. Pendant la mesure, des précautions ont été prises pour éliminer les faux cernes et noter ceux qui manqués.

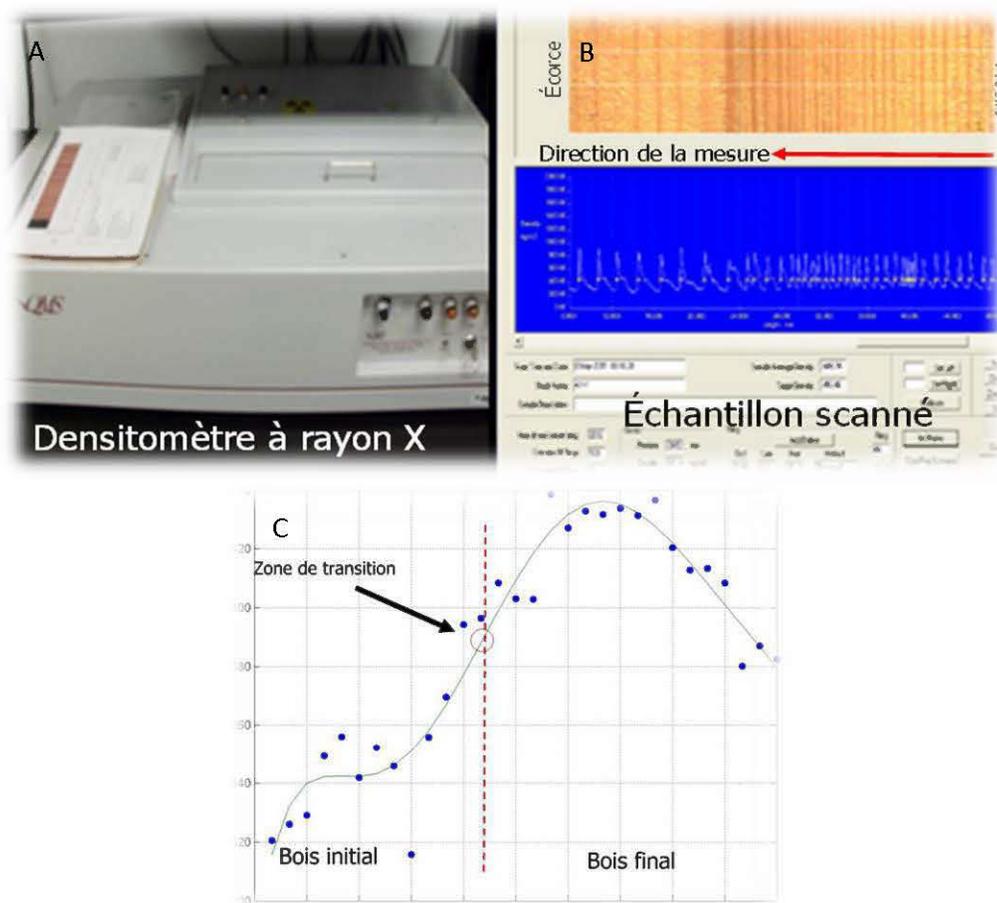


Figure 3.2 A. Densitomètre à rayon X et B. Exemple d'un échantillon scanné par le densitomètre. C. Point de transition du bois initial au bois final selon la méthode de point d'inflexion décrite par Koubaa *et al.*, (2002) au niveau d'un cerne chez le bois de l'épinette blanche.

3.3.1.2 Mesure des propriétés anatomiques

3.3.1.2.1 Longueur et diamètre (largeur) des trachéides

Pour analyser les propriétés de la fibre du bois d'épinette blanche, l'autre moitié des échantillons de bois de 1,57 mm d'épaisseur décrits précédemment a été utilisée (Figure 3.5A1, Tableau 3.4). Sur chaque cerne, des portions du bois initial et du bois final ont été extraites puis macérées selon la méthode de Franklin, (1945). La macération est un procédé qui consiste à séparer les cellules du bois par dissolution de la lamelle moyenne (Cloutier, 2005). La première étape consiste à découper de petites éclisses de bois d'environ 2×2 mm de section et d'environ 8 mm de longueur (Figure 3.3A). Par la suite, nous avons porté à ébullition les éclisses dans l'eau distillée pour les ramollir et ainsi faciliter l'extraction du bois initial et du bois final. Une fois ramollis, les échantillons sont essorés afin d'éviter la réflexion de l'excès d'eau dans le binoculaire. Une binoculaire et un scalpel ont servi pour extraire le bois initial et le bois final de chaque cerne. Les échantillons de bois initial et de bois final de chaque cerne ont été macérés dans un mélange d'acide acétique (CH_3COOH) et de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à une température de 90 °C dans un bain-marie durant quatre à cinq heures jusqu'à ce que les échantillons deviennent blancs. Ce mélange étant un oxydant très puissant permet la dissolution de la lignine et la séparation des fibres. Une fois le traitement terminé, les échantillons macérés ont été rincés à l'eau (Figure 3.3B). Finalement, chaque échantillon est mis dans un mélangeur pour obtenir une suspension en présence d'eau distillée durant 5-10 secondes pour obtenir une suspension en fibres prête à passer dans l'analyseur de la qualité de la fibre (*Kajaani FS300 de Metso®*) (Figure 3.3C).

Les propriétés de la fibre ont été mesurées avec un analyseur de la qualité de la fibre cellulosique le *Kajaani FS300 de Metso®*, un appareil permettant de mesurer automatiquement, rapidement et avec précision les propriétés de la fibre cellulosique.

Il permet de mesurer plusieurs propriétés de la fibre comme la longueur, le diamètre, la masse linéique, la courbure, les angles et le nombre de coudes par fibre. Le principe de *Kajaani FS300 de Metso*® est basé sur un système optique intégré, qui utilise l'effet de la présence de structures cristallines comme la cellulose sur le changement des signaux infrarouges émis à un système photographique d'enregistrement et de mesures.

Dans le cadre de notre étude, on s'est intéressé particulièrement à la longueur et au diamètre des trachéides. Grâce à sa haute résolution, le *Kajaani FS300* permet de mesurer la longueur sur une étendue allant de 0,2 mm à 10 mm et la largeur sur une étendue allant de 10 µm à 75 µm. Le *Kajaani FS300* calcule trois paramètres : la longueur moyenne arithmétique (L_N), calculée selon l'équation 3.1; la longueur moyenne pondérée en fonction la longueur (L_w) calculée selon l'équation 3.2 ou selon le poids (L_{ww}) calculée selon l'équation 3.3 où L correspond à la longueur de chaque fibre et n_i à son poids (Nougier et Lecourt, 2005).

- Longueur moyenne arithmétique (L_N)

La longueur moyenne arithmétique (L_N) correspond à la longueur moyenne du contour de toutes les fibres dans un échantillon donné. Ainsi, la présence de fibres courtes (fibres cassées) influence significativement cette valeur. L_N est calculée selon la formule suivante [3.1] :

$$L_N = \frac{\sum n_i L_i}{\sum n_i} \dots \dots \dots [3.1]$$

- Longueur pondérée (L_w)

La longueur moyenne pondérée (L_w) des fibres est généralement utilisée pour comparer la différence entre deux échantillons. L'effet des fibres courtes est mineur sur ce résultat. L_w est calculé selon la formule suivante [Équation 3.2] :

$$L_w = \frac{\sum n_i L_i^2}{\sum n_i L_i} \dots \dots \dots [3.2]$$

- Longueur pondérée selon le poids (L_{ww})

La longueur moyenne pondérée selon le poids (L_{ww}) est largement influencée par les fibres longues. Cette mesure réduit l'impact des fibres courtes sur la mesure de la longueur. L_{ww} est calculée selon la formule suivante [3.3] :

$$L_{ww} = \frac{\sum n_i L_i^3}{\sum n_i L_i^2} \dots \dots \dots [3.3]$$

Dans la présente étude, nous avons utilisé la moyenne pondérée selon le poids, un paramètre recommandé par (Robertson *et al.*, 1999). La moyenne pondérée selon le poids met davantage l'accent sur les fibres et minimise l'effet des particules fines et des parenchymes sur la détermination de la longueur moyenne des fibres.

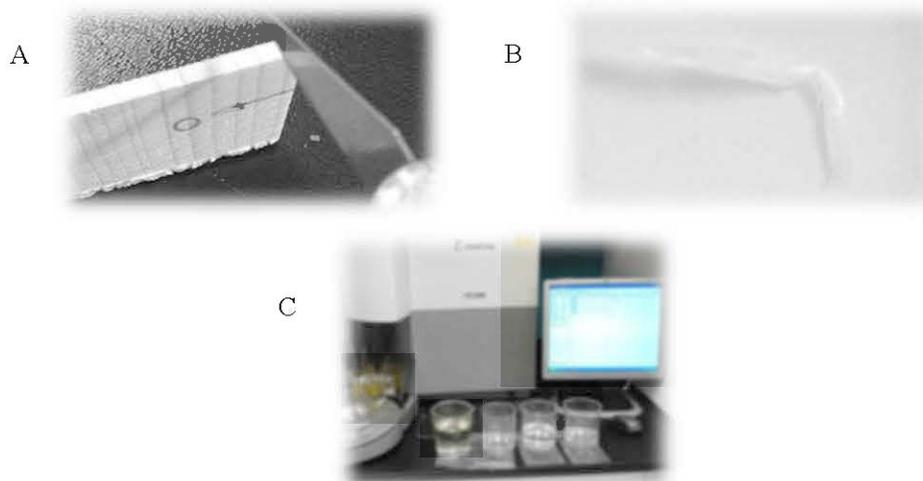


Figure 3.3 A. Découpage longitudinal d'éclisses de bois. B. Trachéides macérées du bois de l'épinette blanche. C. Analyseur de la qualité de la fibre cellulosique le Kajaani FS300 de Metso®.

Une série de dilutions de la suspension a été nécessaire afin d'avoir une concentration appropriée. Une cinquantaine de fibres par seconde a été analysée pour une moyenne de 5000 fibres par échantillons.

3.3.1.2.2 Épaisseur des parois cellulaires

Des barres d'épaisseur de 1 cm ont été prélevées à l'aide d'une double scie dans le sens longitudinal de 12 disques de bois au DHP (Figure 3.5B, Tableau 3.3). Les barres ont été ensuite recoupées de façon à avoir des cubes de 1 cm³. Cinq cubes par galette, de façon à avoir, dépendamment du diamètre des disques, deux cubes avant l'année de la CP et trois cubes après. La préparation des échantillons a été faite selon la méthodologie décrite par Cloutier, (2007). Ainsi, les cubes ont été saturés par cycles successifs en les faisant bouillir et les trempant périodiquement dans de l'eau froide. Une fois saturés, les cubes ont été laissés dans l'eau encore 48 heures avant d'effectuer les coupes microscopiques de façon à bien saturer d'eau les parois cellulaires. Des tranches de 10 à 12 µm ont été extraites sur le plan transversal des cubes saturés à l'aide du microtome *Thermo Scientific™ HM 325* (Figure 3.4B).

Les coupes microscopiques ont subi une série de traitement :

- 1) Le blanchiment : cette étape consiste à tremper les coupes dans une solution de 80 ml d'eau distillée et 5 gouttes d'eau de javel (hypochlorite de sodium) pendant une minute, puis rincer à l'eau distillée. Le blanchiment des coupes microscopiques a permis de dissoudre les gommages, résines et autres dépôts ;
- 2) La coloration à la safranine : après le blanchiment, les coupes ont été placées dans une bouteille en verre en y ajoutant quelques gouttes de safranine et 80 ml d'eau distillée ;
- 3) La déshydratation : cette opération est importante pour le montage permanent. Elle s'est effectuée en 4 étapes :

- Faire tremper les coupes dans 80 ml d'alcool éthylique à 50 % pendant environ une minute.
 - Faire tremper les coupes dans 80 ml d'alcool éthylique à 80 % pendant environ une minute.
 - Faire tremper les coupes dans 80 ml d'alcool éthylique à 100 % pendant environ une minute.
 - Faire tremper les coupes dans 80 ml de toluène pendant environ une minute. Faire ce traitement à 3 reprises.
- 4) Le montage : on a utilisé le baume du Canada pour le montage permanent. On a placé les coupes microscopiques sur des lames et on y a ajouté une goutte de baume. On y a déposé une lamelle en prenant soin d'éviter des bulles d'air. Le montage est par la suite séché à l'air sous pression pendant 48 heures.

Tableau 3.3 Caractéristique des arbres de l'épinette blanche analysés au WinCell

N Arbre	Classe sociale	Intensité de feuillu récolté (%)	Croissance volumétrique (dm ³ /an)
Arbres à forte croissance volumétrique après la coupe partielle			
10	D	0*	353
49	D	100*	334
68	Co	50*	119
20	Co	100*	106
36	O	65*	45
64	O	100*	41
Arbres à faible croissance volumétrique après la coupe partielle			
31	D	0*	5
56	D	50*	6
65	Co	50*	24
24	Co	100*	28
53	O	65*	7
26	O	50*	7

D : dominant, Co : codominant, O : opprimé. * % de [ST] de feuillu récoltée.

L'épaisseur de la paroi cellulaire des coupes microscopiques a été mesurée à l'aide du logiciel le WinCell (*Regent Instruments Inc.*) et un programmé d'analyse le XLcell (Figure 3.4A). Le WinCell est un système d'analyse d'image spécialement conçu pour l'analyse des cellules du bois. Il permet de mesurer, en plus de l'épaisseur de la paroi cellulaire (μm), le diamètre du lumen (μm), la surface du lumen (μm^2) et la largeur totale de la cellule (μm). Des images numériques des échantillons ont été prises par une caméra digitale fixée à un microscope optique connecté à un ordinateur muni du logiciel WinCell de *Regent Instruments Inc.* L'analyse a été basée sur les couleurs et les contrastes du lumen et de la paroi cellulaire.

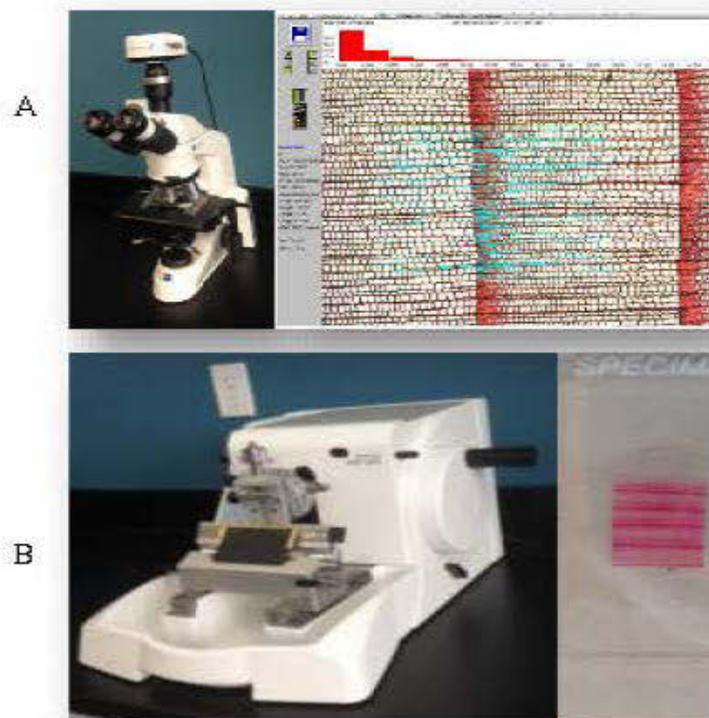


Figure 3.4 A. Microscope optique et une image d'une coupe mince analysée avec WinCell (*Regent Instrument Inc.*). B. Microtome (*Thermo scientific TM HM325*) et un exemple d'une coupe mince sur le plan transversal du bois de l'épinette blanche, montée sur une lame.

3.3.2 Résumé de l'approche méthodologique

Le tableau 3.4 ci-dessous nous permettra de mieux cerner l'approche méthodologique, le matériel à utiliser, le nombre d'échantillons ainsi que le type d'étude à réaliser au laboratoire.

Tableau 3.4 : Détails des réalisations au laboratoire

Test	Propriétés du bois	Paramètres	Variation Intra-arbre			Variation sous effet des coupes partielles		
			Effectifs	Hauteurs	Cernes	Effectifs	Hauteurs	Cernes
Densitomètre à rayon X	Largeur et masse volumique des cernes	Âge cambial	72 échantillons	1,3 m	Cerne par cerne	La détermination du point de transition du bois initial au bois final par le logiciel Matlab™		
		Hauteur	360 échantillons [72 A x 6Hauteurs]	6 ^H				
		Classe sociale	9 Échantillons [3 A x 3 CS]	1,3 m				
Kajaani FS300 de Metso	Longueur et diamètre des trachéïdes	Âge cambial	234 échantillons [3 A x 3CS x 13CS x BI x BF]	1,3 m	13*	1872 échantillons [72 A x 13CS x BI x BF]	1,3 m	3 cernes avant CP 10 cernes après CP
		En hauteur	1404 échantillons [3 A x 3CS x 6H x 13CS x BI x BF]	6 ^H	13*	7488 échantillons [72 A x 4H x 13CS x BI x BF]	4 ^H	2 hauteurs avant la cime et 2 hauteurs après la cime vivante
WinCell	Épaisseur des parois cellulaires	Âge cambial	/			120 échantillons [+2 A x 3CS x 10 C] [-2 A x 3CS x 10 C]	1,3 m	2 sections avant CP 3 sections après CP

(*) Correspond aux cernes : (0-3-6-9-12-15-18-21-30-40-50-60-70) de la moelle vers l'écorce.

(^H) Correspond aux hauteurs : 30 cm, 1,3 m, (15-20) %, (35-40) %, (55- 60) %, (75-80) % de la hauteur totale de l'arbre
A : arbre ; CS : classe sociale ; CP : coupe partielle ; une section regroupe deux cernes ; BI : bois initial et BF : bois final.

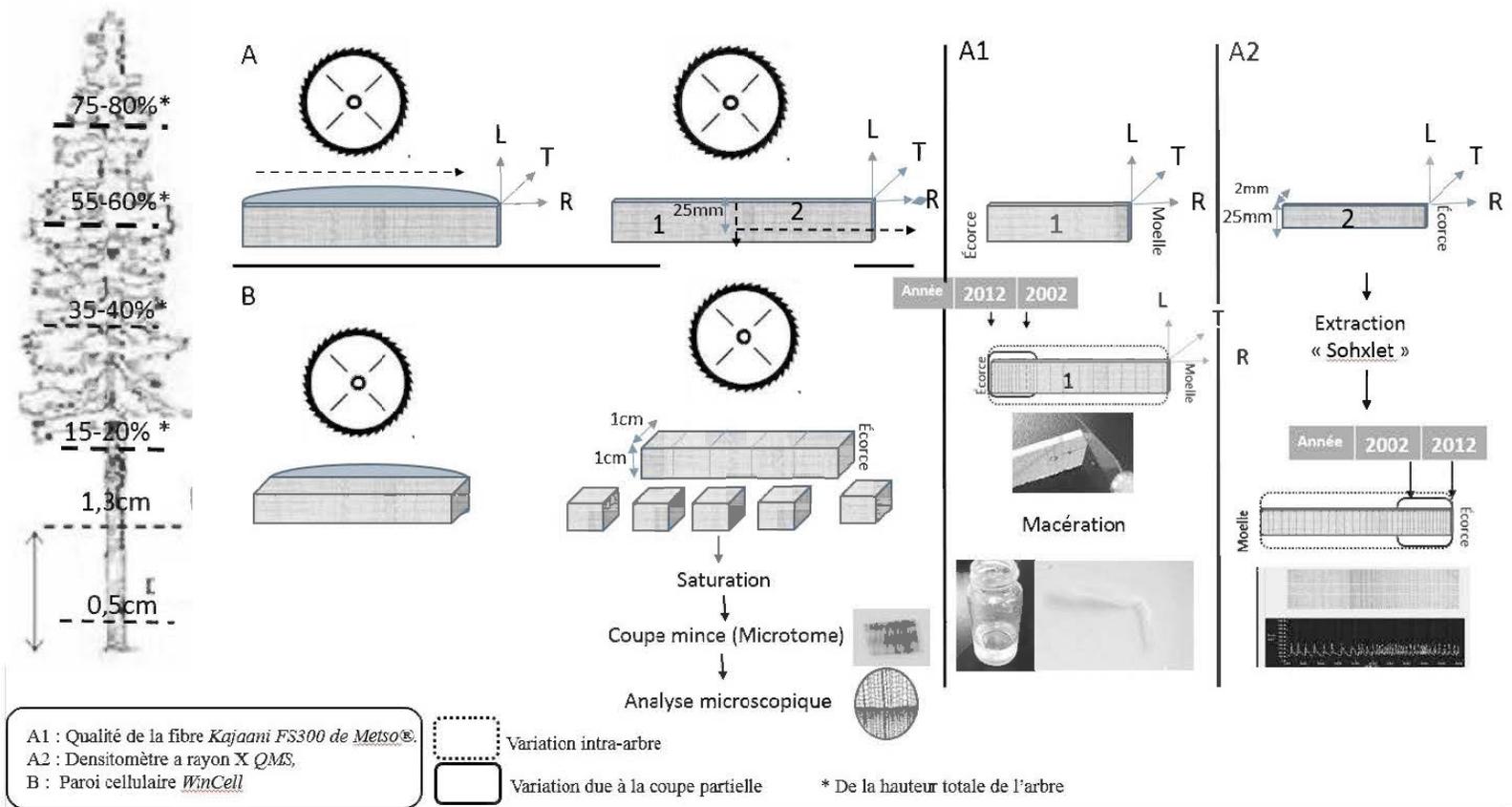


Figure 3.5 Sommaire de l'approche méthodologique

3.4 Analyses statistiques

Les données ont été analysées en utilisant des analyses de variance à critère d'ANOVA, au moyen d'un modèle linéaire à effets mixtes (Gelman et Hill, 2006 ; Pinheiro et Bates, 2006) en utilisant la procédure du programme nlme avec le logiciel R (Pinheiro et Bates, 2006 ; Team, 2014). La provenance des observations est considérée comme un effet aléatoire. Les suppositions de l'homogénéité des variances et de la normalité des résidus ont été vérifiées graphiquement dans R. Le choix de ce modèle est dû à la non-indépendance des données de l'épinette blanche. En effet, le modèle prend en compte le nichage et les mesures répétées à partir du même arbre.

Tous les facteurs (intensités de la coupe partielle, classes sociales de l'arbre, hauteurs, temps depuis la coupe partielle) ont été considérés fixes (Tableau 4.4) à l'exception du bloc, des parcelles expérimentales et de l'arbre qui ont été considérés comme des 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.

Le test de comparaison multiples *Tukey HSD* a été réalisé afin de déterminer les différences significatives entre les moyennes à l'intérieur des effets fixes. L'équation [3.4] montre le modèle utilisé pour étudier les effets des coupes partielles sur les attributs de la qualité du bois étudiée. L'équation [3.5] montre le modèle utilisé pour étudier l'effet du taux de croissance sur l'épaisseur des parois cellulaires.

$$Y_{ijklmn} = \mu + CP_i + CS_j + H_k + T_l + CP*CS_{ij} + CP*H_{ik} + CP*T_{il} + b_m + p_n + ar_o + \varepsilon_{ijklmno} \dots \dots \dots [3.4]$$

Avec Y comme variable [ou variable réponse] expliquée qui représente les propriétés du bois à savoir les composants de la croissance, de la masse volumique et les propriétés morphologiques [la longueur et le diamètre des trachéides et l'épaisseur de la paroi cellulaire] des cernes, du bois initial et du bois final.

Comme variables explicatives on aura μ : effet général [intercepte], CP : effet fixe l'intensité de la coupe partielle, CS effet fixe de la classe sociale de l'arbre, H : effet fixe de la hauteur dans l'arbre, T : effet fixe du temps avant/après la coupe la coupe partielle, CP*CS : interaction entre coupes partielles et classe sociale de l'arbre, CP*H : interaction entre coupe partielle et hauteur b : effet variable du bloc, p : effet variable de parcelle expérimentale, ar : effet variable de l'arbre ε : erreur résiduelle.

L'effet des coupes partielles, sur les propriétés étudiées (Y_{ijklmn}), a été analysé selon un dispositif factoriel où les facteurs sont la classe sociale de l'arbre (3 classes sociales), le traitement (4 intensités de prélèvement), l'arbre (2 arbres par classe sociale par traitement), la hauteur dans l'arbre (6 niveaux) et le temps (-3,-2, -1, 1, 2, 3, 4, 5,6, 7,8, 9,10 où les valeurs négatives représentent les années avant l'année de réalisation des coupes partielles et les valeurs positives après. Les variables réponses correspondaient aux largeurs et masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final ; et la longueur et le diamètre des trachéides.

$$Y_{ijkl} = \mu + CV_i + CS_j + T_k + CV*CS_{ij} + CV*T_{il} + ar_l + \varepsilon_{ijkl} \dots \dots \dots [3.5]$$

Les effets des coupes partielles sur les parois cellulaires ont été analysées selon un dispositif factoriel où les facteurs sont la classe sociale de l'arbre (3 classes sociales), le traitement (4 intensités de prélèvement=PEX), l'arbre (2 arbres par classe sociale), le temps (Av2, Av1, Ap1 Ap2, Ap3) où Av correspond à l'avant coupe et Ap à l'après-coupe. La variable réponse correspondait à l'épaisseur des parois cellulaires. La sélection de modèles par la méthode backward, suppression des variables non significative, a été utilisée dans le cas des échantillons à grands effectifs (>1000

observations), alors que la méthode des AICc plus sensible aux effectifs élevés a été utilisée dans le cas de petits d'échantillons ($\ll 1000$ observations) (Mazerolle, 2012).

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Statistiques descriptives

Les valeurs moyennes des dimensions des trachéides, longueurs et diamètres, du cerne et de ses composantes des trois classes sociales sont présentées dans le tableau 4.1. Les trachéides de l'épinette blanche sont longues et fines, avec une longueur moyenne de 2,30 mm et un diamètre moyen de 22 μm , ces valeurs sont supérieures chez les arbres dominants, suivis des codominants et finalement des opprimés. Une très légère, voire même négligeable, variation entre la longueur et le diamètre des trachéides du bois initial et celle du bois final a été observée. Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées pour l'épinette blanche par Mvolo *et al.*, (2015 b).

Les valeurs moyennes pour les largeurs, les masses volumiques du cerne et de ses composantes de tous les arbres échantillonnés des trois classes sociales de l'épinette blanche étudiées sont présentées dans le tableau 4.2. On a constaté une importante variation de la largeur du cerne où cette propriété varie de 1 mm chez les opprimés à 2,37 mm chez les codominants. La variation de la largeur du cerne entre les classes sociales est principalement due à la variation du bois initial (varie de 0,9 à 1,85 mm) que celle du bois final (varie de 0,31 à 0,53 mm). La valeur moyenne des largeurs des cernes pour les trois classes sociales étudiées est de 1,69 mm. Cette valeur est 1,37 fois inférieure à celle rapportée par Beaulieu et Corriveau, (1985) en plantation et par Corriveau *et al.*, (1990) dans une forêt

Tableau 4.1 Valeurs moyennes et coefficients de variation (% entre parenthèses) de la longueur et du diamètre des trachéides du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche pour tous les traitements et les hauteurs des trois classes sociales

	Longueur des trachéides (mm)		
	Cerne	Bois initial	Bois final
Dominant	2,50 (25)	2,40 (26)	2,53 (25)
Codominant	2,34 (24)	2,30 (26)	2,36 (21)
Opprimé	2,15 (22)	2,11 (23)	2,18 (21)
Moyenne	2,30 (24)	2,30 (26)	2,38 (23)
	Diamètre des trachéides (μm)		
	Cerne	Bois initial	Bois final
Dominant	23 (13)	22 (12)	24 (12)
Codominant	22 (12)	21 (11)	23 (11)
Opprimé	21 (13)	21 (13)	22 (13)
Moyenne	22 (13)	21 (12)	23 (12)

Tableau 4.2 Valeurs moyennes et coefficients de variation (% entre parenthèses) des largeurs, des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche pour tous les traitements, les hauteurs des trois classes sociales

	Largeur (mm)			Bois final (%)
	Cerne	Bois initial	Bois final	
Dominant	2,37 (51)	1,85 (54)	0,53 (85)	22,63 (50)
Codominant	1,46 (56)	1,20 (64)	0,36 (74)	24,34 (46)
Opprimé	1,00 (61)	0,90 (69)	0,31 (67)	28,00 (45)
Moyenne	1,83 (62)	1,41(67)	0,42 (86)	24,45 (86)
Masse volumique (kg m ⁻³)				
	Cerne	Bois initial	Bois final	Transition
Dominant	451 (10)	389 (11)	696 (15)	600 (14)
Codominant	451 (10)	389 (11)	676 (14)	584 (13)
Opprimé	452 (11)	389 (11)	631 (15)	554(13)
Moyenne	451 (10)	389 (11)	674 (15)	584 (14)

naturelle. La proportion du bois final est de 24 %. Cette valeur est similaire à celle de Corriveau *et al.*, (1990) pour cette même essence.

La masse volumique moyenne du bois des arbres des trois classes sociales est de 451 kg m³, où la masse volumique du bois final (674 kg m⁻³) est supérieure (42 % de plus) à celle du bois initial (389 kg m⁻³). La masse volumique moyenne de l'épinette blanche dans ce peuplement mixte est similaire à celle trouvée par Mvolo *et al.*, (2015 a) pour l'épinette blanche dans une forêt naturelle.

4.2 Variation intra-arbres des propriétés physiques et anatomiques du bois

4.2.1 Variation radiale et longitudinale de la largeur des cernes

Les variations radiales de la largeur du cerne, du bois initial, du bois final et de la proportion du bois final sont illustrées dans la figure 4.1. Les largeurs moyennes des du cerne du bois initial augmentent légèrement pour les 7 premiers cernes près de la moelle où elles atteignent une valeur maximale de 2,55 mm et 2 mm, respectivement. Par la suite, les largeurs moyennes diminuent régulièrement du cerne 7 jusqu'au cerne 30 pour atteindre une valeur de 1,05 mm. 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 (entre 1,32 et 1,13 mm) à partir de l'âge cambial de 35-40 ans jusqu'à l'écorce. La variation radiale du bois final, quant à elle, a un patron différent caractérisé par une diminution aux premiers cernes, suivie d'un plateau. Ces modèles de variation sont similaires à ceux rapportés pour la croissance annuelle de l'épinette blanche par Corriveau *et al.*, (1987; 1990) et Mvolo *et al.*, (2015 a) en forêt naturelle

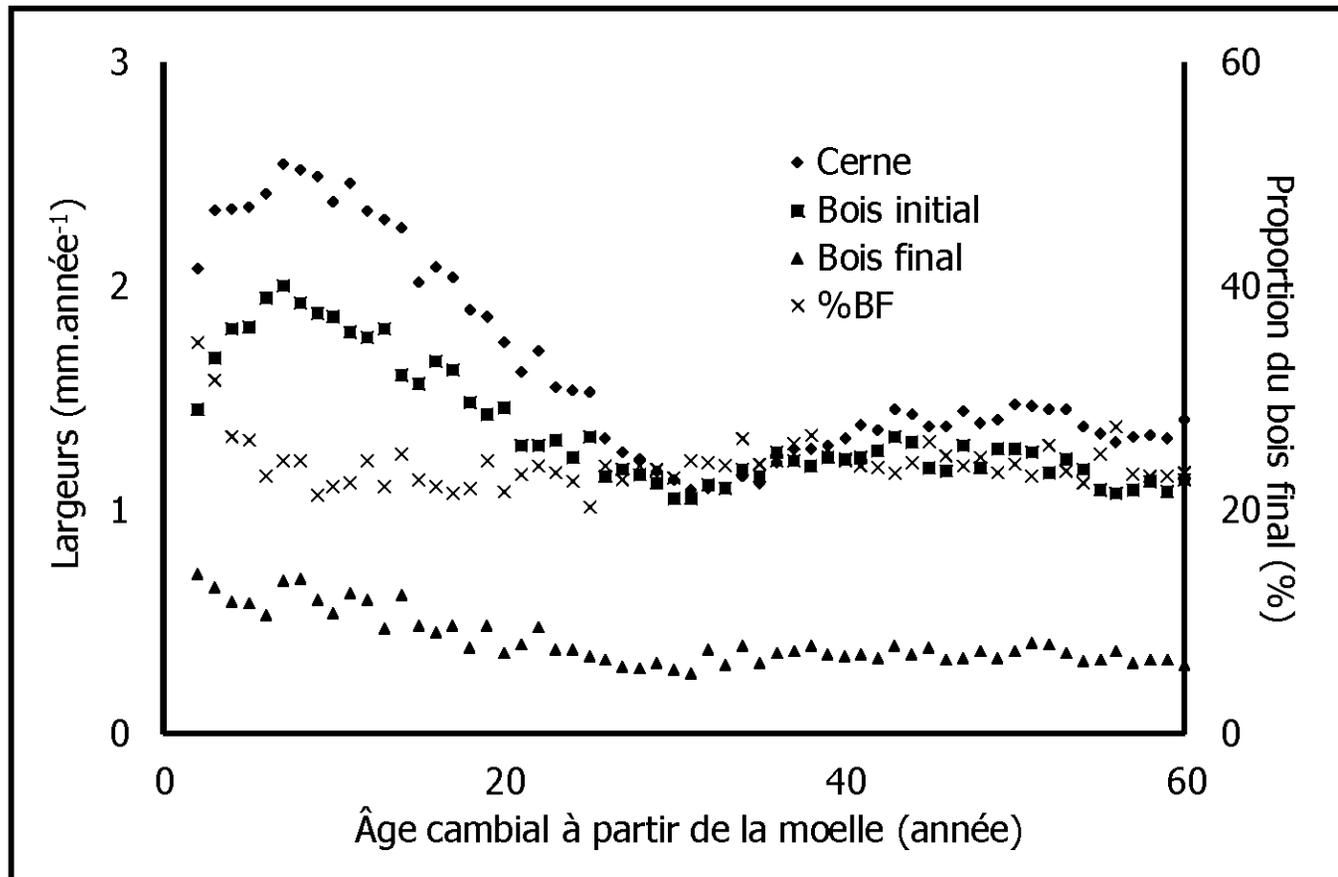


Figure 4.1 Variation des largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche en fonction de l'âge cambial au DHP

et par Beaulieu et Corriveau, (1985) en plantation, et pour d'autres essences résineuses telle que l'épinette noire (Koubaa *et al.*, 2005).

Dans les peuplements mixtes, faisant l'objet de la présente étude, l'épinette blanche était associée principalement au peuplier faux-tremble. Ce dernier se caractérise par une croissance plus rapide que celle de l'épinette blanche (Thorpe, 1992). Ainsi, la présence du peuplier faux-tremble influence négativement l'activité du cambium et, par conséquent, la croissance de l'épinette blanche (Comeau et Heineman, 2003 ; Balandier *et al.*, 2006) (Figure 4.1). En effet, sous l'effet de la compétition du peuplier faux-tremble, la largeur moyenne des cernes de l'épinette blanche diminue au point de provoquer des cernes étroits à la maturité. Alors que, la légère augmentation observée entre 40 et 60 ans est expliquée par la circonférence de l'arbre avec l'augmentation de l'âge cambial et non pas au vieillissement du cambium (Koubaa *et al.*, 2005).

La Figure (4.2 A) illustre la variation longitudinale des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final selon l'âge cambial. La variation longitudinale de la croissance annuelle est relativement faible comparée à la variation radiale (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.

Aux Figures 4.2B, C et D, on observe les différences entre les patrons de variations longitudinales selon l'âge cambial. Pour les variations des largeurs des cernes (Figure 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 H0 (0,3 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 0,3 m, le patron est l'opposé, où les largeurs du cerne et du bois initial ont une tendance à augmenter jusqu'à 25 ans. À partir de 20-25 ans, pour toutes les hauteurs, les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final commencent à se stabiliser avec l'âge cambial et à diminuer avec la hauteur.

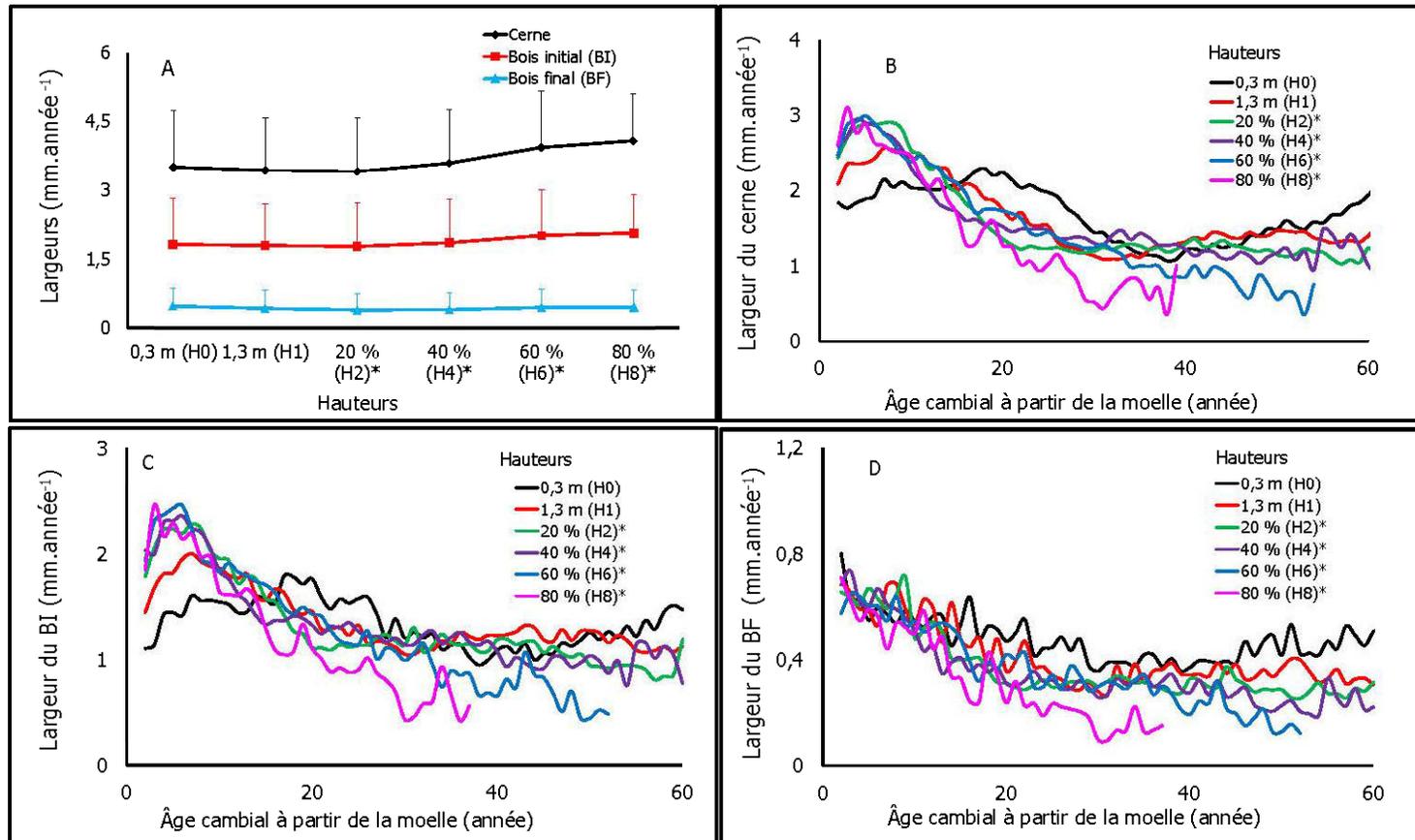


Figure 4.2 Variation longitudinale des composantes de la largeur moyenne du cerne de l'épinette blanche selon l'âge cambial : A. Largeurs moyennes du cerne et de ses composantes (les barres représentent les écarts-types) ; B. Largeur moyenne du cerne ; C. Largeur moyenne du bois initial (BI) ; D. Largeur moyenne du bois final (BF). * Hauteurs relatives par rapport à la hauteur totale de l'arbre

dans l'arbre. Des tendances similaires ont été rapportées par Kasraoui, (2011) pour le pin gris et par Ourais, (2012); Alteyrac, (2005) et Dos Santos, (2014) pour l'épinette noire

La croissance reflète à la fois les effets environnementaux et les processus biologiques qui ont eu lieu dans la cime vivante (Briand *et al.*, 1993 ; Deslauriers *et al.*, (2008). Selon Fabris, (2000) et Larson *et al.*, (2001), la cause principale de la variation de la largeur du cerne est la relation entre la taille de la cime vivante et la longueur de la tige exemptée des branches. Dans le bois juvénile, les largeurs du cerne et du bois initial augmentent de la base de l'arbre vers le sommet. En effet, plus on se rapproche de la cime vivante, plus, on a des cernes larges. Toutefois, les tendances des largeurs du cerne et du bois initial, dans le bois mature, s'inversent. Ainsi, le cambium a tendance à produire des cernes de largeur plus étroite avec la hauteur dans l'arbre (Figures 4,2B et C) (Alteyrac, 2005). Cette variation supporte la théorie de l'expansion cellulaire le long de la hauteur de l'arbre qui soutient l'hypothèse d'un gradient de concentration décroissante d'auxine du sommet à la base de l'arbre (Plomion *et al.*, 2001; Larson *et al.*, 2001; Bouslimi *et al.*, 2014).

4.2.2 Variation radiale et longitudinale de la masse volumique

Les profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne et du bois initial de l'épinette blanche selon l'âge cambial (Figure 4.3) suit le modèle II décrit par Panshin et de Zeeuw, (1980) caractérisé par une diminution près de la moelle et par une augmentation vers l'écorce. Les premiers cernes sont caractérisés par une masse volumique élevée probablement due à la formation du bois de compression. Après cela, la masse volumique moyenne diminue rapidement pour atteindre un minimum vers la zone de transition du bois juvénile au bois mature. Cette transition, située entre les

cernes 10 et 20 chez l'épinette blanche, constitue la première source de variation de la masse volumique du bois des épinettes (Koubaa *et al.*, 2005). Par la suite, la masse volumique moyenne augmente progressivement dans le bois mature. La masse volumique moyenne du bois initial suit le même patron que celui de la masse volumique moyenne du cerne. La masse volumique moyenne du bois final augmente progressivement de la moelle jusqu'à l'écorce. Ces modèles de variation sont similaires à ceux rapportés pour l'épinette blanche par Corriveau *et al.*, (1987, 1990) et Mvolo *et al.*, (2015 a) en forêt naturelle, par Beaulieu et Corriveau, (1985) en plantation, et pour d'autres essences résineuses telles que l'épinette noire (Koubaa *et al.*, 2005; Ourais, 2012).

La variation radiale de la masse volumique moyenne pourrait être expliquée par la variation de la largeur du cerne (Koga et Zhang, 2004). Le patron de variation de la masse volumique moyenne du bois final varie selon la croissance et les conditions climatiques alors que la masse volumique du bois initial est indépendante de ces facteurs (Bouriaud *et al.*, 2005). En effet, 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 (Larson *et al.*, 2001).

Les variations longitudinales des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge cambial sont présentées à la figure 4.4. De façon générale, la masse volumique diminue légèrement de la base au sommet de l'arbre (4.4A). Des résultats similaires ont été rapportés pour le pin gris (Park *et al.*, 2009).

Les Figures 4.4B, C, D illustrent les variations longitudinales des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge cambial. De manière générale, les masses volumiques moyennes du cerne et du bois initial ont une tendance

à diminuer aux premières années de croissance (0-15ans), où elles atteignent la zone de transition bois juvénile au bois mature entre l'âge 0 et 15 ans, on observe une diminution de la masse volumique moyenne du cerne et du bois initial de la hauteur H0 (0,3 m) vers les autres hauteurs relatives (H2, H4, H6, H8) correspondant à (15-20 %, 35-40 %, 55-60 % et 75-80 %, respectivement). À partir de 20ans, la masse volumique moyenne du cerne tend à augmenter avec l'âge et à diminuer légèrement avec la hauteur dans l'arbre tandis que la masse volumique du bois initial reste pratiquement constante avec l'âge et la hauteur dans l'arbre. Pour le bois final, la masse volumique moyenne augmente avec l'âge cambial et la hauteur dans l'arbre. Des patrons similaires de variation longitudinale de la masse volumique ont été rapportés par Alteyrac (2005) et Ourais (2012) pour le bois de l'épinette noire et par Park *et al.*, (2009) et Kasraoui (2011) pour le bois du pin gris.

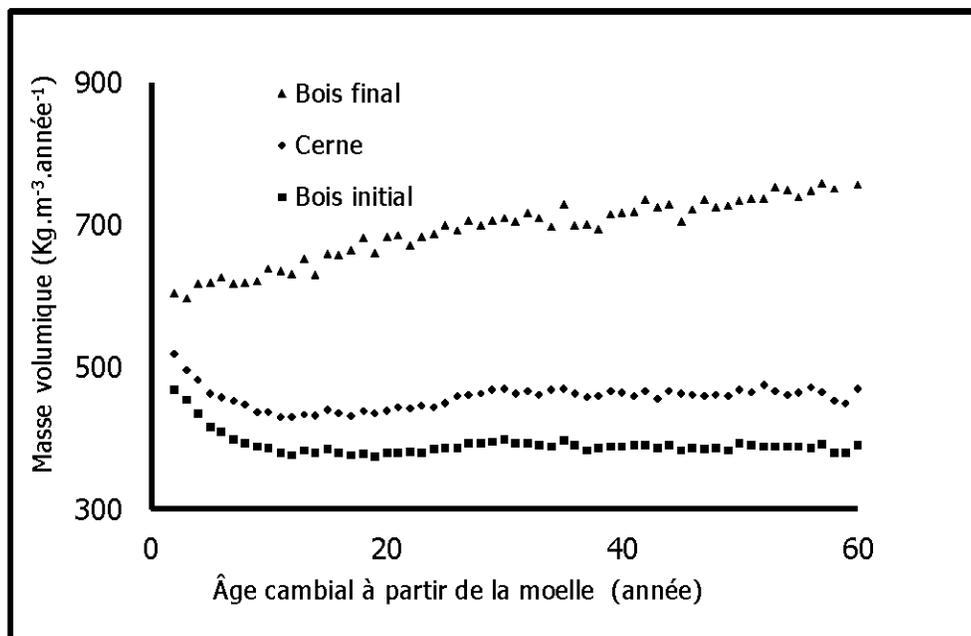


Figure 4.3 Variation des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche en fonction de l'âge cambial au DHP

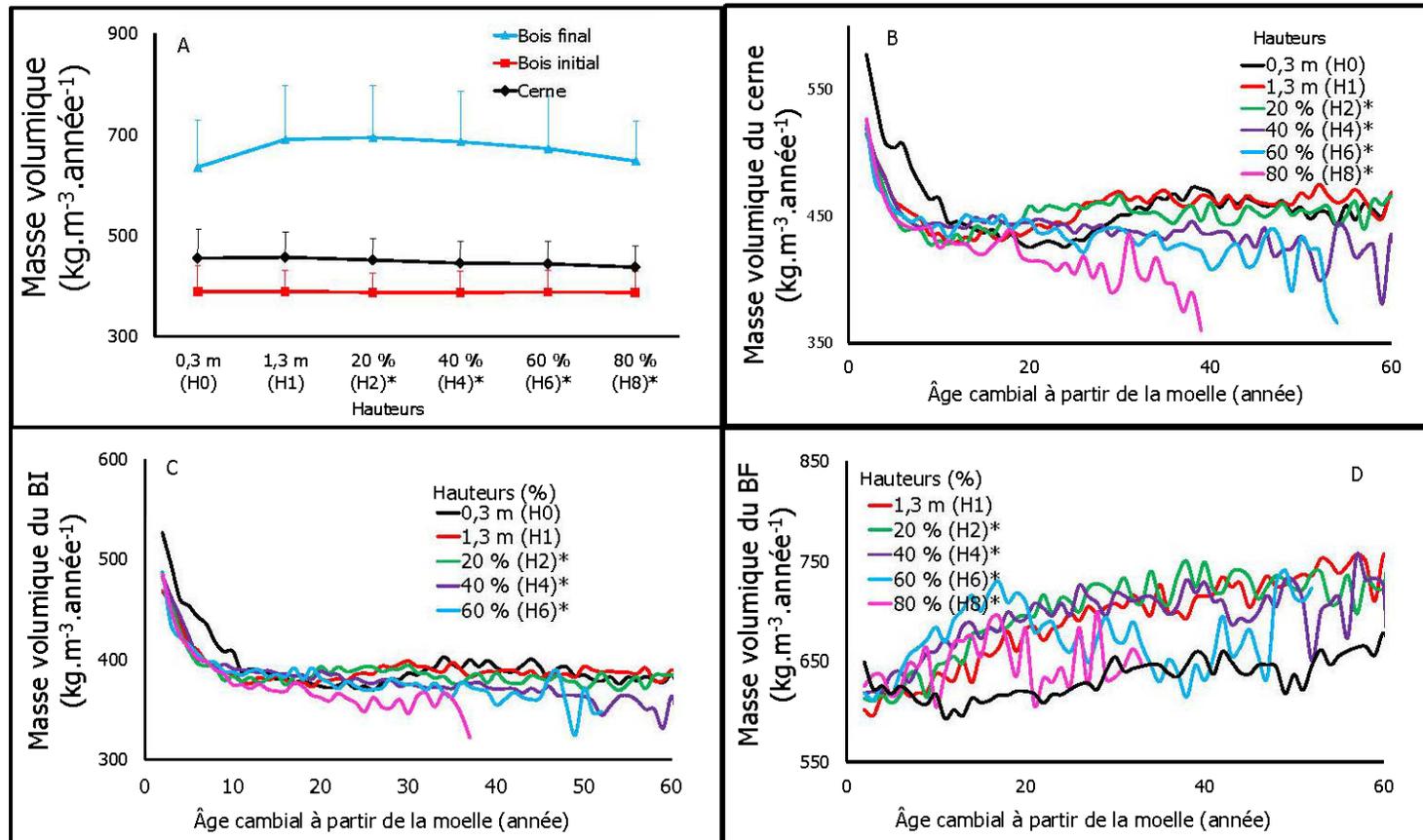


Figure 4.4 Variation longitudinale de la masse volumique moyenne de l'épinette blanche : A. Masses volumiques moyennes du cerne et de ses composantes en fonction des hauteurs relatives ; B. Masse volumique moyenne du cerne, C. Masse volumique du bois initial, D. Masse volumique moyenne du bois final en fonction de l'âge cambial.

4.2.3 Variation radiale et longitudinale de la morphologie des trachéides

Les profils de variation radiale de la longueur et du diamètre des trachéides sont illustrés dans les figures 4.5A, B. Les trachéides sont plus courtes et plus étroites à 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 30 ans et demeurent relativement constantes par la suite (Figure 4.5A). Le diamètre, des trachéides, présente une étendue de variation radiale plus faible que la longueur, il varie de 18 à 24 μm (coefficient de variation [CV] de 13%) alors que la longueur varie de 1,26 à 2,71 mm (CV de 25%) (Tableau 4.5). Le diamètre des trachéides augmente de la moelle vers l'écorce (Figure 4.5B).

Ces modèles de variation sont similaires à ceux rapportés dans plusieurs études antérieures (Zobel et Van Buijtenen, 1989; Peterson *et al.*, 2007; Bouslimi *et al.*, 2014; Mvolo *et al.*, 2015 b). Selon Anfodillo *et al.*, (2012), le patron de variation radiale du diamètre des trachéides est contrôlé par la distance de la fibre du sommet de l'arbre et de l'influence du volume de la cime vivante sur cette propriété durant sa formation. Les variations longitudinales de la longueur et du diamètre des trachéides sont illustrées aux figures 4.6 et 4.7. La longueur et le diamètre des trachéides augmentent de la base à la hauteur relative H6, puis les dimensions sont légèrement réduites.

De façon générale, la variation longitudinale des dimensions des trachéides est très importante. Les trachéides présentent une plus faible variation longitudinale au niveau de diamètre que de longueur des trachéides (Figures 4.7 et 4.6). En effet, la longueur des trachéides varie de 2,15 à 2,50 mm (CV de 24%) avec la hauteur alors que leur largeur a une étendue de variation de 21 à 23 μm (CV de 13%) (Tableau 4.5). En plus, on remarque que les trachéides deviennent plus longues et plus larges avec la hauteur

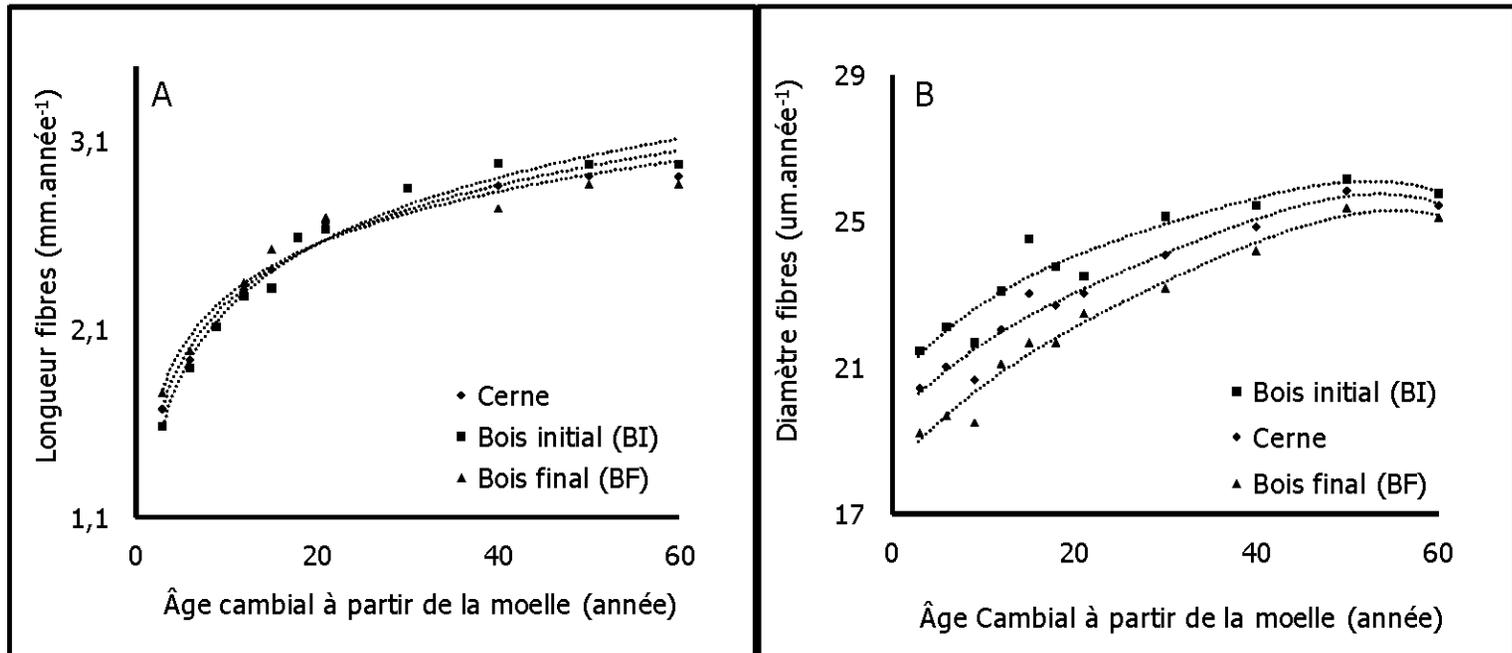


Figure 4.5 Variation des dimensions des trachéides du cerne et de ses composants chez l'épinette blanche en fonction de l'âge cambial. A. Variation radiale de la longueur des trachéides, B. Variation radiale du diamètre des trachéides.

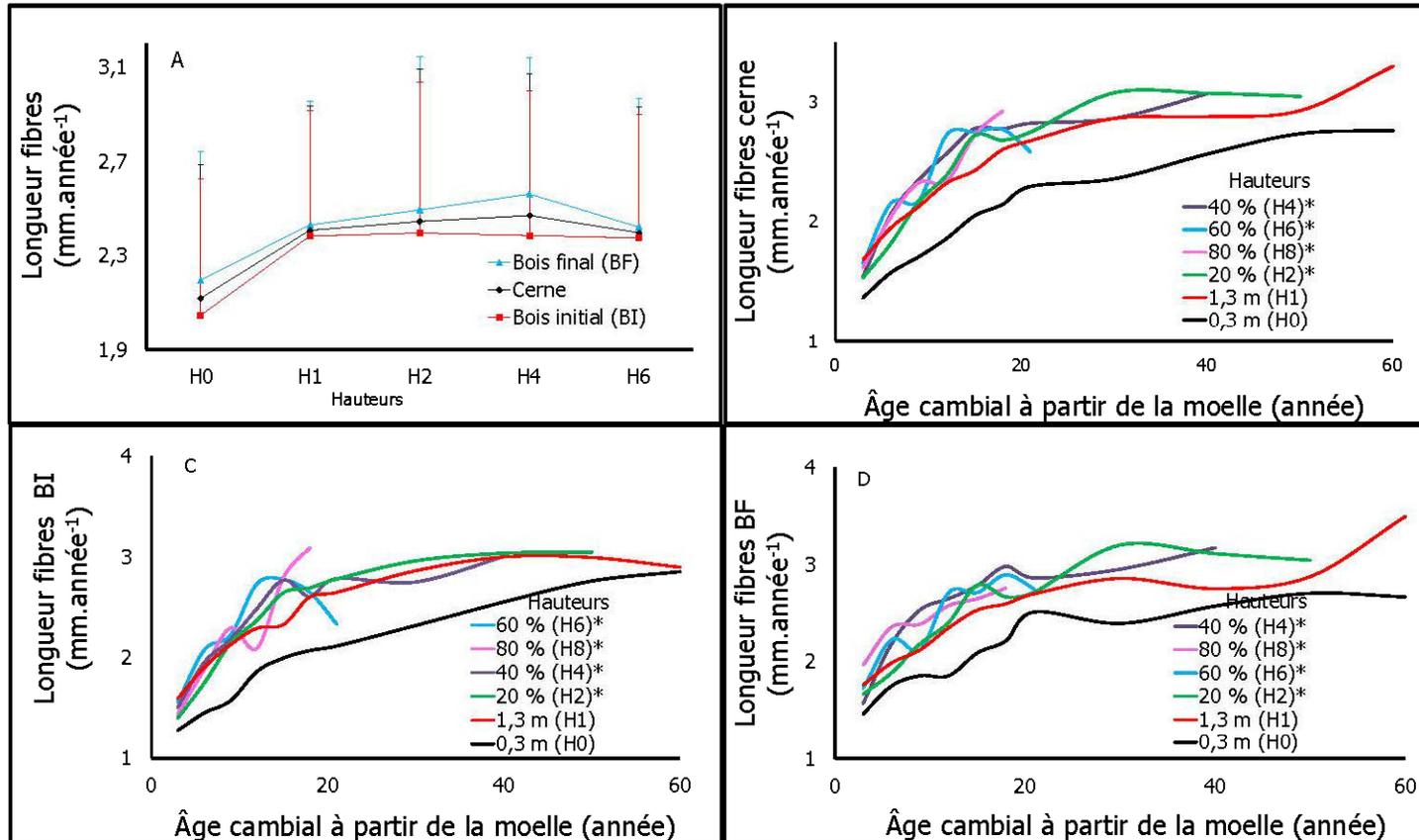


Figure 4.6 : Variation longitudinale de la longueur moyenne des trachéides de l'épinette blanche : A. Longueur moyenne des fibres du cerne et de ses composantes en fonction des hauteurs ; B. Longueur moyenne des fibres du cerne, C. Longueur moyenne des fibres du bois initial, D. Longueur moyenne des fibres du bois final en fonction de l'âge cambial à différentes hauteurs. *Hauteurs relatives par rapport à la hauteur totale dans l'arbre.

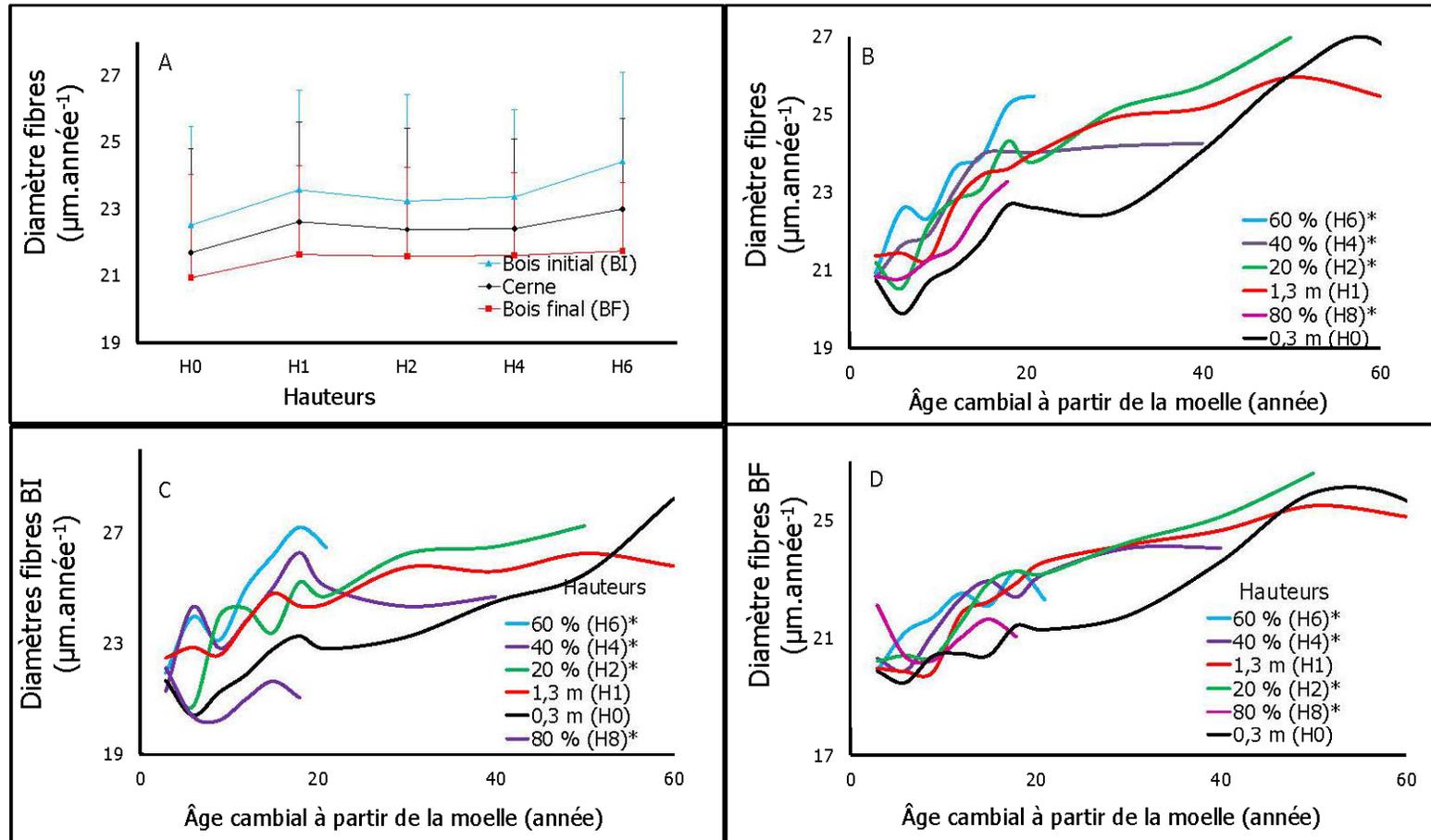


Figure 4.7 Variation longitudinale du diamètre moyen des trachéides de l'épinette blanche : A. Diamètre moyen des fibres du cerne et de ses composantes ; B. Diamètre moyen des fibres du cerne, C. Diamètre moyen des fibres du bois initial, D. diamètre moyen des fibres du bois final en fonction de l'âge cambial à différentes hauteurs.

dans l'arbre en atteignant la valeur maximale à la hauteur de H4 (35-40 %) et H1 (1,3 m) respectivement, par la suite, leurs dimensions sont légèrement réduites. À n'importe quelle hauteur dans l'arbre, les trachéides sont courtes et plus étroites à proximité de la moelle. Nos résultats rejoignent les résultats de Mvolo *et al.*, (2015 b). À une hauteur donnée 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 (Larson *et al.*, 2001 ; Anfodillo *et al.*, 2012).

4.3 Effet des coupes partielles

Les variations des composantes de la largeur et de la masse volumique du cerne, ainsi que des propriétés anatomiques en fonction de l'intensité des coupes partielles et de la classe sociale sont illustrées aux tableaux 4.6-4.9. Les résultats de l'analyse de variance des tous les effets fixes sur les propriétés étudiées sont présentés dans le tableau 4.4 et ceux des comparaisons multiples dans les tableaux 4.6, 4.7 et 4.8. Les résultats de l'analyse de variance des effets aléatoires sur toutes les propriétés étudiées ne sont pas présentés, car ils se sont révélés non significatifs.

4.3.1 Croissance radiale (largeur du cerne)

La coupe partielle a eu un effet sur la croissance du cerne, du bois initial et du bois final (Tableau 4.4). Les résultats des comparaisons multiples de *Tukey*, entre les différentes intensités de coupes partielles, ont révélé qu'il n'y avait pas de différence significative entre l'effet des coupes partielles intermédiaires (50 et 65 % [ST] de feuillu récoltée) et celle du témoin (0 % de récolte). Seule la coupe partielle extrême (100 % [ST] de

feuillu récoltée) a promu la croissance moyenne du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette blanche par rapport au témoin (Tableau 4.5, Figure 4.8).

On a constaté un gain de 33,3 % en moyenne de la largeur moyenne du cerne des arbres issus de la coupe partielle extrême (100 % [ST] de feuillu récoltée) par rapport aux arbres issus du témoin (0 % de récolte). En effet, la récolte de 100 % [ST] de feuillu a augmenté la largeur moyenne du bois initial de 32,7 % et la largeur moyenne du bois final de 40 % par rapport aux arbres qui n'ont pas subi de traitement (Tableau 4.5, Figure 4.10). Le meilleur gain en croissance (croissance relative coupe partielle par rapport au témoin) a été observé chez les arbres opprimés, suivi des codominants et finalement des dominants avec des gains de 57,4 %, 32,7 % et 14,2 %, respectivement (Tableau 4.5).

L'effet de la coupe partielle sur les largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final est significatif, mais il est modulé par le temps après la coupe et la hauteur dans l'arbre (Tableau 4.4). En effet, l'effet de coupe partielle en interaction avec le temps, après intervention, est significatif pour les largeurs moyennes du cerne, du bois initial et même celle du bois final. On remarque que l'effet sur la croissance est significatif sur les 10 années suivant la coupe partielle extrême (Figure 4.8, 4,9A, 4,9B).

L'augmentation de la largeur moyenne du cerne et du bois initial après la coupe partielle, et plus spécifiquement après la récolte de 100 % [ST] de peuplier faux-tremble mature, concorde avec les résultats de Smith *et al.*, (2016) pour ce même peuplement. Les auteurs ont attribué l'augmentation diamétrale et volumétrique des arbres résiduels de l'épinette blanche à l'accessibilité à plus de lumière et ressources nutritives après la réduction de la compétition entre les arbres. En effet, une augmentation de l'accroissement en volume par tige se traduit, à l'échelle du cerne, par une augmentation de la largeur moyenne des cernes et de la proportion du bois initial

(bois de printemps) (Koubaa *et al.*, 2000). La lumière engendrée à la suite du traitement extrême a stimulé le développement de la cime vivante des arbres résiduels et par conséquent la production d'auxine, l'hormone de croissance, ce qui favorise l'augmentation de la largeur du cerne et du bois initial. L'augmentation de la largeur du bois final quant à elle est surprenante. Cette propriété est régie par des facteurs environnementaux autres que la lumière, mais spécifiquement l'humidité du sol (Smith, 1968 ; Bassett, 1969 ; Larson, 1972). Nous spéculons que la diminution de la compétition a pu retarder le degré d'assèchement du sol, ce qui s'est traduit par une prolongation de la fin de la saison de croissance et ainsi l'augmentation de la largeur moyenne du bois final. Ce résultat rejoint celui de Larson, (1972) pour des résineux dans l'état de Washington et ceux de Smith, (1968) et Bassett, (1969) pour le pin à l'encens (*Pinus taeda*) aux États-Unis.

De la même façon, l'interaction de l'effet de coupe partielle et la hauteur dans l'arbre est significative pour les largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final (Tableau 4.4). La variation de la croissance radiale entre les hauteurs dans l'arbre ne suit pas un patron linéaire et varie à l'intérieur du même traitement (Figure 4.11A). En effet, on a constaté qu'à l'intérieur du même traitement, il y a une diminution de la largeur moyenne du cerne de la base vers les hauteurs intermédiaires, suivi par une augmentation vers le sommet de l'arbre. Par contre, à une hauteur donnée, la coupe partielle extrême a induit à l'augmentation de la largeur moyenne du cerne des arbres par rapport aux témoins (Figure 4.11A). Une légère augmentation de la croissance a été observée pour les coupes partielles intermédiaires (50 et 65%).

De nombreuses études suggèrent que l'emplacement de la cime vivante est la clé pour comprendre la variabilité de la qualité du bois le long de la tige chez les conifères (Fabris, 2000 ; Gartner *et al.*, 2002). En effet, le bois juvénile diffère grandement du bois mature, un changement dans les propriétés du bois avec la hauteur est automatique puisque la proportion de bois juvénile dans les souches augmente intensivement à partir

de la base vers le sommet (Zobel et Van Buijtenen, 1989 ; Gartner *et al.*, 2002). Cela pourrait justifier l'augmentation de la largeur moyenne du cerne de la base (plus de bois mature) vers le sommet (plus de bois juvénile) (Bouslimi *et al.*, 2014).

L'effet de la coupe partielle est indépendant de la classe sociale de l'arbre (Tableaux 4.4 et 4.5). En effet, la classe sociale de l'arbre a un effet significatif sur la croissance radiale. Cependant, l'impact de la classe sociale de l'arbre varie dans le temps. On constate une diminution de la largeur du cerne, du bois initial et du bois final dans le temps (Tableau 4.6).

Les résultats de comparaison multiple ont révélé que les largeurs moyennes du cerne (1,35-1,9 mm) et du bois initial (1,02-1,51 mm) des arbres dominants sont significativement supérieures à celles des arbres opprimés. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre la largeur moyenne du cerne (1,60-1,93 mm) et du bois initial (1,23-1,51 mm) des arbres dominants et des arbres codominants, respectivement. Aussi, il n'y a pas de différence significative entre les largeurs moyennes du cerne (1,35-1,60 mm) et du bois initial (1,02-1,23 mm) des arbres opprimés et des arbres codominants, respectivement. Les largeurs moyennes ajustées du bois final des trois classes sociales (0,33-0,37-0,42 mm) ne sont pas significativement différentes (dominant, codominant et opprimés respectivement). Toutefois, il est important de souligner un gain en croissance important (50.6%) au niveau du bois final des arbres opprimés par rapport aux arbres dominants après la coupe extrême.

En termes de croissance absolue, les arbres dominants présentaient des largeurs moyennes du cerne et de ses composants supérieures à celles des arbres codominants et supprimés. Cela était probablement dû à leur plus grande hauteur et à la circonférence initiale, qui leur ont donné une plus grande capacité à accumuler les ressources nécessaires à leur développement. En terme relatifs, les arbres opprimés ont montré la plus grande amélioration en croissance annuelle après intervention probablement parce

qu'ils avaient un plus grand potentiel de croissance que les arbres codominants et dominants. De plus, les arbres opprimés ont connu le plus grand changement dans des conditions environnementales après la coupe partielle extrême. Tous les trois statuts sociaux ont réagi de façon similaire en termes de croissance radiale, mais les arbres les plus vigoureux avec des taux de croissance plus élevés ont continué d'avoir des taux de croissance supérieurs après coupe partielle extrême.

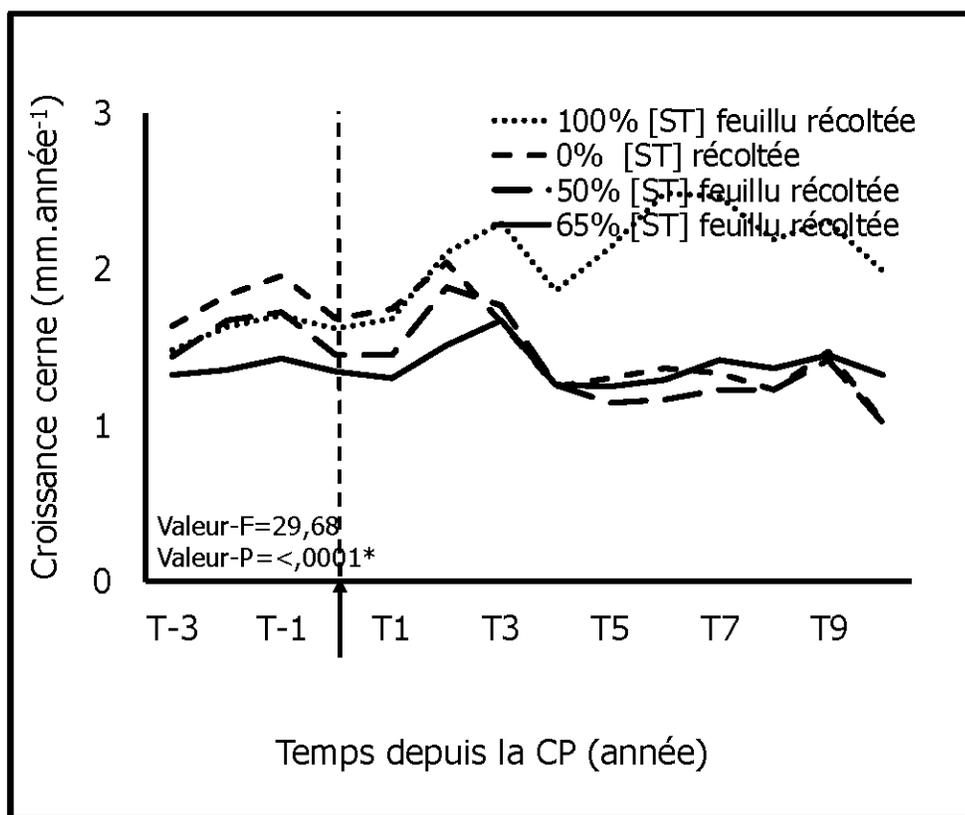


Figure 4.8 Effet des coupes partielles sur la croissance radiale du cerne de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.

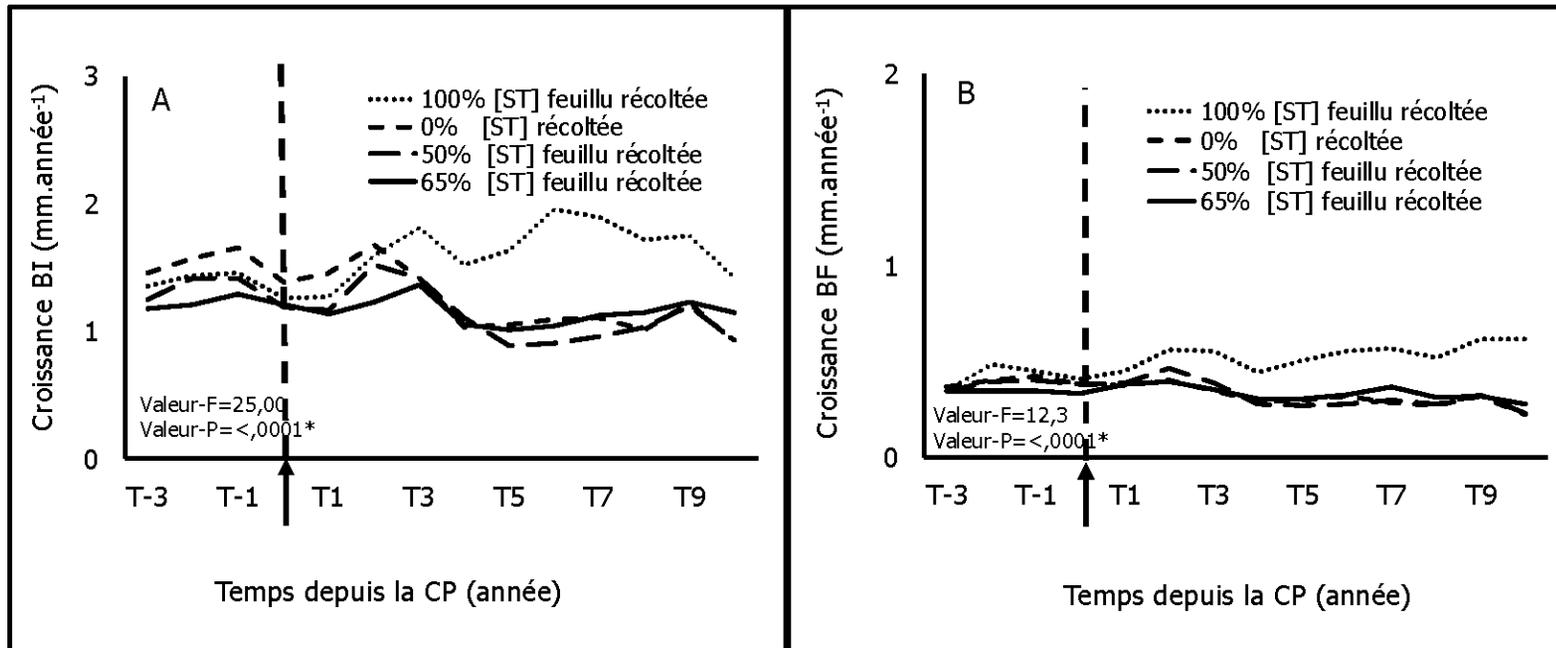


Figure 4.9 Effet des coupes partielles sur A. Croissance radiale du bois initial (BI) et B. Croissance radiale du bois final (BF) de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.

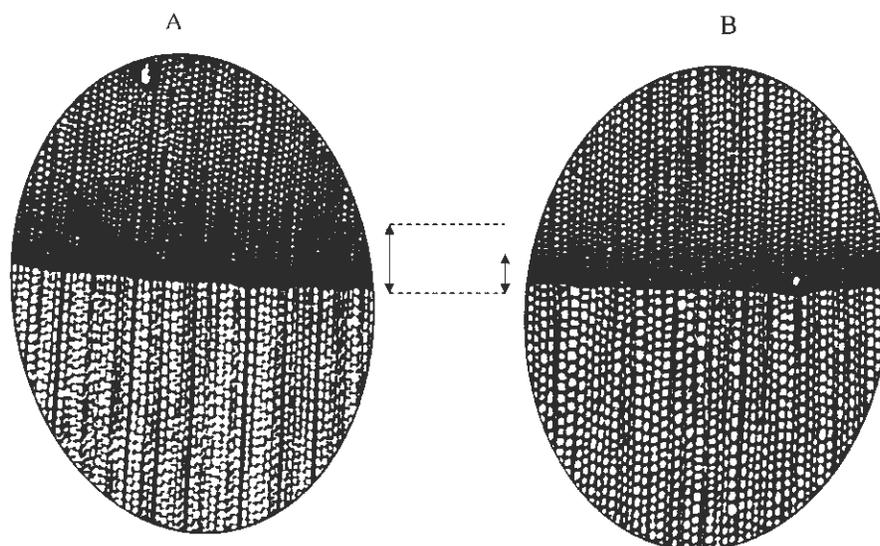


Figure 4.10 A. Largeur du bois final de l'épinette blanche après la récolte de 100 % de [ST] de feuillu récoltée par rapport à B. Largeur du bois final à 0 % [ST] de feuillu récoltée. Grossissement 100x

4.3.2 Masse volumique

L'effet de la coupe partielle sur les masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final est significatif, mais il est modulé par le temps depuis la coupe et la hauteur dans l'arbre (Tableau 4.4).

L'effet de la coupe partielle en interaction avec le temps, depuis l'intervention, est significatif sur les masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final (Tableau 4.4). En effet, le test de comparaison multiple des moyennes de *Tukey* des masses volumiques moyennes avant et après la coupe partielle extrême a montré une augmentation significative de la masse volumique moyenne. L'augmentation de la masse volumique moyenne a été enregistrée au cours des trois années suivant la coupe partielle extrême, par la suite la masse volumique moyenne s'est stabilisée et est restée

supérieure à la masse volumique moyenne des arbres témoins (Figure 4.12, Tableau 4.6).

L'effet de la coupe partielle en interaction avec la hauteur dans l'arbre est significatif sur les masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final (Tableau 4.4). À l'intérieur de chaque traitement y compris du témoin, la variation des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final ont révélé une diminution de la base vers le sommet (Figure 4.11B). Cependant, à une hauteur donnée, les résultats des comparaisons multiples ont révélé une augmentation de la masse volumique moyenne du cerne (Figure 4.11B).

En général, la masse volumique moyenne du bois a tendance à diminuer après une coupe partielle. Cela est dû à l'augmentation de la largeur moyenne du bois initial sans augmentation de celle du bois final (Brazier, 1970). Cependant, les résultats de cette étude montrent que la largeur moyenne du bois final, elle aussi, a augmenté et par conséquent, la proportion du bois final, ce qui pourrait expliquer, entre autres, l'augmentation de la masse volumique moyenne du cerne.

L'augmentation de la proportion du bois juvénile de la base vers le sommet (Zobel et Van Buijitenen, 1989) pourrait expliquer la diminution de la masse volumique en hauteur avec l'augmentation de la largeur du cerne, et la proportion de la cime vivante à l'intérieur du même traitement.

L'analyse des comparaisons multiples ne détecte pas de différences significatives entre les moyennes ajustées de la masse volumique du cerne et du bois initial des différentes classes sociales de l'arbre. Cependant, la classe sociale de l'arbre a eu un impact sur la masse volumique du bois final. En effet, la moyenne ajustée de la masse volumique du bois final des arbres dominants (707 kg m^{-3}) est 10 % supérieure à celle des arbres opprimés (639 kg m^{-3}) (Tableau 4.9).

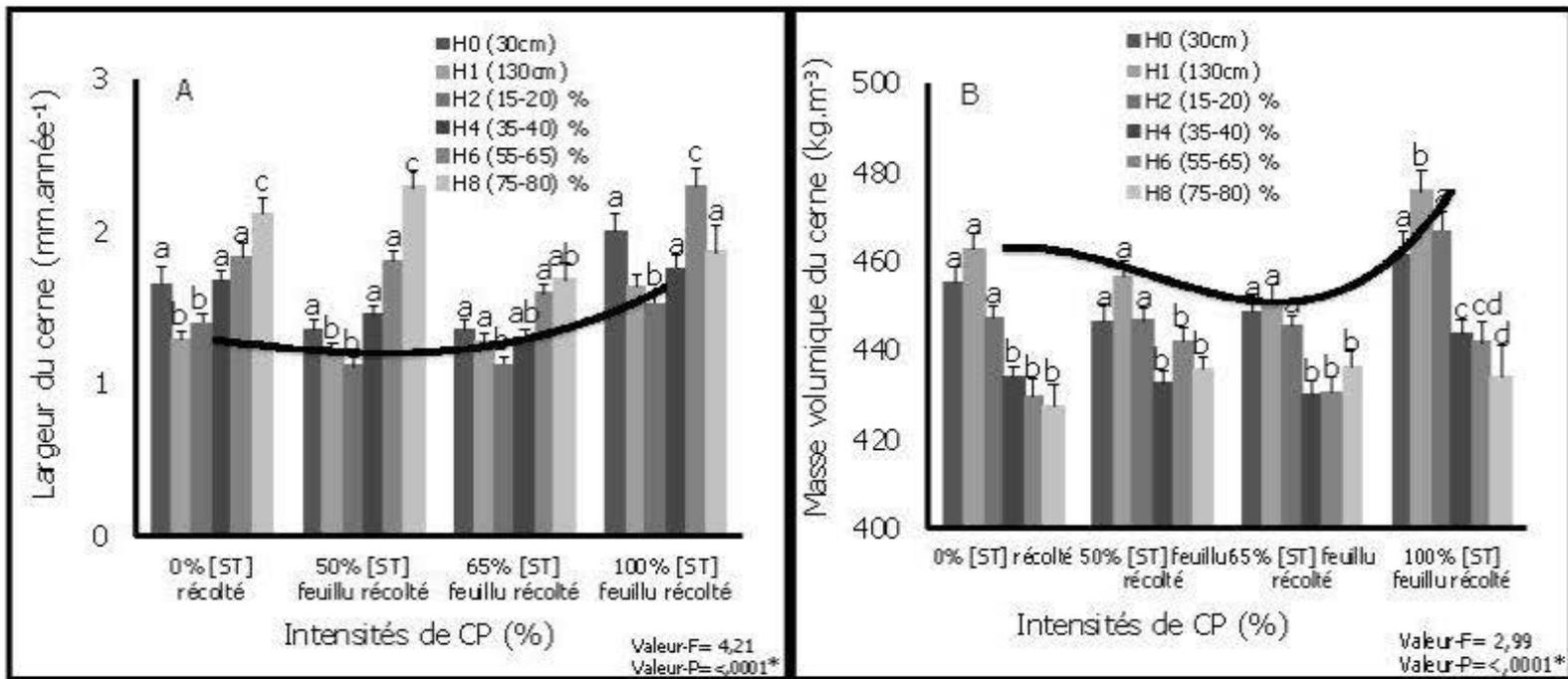


Figure 4.11 Effet des coupes partielles sur A. Croissance et B. Masse volumique du cerne de l'épinette blanche en fonction de la hauteur dans l'arbre.

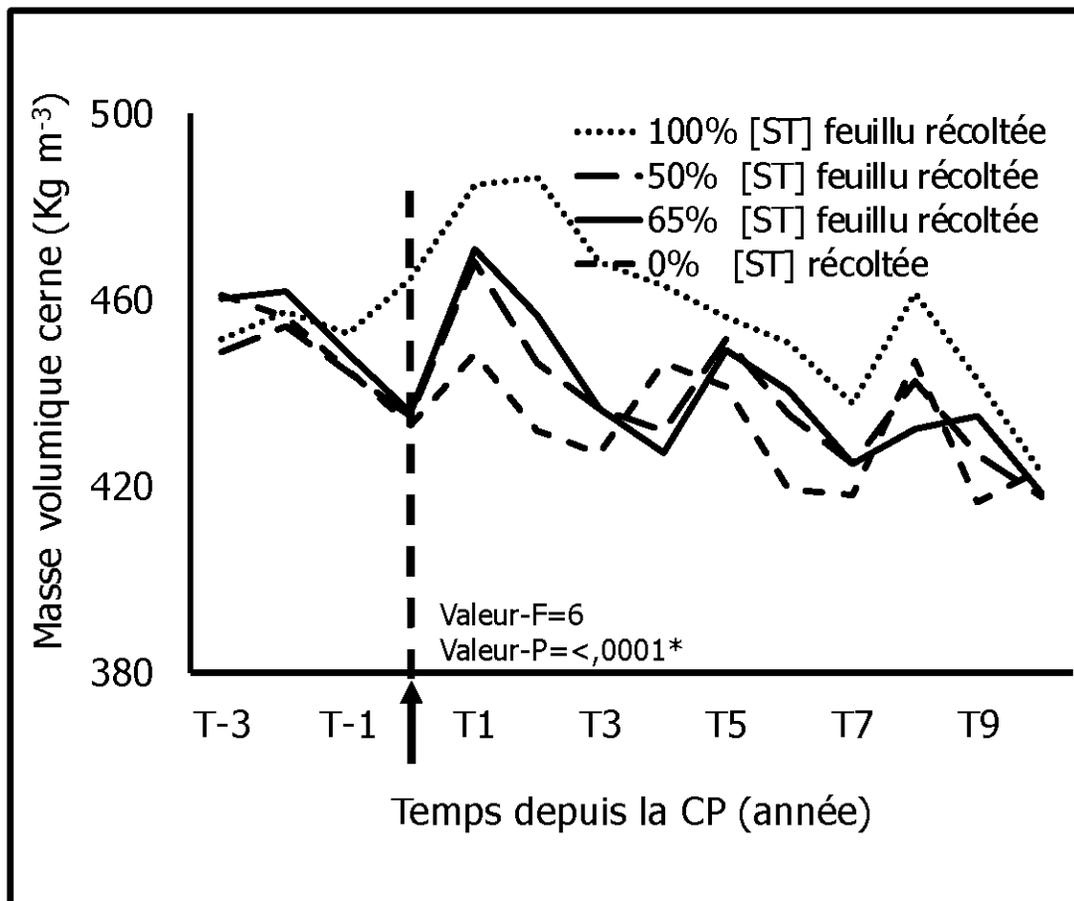


Figure 4.12 Effet des coupes partielles sur la masse volumique du cerne de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.

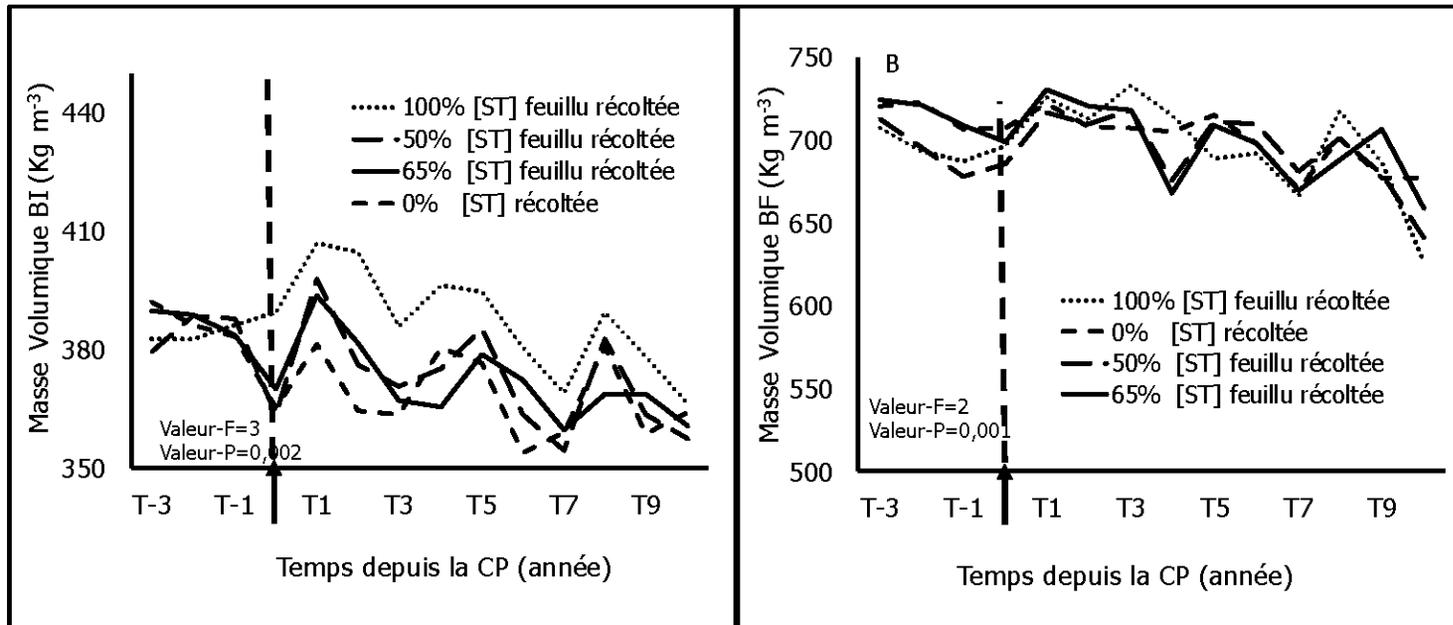


Figure 4.13 Effet des coupes partielles sur A. Masse volumique du bois initial et B. Masse volumique du bois final de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.

4.3.3 Morphologie des trachéides

La coupe partielle n'a pas eu d'effet significatif sur la longueur moyenne des trachéides du cerne ni sur le diamètre leurs diamètre moyens (Tableau 4.4). Toutefois, on a observé une diminution de la longueur et du diamètre des trachéides du cerne, du bois initial et du bois final après la coupe partielle extrême (Tableau 4.7). La diminution de la longueur moyenne ajustée des fibres de 2,9 à 2,8 mm est sans implication pratique. En effet, la longueur moyenne des trachéides après coupe partielle extrême reste dans la norme de longueurs exigées par les industriels (Figure 4.14A). Le diamètre moyen des trachéides, quant à lui, est resté constant avec une moyenne ajustée de 25 μm (Figure 4.14B). Ces résultats sont similaires à ceux de Kasraoui, (2011) sur le pin gris et de Ourais, (2012) sur l'épinette noire.

La classe sociale a eu un impact sur la longueur et le diamètre moyen des trachéides de l'épinette blanche (Tableau 4.4). Les moyennes ajustées de la longueur et du diamètre du cerne des trachéides des arbres dominants et codominants (2,97-3,12 mm, 25-27 μm , respectivement) sont supérieures à celles des arbres opprimés (2,63 mm-23 μm). Il en est de même pour la longueur moyenne des trachéides du bois initial et du bois final ; et du diamètre moyen des trachéides du bois final. Le diamètre moyen des trachéides du bois initial diffère entre les trois classes sociales dominants, codominants et opprimés avec des moyennes ajustées de 28, 26, 24 μm , respectivement.

Les résultats de l'analyse de variance ont révélé que la coupe partielle a eu un effet sur l'épaisseur de la paroi cellulaire (Tableau 4.3). Selon les résultats de comparaison multiples de *Tukey*, la coupe partielle extrême 100 % [ST] de feuillu récoltée n'a pas réduit l'épaisseur des parois cellulaires comme on s'attendait, mais a augmenté l'épaisseur des parois cellulaires. Une augmentation de l'épaisseur de la paroi cellulaire (de + 20 % par rapport aux parois des témoins) est enregistrée à moyen terme puis

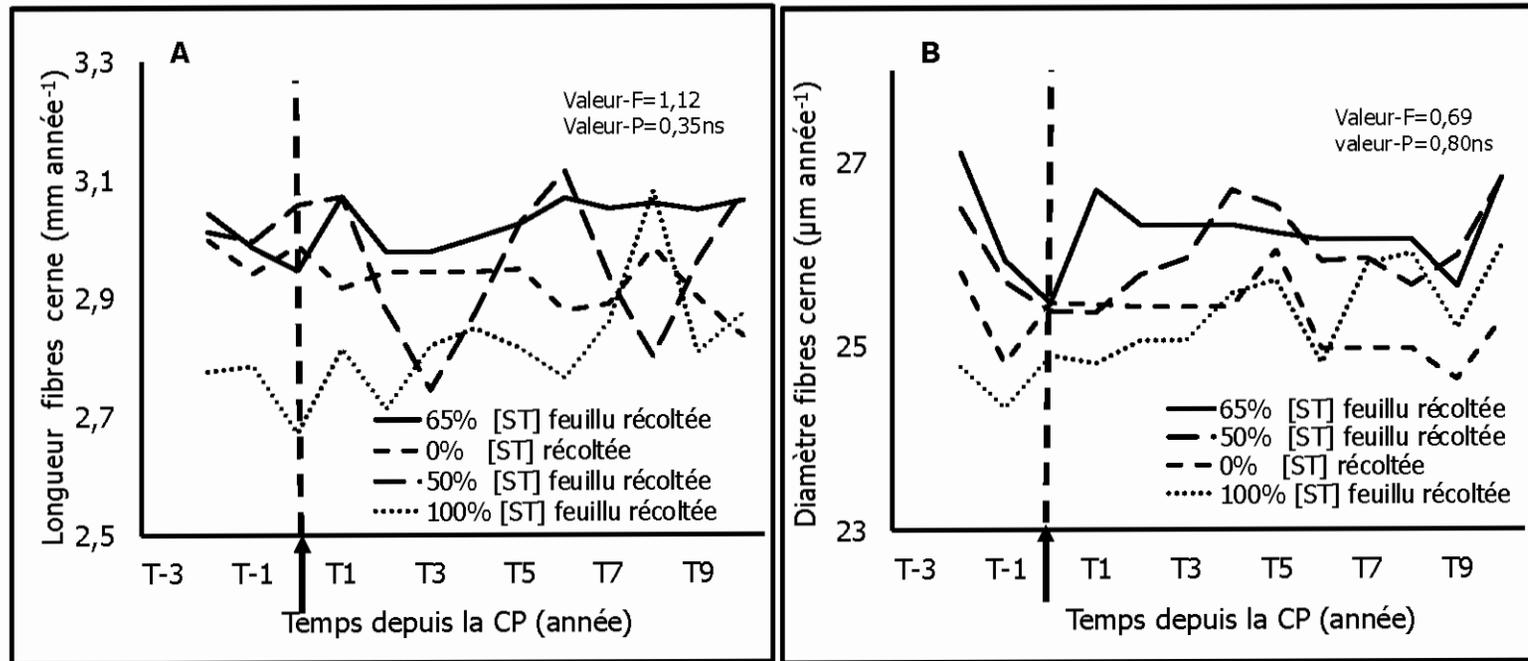


Figure 4.14 Effet des coupes partielles sur A. Longueur et B. Diamètre des trachéides du cerne de l'épinette blanche en fonction du temps depuis la coupe partielle.

l'effet s'est estompé à long terme (Tableau 4.9). L'augmentation de l'épaisseur de la paroi cellulaire est probablement due à l'augmentation de la proportion du bois final (Figure 4,9B, 4,10). L'augmentation de l'épaisseur de la paroi cellulaire vient, à son tour et dans une certaine probabilité, justifier l'augmentation de la masse volumique par la tendance observée dans la figure 4.15 et le tableau 4.6. Toutefois, des tests de corrélation n'ont pas pu être appliqués en raison de la taille limitée de l'échantillonnage.

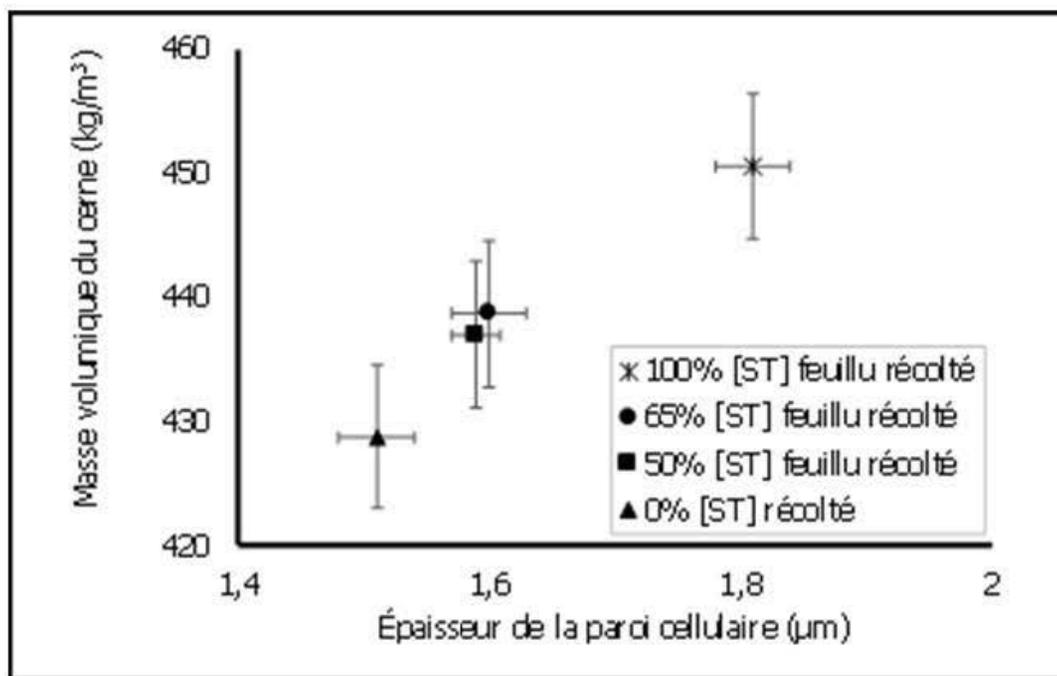


Figure 4.15 Masse volumique moyenne du cerne en relation avec l'épaisseur moyenne de la paroi cellulaire de l'épinette blanche en fonction des coupes partielles.

Tableau 4.3 Valeurs moyennes ajustées plus ou moins l'écart type de l'épaisseur des parois cellulaires (ÉPC), de largeur de bois final et de la masse volumique du cerne en fonction des différentes intensités de coupes partielles (Numéro avec la même lettre majuscule, en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05).

Intensité de CP		ÉPC (μm)	Bois final (mm)	Masse volumique cerne (kg m^{-3})
0 % [ST] récoltée	A	1,51 \pm 0,03	0,32 \pm 0,03	430,9 \pm 5,7
50 % [ST] feuillu récoltée	A	1,59 \pm 0,02	0,32 \pm 0,03	436,9 \pm 5,9
65 % [ST] feuillu récoltée	A	1,60 \pm 0,03	0,33 \pm 0,03	438,6 \pm 5,9
100 % [ST] feuillu récoltée	B	1,81 \pm 0,03	0,51 \pm 0,03	448,8 \pm 5,9

Tableau 4.4 Résultats de l'analyse de variance des effets fixes valeurs de F et de p (entre parenthèses) sur les largeurs et les masses volumiques du cerne ; du bois initial et du bois final; et sur la longueur et le diamètre des trachéides du cerne et de ses composantes.

	Croissance (n= 432)			Masse volumique n= 432			Dimensions de trachéides					
	Cerne	Bois Initial	Bois final	Cerne	Bois initial	Bois final	Longueur (1728) et 768 (cime)			Diamètre n=1728 et 768 (cime)		
							Cerne	Bois initial	Bois final	Cerne	Bois initial	Bois final
Constante	1327 (<,0001)	1223 (<,0001)	379 (<,0001)	21 435 (<,0001)	34 856 (<,0001)	13 383 (<,0001)	7367 (<,0001)	7138 (<,0001)	4832 (<,0001)	14 741 (<,0001)	14 157 (<,0001)	10 055 (<,0001)
CP	3,50 (0,02*)	2,60 (0,02*)	5,80 (0,002*)	2,30 (0,01*)	3,20 (0,03*)	0,07 (0,7 ns)	2,31 (0,09 ns)	1,83 (0,15 ns)	2,91 (0,05)	1,63 (0,19 ns)	1,70 (0,18 ns)	1,44 (0,24 ns)
Classes sociales	5,30 (0,005*)	5,80 (0,003*)	4,19 (0,004*)	0,44 (0,60 ns)	0,17 (0,85 ns)	16,60 (<,0001*)	20,03 (<,0001*)	18,87 (<,0001*)	18,22 (<,0001*)	18,30 (<,0001*)	17,70 (,0001*)	11,99 (<,0001*)
Hauteurs (cime)	34,07 (<,0001*)	16,60 (<,0001*)	68,94 (<,0001*)	51,00 (<,0001*)	13,81 (<,0001)	96,13 (<,0001*)	4,59 (0,03*)	4,33 (0,04*)	1,76 (0,19 ns)	3,11 (0,08*)	0,51 (0,48 ns)	2,08 (0,15 ns)
Temps	27,01 (<,0001*)	20,70 (<,0001*)	30,93 (<,0001*)	41,60 (<,0001*)	38,14 (,0001*)	19,53 (,0001*)	0,64 (0,6 ns)	0,34 (0,8 ns)	2,15 (0,1 ns)	0,42 (0,74 ns)	1,14 (0,33 ns)	0,00 (1,00 ns)
CP : Cs	0,46 (0,84 ns)	0,50 (0,80 ns)	0,70 (0,64 ns)	1,00 (0,39 ns)	2,19 (0,04*)	1,00 (0,43 ns)	1,68 (0,15 ns)	1,25 (0,29 ns)	1,99 (0,08 ns)	0,36 (0,90 ns)	0,27 (0,95 ns)	0,43 (0,86 ns)
CP : H	4,21 (<,0001*)	3,10 (0,008*)	6,10 (<,0001*)	3,00 (<,0001*)	1,45 (0,11 ns)	4,10 (<,0001*)	/	/	/	/	/	/
CP : T	29,68 (<,0001*)	25,00 (<,0001*)	12,30 (<,0001*)	5,78 (<,0001*)	2,85 (0,002*)	2,41 (0,01*)	1,12 (0,35 ns)	1,96 (0,04*)	0,98 (0,46 ns)	0,69 (0,8 ns)	0,92 (0,51 ns)	0,37 (0,95 ns)

* : significatif à $\alpha = 0,05$, ns : non significatif ; CP: Coupe partielle, CS : Classe sociale de l'arbre, H : hauteur, T : Temps depuis la coupe.

Tableau 4.5 Largeurs moyennes (mm) du cerne et de ses composantes, des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O) des épinettes blanches, avant (Av) et après (Ap) traitement ; et largeurs moyennes du cerne et de ses composantes après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée (Numéro avec la même lettre majuscule, en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05. Numéro avec lettre minuscule, en ligne, sont statistiquement non différent à 0,05).

Temps	Largeur (mm)					
	Tous traitements confondus				100 % Vs 0 %	
	Av1	Ap1	Ap2	Ap3	100 % Vs 0 %	$\Delta L/L$ (%)
Cerne						
D (A)	2,25 a	2,15 b	1,56c	1,77 cd	2,18 Vs 1,87	+14,20 %
Co (AB)	1,54 a	1,68 a	1,51 a	1,60 a	2,17 Vs 1,46	+32,70 %
O (B)	1,03 a	1,41 b	1,50 b	1,40 b	1,95 Vs 0,83	+57,40 %
Moy,					2,10 Vs 1,40	+33,30 %*
Bois initial						
D (A)	1,77 a	1,70 ab	1,20c	1,40 d	1,64 Vs 1, 50	+ 8,50 %
Co (AB)	1,18 a	1,30 ab	1,16 a	1,23 a	1,63 Vs 1, 10	+32,50 %
O (B)	0,75 a	1,05 b	1,16 bc	1,07 b	1,52 Vs 0, 60	+60,00 %
Moy,					1,59 Vs 1, 07	+32,70 %*
Bois final						
D (A)	0,50 a	0,50 a	0,35 b	0,40 b	0,54 Vs 0, 40	+25,90 %
Co (A)	0,35 a	0,40 a	0,35 a	0,37a	0,53 Vs 0, 30	+43,40 %
O (A)	0,30 a	0,40 b	0,33 b	0,32 b	0,42 Vs 0, 20	+52,40 %
Moy,					0,50 Vs 0,30	+40,0 %*

$\Delta L/L$ (%) : Largeur (L) relative (%) enregistrée après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée.

Tableau 4.6 Masse volumique moyenne (kg m^{-3}) du cerne et de ses composantes, des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O) des épinettes blanches, avant (Av) et après (Ap) traitement ; et masse volumique du cerne et de ses composantes après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée (Numéro avec la même lettre majuscule, lu en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05. Numéro avec lettre minuscule, lu en ligne, sont statistiquement non différent à 0,05).

	Masse volumique (kg m^{-3})					
	Tous traitements confondus				100 % Vs 0 %	$\Delta\text{MV}/\text{MV}$ (%)
	Av1	Ap1	Ap2	Ap3		
Cerne						
D (A)	445,4 a	450,5 ab	442,5 ac	434,5 b	460,5 Vs 431,5	+ 6,3 %
Co (A)	444,4 a	460,9 b	442,2 a	428,0c	445,0 Vs 441,5	+ 0,9 %
O (A)	442,4 a	445,1 a	436,3 a	419,0 b	440,9 Vs 419,6	+ 4,8 %
Moy,					448,8 Vs 430,9	+ 4,0 %*
Bois initial						
D (A)	380,3 a	379,4 a	375,9 ab	367,6 b	387,8 Vs 368,7	+ 5 %
Co (A)	381,6 a	385,7 ab	376,1c	367,6 cd	382,9 Vs 380,0	+ 0,7 %
O (A)	384,6 a	383,5 a	377,1 ab	362,0c	387,6 Vs 362,7	+ 6,4 %
Moy,					386,1 Vs 370,5	+ 4,0 % ns
Bois final						
D (A)	718,6 a	728,9 ab	693,9c	687,7 cd	709,5 Vs 699,6	+ 1,4 %
Co (A)	689,9 a	723,8 b	699,2 ab	675,4 ac	678,0 Vs 708,5	- 4,5 %
O (B)	624,4 a	645,0 ab	657,2 bc	623,6 a	652,6 Vs 634,9	+ 2,7 %
Moy,					680,0 Vs 681	- 0,1 %*

$\Delta\text{MV}/\text{MV}$ (%) : Masse volumique (MV) relative (%) enregistrée après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée.

Tableau 4.7 Longueur moyenne (mm) des fibres du cerne et de ses composantes, des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O), avant (Av) et après (Ap) traitement ; et longueur moyenne des fibres du cerne et de ses composantes après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée (Numéro avec la même lettre majuscule, lu en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05. Numéro avec lettre minuscule, lu en ligne, sont statistiquement non différent à 0,05).

Longueur des fibres (mm)						
Tous traitements confondus					100 % Vs 0 %	
	Av1	Ap1	Ap2	Ap3		$\Delta L_f/L_f$ (%)
Cerne						
D (A)	3,11 a	3,11 a	3,13 a	3,13 a	2,93 Vs 3,09	- 5,50 %
Co (A)	2,96 a	2,96 a	2,98 a	2,97 a	2,89 Vs 2,82	+ 2,40 %
O (B)	2,60 b	2,60 b	2,60 b	2,60 b	2,53 Vs 2,79	- 10,30 %
Moy,					2,80 Vs 2,90	- 5,50 %
Bois initial						
D (A)	3,13 a	3,16 a	3,20 a	3,07 a	2,98 Vs 3,09	- 4,70 %
Co (A)	2,96 a	2,97 ab	2,93 ab	2,89 ab	2,86 Vs 2,79	+ 7,00 %
O (B)	2,57 a	2,61 ab	2,64 ab	2,68 ab	2,53 Vs 2,76	- 9,10 %
Moy,					2,80 Vs 2,90	- 2,30 % ns
Bois final						
D (A)	3,11 a	3,05 ab	3,10 ab	3,16 ab	2,88 Vs 3,09	- 7,30 %
Co (A)	3,02 a	2,96 ab	3,04 a	2,97 ab	2,91 Vs 2,86	+ 1,70 %
O (B)	2,57 a	2,63 ab	2,64 ab	2,76 ab	2,53 Vs 2,84	- 12,20 %
Moy,					2,80 Vs 2,90	- 5,90

$\Delta L_f/L_f$ (%) : longueur (L_f) relative (%) enregistrée après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée.

Tableau 4.8 Diamètre moyen (μm) des fibres du cerne et de ses composantes, des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O) des épinettes blanches, avant (Av) et après (Ap) traitement ; et diamètre moyen des fibres du cerne et de ses composantes après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée (Numéro avec la même lettre majuscule, lu en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05. Numéro avec lettre minuscule, lu en ligne, sont statistiquement non différent à 0,05).

Diamètre des fibres (μm)						
Tous traitements confondus						
	Av1	Ap1	Ap2	Ap3	100 % Vs 0 %	$\Delta D/D$ (%)
Cerne						
D (A)	27a	27ab	27a	27a	26 Vs 27	-3,8 %
Co (A)	26a	26a	26a	26a	26 Vs 25	+3,8 %
O (B)	23a	24 b	24ab	24ab	24 Vs 24	0
Moy,					25 Vs 25	0 ns
Bois initial						
D (A)	27a	26a	26a	26ab	25 Vs 27	- 8 %
Co(B)	25a	25a	25a	25a	25 Vs 24	+ 4 %
O (C)	22a	23ab	24ab	24ab	23 Vs 23	0
Moy,					24 Vs 25	- 4,1 % ns
Bois final						
D (A)	28a	27ab	27ab	28ab	26 Vs 28	-7,7 %
Co (A)	27a	27a	26ab	26ab	26 Vs 25	+3,8 %
O (B)	24a	24ab	25ab	25ab	25 Vs 24	+3,8 %
Moy,					26 Vs 26	+ 0,1 % ns

$\Delta D/D$: Diamètre (D) relatif (%) enregistré après la récolte de 100 % de la [ST] des feuillus par rapport au témoin 0 % de [ST] récoltée.

Tableau 4.9 Épaisseur moyenne et écart-type de la paroi cellulaire (ÉPC) (μm) des arbres dominants (D), codominants (Co) et opprimés (O) des épinettes blanches, avant (Av) et après (Ap) les différentes intensités de coupe partielle (Numéro avec la même lettre majuscule, lu en colonne, sont statistiquement non différents à 0,05)

Variables	ÉPC	Min.ÉPC	Max.ÉPC
Intensités de la coupe partielle			
0 % de récolte A	1,5 \pm 0,03	1,44	1,57
50 % de feuillu récolté A	1,6 \pm 0,21	1,55	1,63
65 % de feuillu récolté A	1,6 \pm 0,32	1,54	1,66
100 % de feuillu récolté B	1,8 \pm 0,03	1,76	1,87
Classes sociales			
Dominants A	1,6 \pm 0,03	1,52	1,92
Codominants B	1,9 \pm 0,03	1,82	1,62
Opprimés C	1,4 \pm 0,03	1,4	1,49
Temps depuis la coupe partielle			
AV2 A	2,1 \pm 0,02	2,08	2,16
AV1 B	1,4 \pm 0,02	1,40	1,48
AP1 A	2,1 \pm 0,02	2,07	2,14
AP2 C	1,9 \pm 0,02	1,86	1,96
AP3 D	0,5 \pm 0,06	0,43	0,67

Min.ÉPC : Épaisseur moyenne minimale de la paroi cellulaire ; Max.ÉPC : Épaisseur moyenne maximale de la paroi cellulaire.

CHAPITRE V

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

5.1 Récapitulatif

Les objectifs de cette étude étaient de caractériser la variabilité intra-arbres et intra-cernes des composantes de la largeur des cernes, de la masse volumique et de la longueur et du diamètre des trachéides chez l'épinette blanche et d'évaluer l'effet des coupes partielles à différentes intensités sur ces propriétés. Ainsi, un échantillonnage de 72 arbres d'épinette blanche, issus d'un peuplement mixte, nous a permis d'atteindre cet objectif.

L'analyse des patrons de variations des paramètres indicateurs de la qualité du bois chez l'épinette blanche nous conduit aux conclusions suivantes :

Les variations radiales de la croissance radiale, de la masse volumique et des dimensions des trachéides sont plus importantes que les variations longitudinales. En effet, les largeurs et les masses volumiques des cernes, du bois initial et du bois final ainsi que la longueur et la largeur des trachéides varient beaucoup plus avec l'âge cambial, 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.

L'épinette blanche issue de ce type de peuplement se caractérise avec une largeur moyenne des cernes inférieure à celle observée chez l'épinette blanche des peuplements naturels ou des plantations.

Dans la deuxième partie des hypothèses de cette étude, seulement une partie a pu être validée qui stipule que la coupe partielle extrême améliore la croissance radiale des arbres. En effet, la coupe partielle extrême a eu un effet positif sur la croissance radiale de toutes les classes sociales confondues. De plus, la coupe partielle extrême a augmenté la croissance du bois initial caractérisé par une masse volumique plus faible, mais aussi la croissance du bois final, caractérisé par une masse volumique plus élevée. De plus, la masse volumique a augmenté après l'application de la coupe partielle extrême au cours des premières années et s'est stabilisée à moyen et à long terme. 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 la coupe. Les coupes partielles, toutes les intensités confondues, appliquées ne nuisent pas à la qualité de la fibre et du bois de l'épinette blanche. Les coupes partielles n'ont pas causé des changements radicaux sur la longueur et la largeur des trachéides. La coupe partielle extrême a même augmenté l'épaisseur de la paroi cellulaire.

5.2 Implication pratique et industrielle

D'un point de vue industriel, les résultats obtenus par cette étude prouvent un maintien voir même une légère amélioration de la qualité du bois suite à la coupe partielle extrême. 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 la coupe partielle extrême a maintenu et a amélioré la qualité du bois d'épinette blanche dans un peuplement mixte. 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 (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 blanche. De plus, 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 vus que les arbres opprimés ont eu un meilleur gain en croissance que les arbres dominants et codominants.

5.3 Limites et perspectives

La taille de l'échantillonnage représentait la principale limite de cette étude. Un échantillonnage plus important prenant en compte différents sites expérimentaux et un nombre plus grand d'arbres par traitement serait recommandé afin de pouvoir confirmer les résultats de notre étude. Les arbres de l'épinette blanche destinés à cette étude provenaient, tous, du même site, situé à la forêt expérimentale de Tembec à Beauchastel, en Abitibi-Témiscamingue, Québec. De ce fait, l'influence de l'environnement ne pouvait pas être prise en compte dans la détermination de la qualité du bois. Cela a probablement limité la capacité d'inférence, surtout pour ce qui est de la possibilité de l'impact du climat sur la qualité du bois. L'évaluation de l'effet de l'humidité sur la masse volumique et les propriétés anatomiques permettrait de bien comprendre la relation entre coupes partielles- propriétés du bois-caractéristique du site et de déterminer les facteurs clés de cette relation et de nos résultats.

Il serait également très intéressant de décrire le patron de variation radiale et longitudinale de la paroi cellulaire et de mener d'autres études sur le patron de variation longitudinale du diamètre des fibres pour appuyer notre étude.

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

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- 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.) BSP). Thèse de doctorat. Université Laval, Québec :108p.
- Anfodillo, T., Deslauriers, A., Menardi, R., Tedoldi, L., Petit, G. et Rossi, S. (2012). Widening of xylem conduits in a conifer tree depends on the longer time of cell expansion downwards along the stem. *Journal of Experimental Botany*, 63(2):837-845.
- Antal, M. et Micko, M. (1994). Variation and field estimation of wood quality parameters for black spruce. *Holzforsch. Holzverw*, 46(4):70-72.
- Babos, K. (1973). Comparative anatomical investigation on pinewood from different sites (II). *Holztechnologie*, 14(4):203-207.
- Bannan, M., et Bindra, M. (1970). Variations in cell length and frequency of anticlinal division in the vascular cambium throughout a white spruce tree. *Canadian Journal of Botany*, 48(7):1363-1371.
- Bannan, M.W. (1960). Cambial behavior with reference to cell length and ring width in *Thuja occidentalis* L. *Canadian Journal of Botany*, 38(2):177-183.
- Bannan, M.W. (1963). Cambial behavior with reference to cell length and ring width in picea. *Canadian Journal of Botany*, 41(6):811-822.
- Bannan, M.W. (1967). Anticlinal divisions and cell length in conifer cambium. *Forest Products Journal*, 17(6):63-69.

- Balandier, P., Collet, C., Reynolds, P.E. et Zedaker, S.M. (2006). Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighbouring vegetation. *Forestry*, 79(1):3-27.
- Braido Dos Santos, D.V. (2014). Variations intra-arbres de la croissance radiale, de la masse volumique du bois et de la morphologie des trachéides de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) avant et après traitements sylvicoles. Mémoire de Maîtrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec: 90p.
- Bassett, J.R. (1969). Growth of widely spaced loblolly pine. *Journal of Forestry*, 67(9):634-636.
- Beaulieu, J. et Corriveau, A. (1985). Variabilité de la densité du bois et de la production des provenances d'épinette blanche, 20 ans après plantation. *Canadian Journal of Forest Research*, 15(5):833-838.
- Bergeron, Y. et Harvey, B.D. (1997). Basing silviculture on natural ecosystem dynamics: an approach applied to the southern boreal mixedwood forest of Quebec. *Forest Ecology and Management*, 92(1):235-242.
- Bergeron, Y. (2000). Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest. *Ecology*, 81(6):1500-1516.
- Bergeron, Y., Gauthier, S., Kafka, V., Lefort, P. et Lesieur, D. (2001). Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(3):384-391.
- Bergeron, Y., Leduc, A., Harvey, B.D. et Gauthier, S. (2002). Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest. *Silva Fennica*, 36(1):81-95.

- Bose, A.K., Brais, S. et Harvey B.D. (2014). Trembling aspen (*Populus tremuloides Michx.*) volume growth in the boreal mixedwood: Effect of partial harvesting, tree social status, and neighborhood competition. *Forest Ecology and Management*, 327(9):209-220.
- 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.
- Bouslimi, B., Koubaa, A. et Bergeron, Y. (2014). Anatomical properties in *Thuja occidentalis*: Variation and relationship to biological processes. *IAWA Journal*, 35(4):363-384.
- Bowyer, J.L., Haygreen, J.G. et Shmulsky, R. (2005). "Le bois et ses usages", Centre collégial de développement de matériel didactique (CCDMD), Cégep de Sainte-Foy. Traduction de la 4e édition du livre *Forest Products and Wood Science*.
- Brais, S., Harvey, B.D., Bergeron, Y., Messier, C., Belleau, A. et Paré, D. (2004). Testing forest ecosystem management in boreal mixedwoods of northwestern Quebec: initial response of aspen stands to different levels of harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(2):431-446.
- Brazier, J. (1970). Timber improvement II. The effect of vigour on young-growth Sitka spruce. *Forestry*, 43(2):135-150.
- Briand, C.H., Posluszny, U., Larson, D.W. (1993). Influence of age and growth rate on radial anatomy of annual rings of *Thuja occidentalis L.* (Eastern white cedar). *International Journal of Plant Sciences*, 154(3):406-411.

- Briggs, D. et Smith, W. (1986). Effects of silvicultural practices on wood properties of conifers: A review. Douglas fir: Stand Management for The Future. Institute of Forest Resources Contribution: 108-117p.
- Brix, H. (1981). Effects of thinning and nitrogen fertilization on branch and foliage production in Douglas fir. Canadian Journal of Forest Research, 11(3):502-511.
- Chhin, S., Hogg, E.H. (Ted), Lieffers, V.J. et Huang, S. (2010). Growth–climate relationships vary with height along the stem in lodgepole pine. Tree Physiology, 30(3):335-345.
- Cloutier, A. (2005). Laboratoire d’anatomie du bois avancée SB0-66409. Documents de laboratoire, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Hiver 2005.
- Cloutier, A. (2007). Laboratoire d’anatomie du bois avancée SB0-66409. Documents de laboratoire, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Automne 2007.
- Comeau, P.G. et Heineman, J.L. (2003). Predicting understory light microclimate from stand parameters in young paper birch (*Betula papyrifera Marsh.*) stands. Forest Ecology and Management, 180(1):303-315.
- Comeau, P.G., Kabzems, R., McClarnon, J. et Heineman, J.L. (2005). Implications of selected approaches for regenerating and managing western boreal mixedwoods. The Forestry Chronicle, 81(4):559-574.
- Corriveau, A., Beaulieu, J., Mothe, F. (1987). Wood density of natural white spruce populations in Quebec. Canadian Journal of Forest Research, 17(7): 675-682.
- Corriveau, A., Beaulieu, J., Mothe, F., Poliquin, J. et Doucet J. (1990). Densité et largeur des cernes des populations d’Épinettes blanches de la région forestière

- des Grands Lacs et du Saint-Laurent. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(2):121-129.
- Deslauriers, A., Rossi, S., Anfodillo, T. et Saracino, A. (2008). Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiology*, 28(6):863-871.
- De Kort, I., Loeffen, V. et Braas, P. (1991). Ring width, density and wood anatomy of Douglas fir with different crown vitality. *IAWA Bulletin*, 12(4):453-465.
- Dutilleul, P., Herman, M. et Avella-Shaw, T. (1998). Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). *Canadian Journal of Forest Research*, 28(1):56-68.
- Erickson, H. et Arima, T. (1974). Douglas-fir wood quality studies, 2: Effects of age and stimulated growth on fibril angle and chemical constituents (*Pseudotsuga menziesii*). *Wood Science and Technology*, 8(4):255-265.
- Enquist, B. J. (2003). Cope's rule and the evolution of long-distance transport in vascular plants: Allometric scaling, biomass partitioning and optimization. *Plant, Cell and Environment*, 26(1): 151-161.
- Fabris, S. (2000). Influence of cambial ageing, initial spacing, stem taper and growth rate on the wood quality of three coastal conifers. Thèse de doctorat. Faculty of graduate Studies. Department of Forestry, Vancouver. The University of British Columbia.
- Fahn, A. (1995): Seasonal cambial activity and phylogeographic origin of woody plants: A hypothesis. *Israel Journal of Plant Sciences*, 43(1):69-75.

- Forrester, D.I. (2014). The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process. *Forest Ecology and Management*, 312(1):282-292.
- Franklin, G. (1945). Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature*, 155(1):51-51.
- Fromm, J. (2013). Xylem development in trees: from cambial divisions to mature wood cells. *Cellular Aspects of Wood Formation*, Springer, 3-39
- Gagné, L., Lavoie, L. et 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(2):291-302.
- Gartner B.L., North E.M., Johnson G.R. et Singleton R. (2002). Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(03): 439-447.
- Gelman, A. et Hill, J. (2006). *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. Cambridge University Press: 607p
- Gillespie, A.R., Allen, H.L. et Vose, J.M. (1994). Amount and vertical distribution of foliage of young loblolly pine trees as affected by canopy position and silvicultural treatment. *Canadian Journal of Forest Research*, 24(7):1337-1344.
- Gough, C.M., Seiler, J.R. et Maier, C.A. (2004). Short-term effects of fertilization on loblolly pine (*Pinus taeda* L.) physiology. *Plant, Cell and Environment*, 27(7) :876-886.
- Guilley, E., Hervé, J.C. et Nepveu, G. (2004). The influence of site quality, silviculture and region on wood density mixed model in *Quercus petraea* Liebl. *Forest Ecology and Management*, 189(1-3):111-121.

- Grote, R. et Pretzsch, H. (2002). A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biology*, 4(2):167-180.
- Groot, A., Lussier, J.M., Mitchell, A.K. et MacIsaac, A.M. (2005). A silvicultural systems perspective on changing Canadian forestry practices. *The Forestry Chronicle*, 81(1):50-55.
- Grabner, M., Wimmer, R., Gierlinger, N., Evans, R. et Downes, G. (2005). Heartwood extractives in larch and effects on X-ray densitometry. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12):2781-2786.
- Harper, K.A., Bergeron, Y., Gauthier, S. et Drapeau, P. (2002). Post-fire development of canopy structure and composition in black spruce forests of Abitibi, Québec: a landscape scale study. *Silva Fennica*, 36(1):249-263.
- Harvey, B.D., Leduc, A., Gauthier, S. et Bergeron Y. (2002). Stand-landscape integration in natural disturbance-based management of the southern boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 155(1): 369-385.
- Harvey, B.D et Brais, S. (2002). Effects of careful logging on natural regeneration and vegetation competition in the southeastern Canadian Boreal Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(4):653-666.
- Harvey, B.D. et Brais, S. (2007). Partial cutting as an analogue to stem exclusion and stand break-up in aspen (*Populus tremuloides*) dominated boreal mixed woods : implications for deadwood dynamics. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(9):1525-1533
- Ivkovich, M., Namkoong, G. et Koshy, M. (2002). Genetic variation in wood properties of interior spruce. II. Tracheid characteristics. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(12):2128-2139.

- Jaakkola, T., Mäkinen, H. et Saranpää, P. (2005 a). Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(7):1767-1778.
- Jaakkola, T., Mäkinen, H., Sarén, M.P., et Saranpää, P. (2005 b). Does thinning intensity affect the tracheid dimensions of Norway spruce? *Canadian Journal of Forest Research*, 35(11):2685-2697.
- Jaakkola, T., Mäkinen, H. et Saranpää, P. (2006). Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation. *Forest Ecology and Management*, 237(1):513-521.
- Josza, L.A. et Middleton, G.R. (1994). Wood quality attributes and their practical implications. Forintek Canada Corp. Pub. Special No SP-34.
- Kang, K.Y., Zhang, S.Y. et Mansfield, S.D. (2004). The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). *Holzforschung*, 58(5):455-463.
- Karlsson, H. (2006). *Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry: A Handbook*: AB Lorentzen & Wettre, Kista, Sweden: 120p.
- Kasraoui, H. (2011). Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la masse volumique du bois et sur la morphologie des trachéides du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb). Mémoire de Maitrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Québec : 98p.
- Kimmins, J.P. (1995): Sustainable development in Canadian forestry in the face of changing paradigms. *Forestry Chronicle*, 71(1):33-40.

- Koga, S., Zhang, S. Y. et Bégin, J. (2002). Effects of precommercial thinning on annual radial growth and wood density in balsam fir (*Abies balsamea*). *Wood and Fiber Science*, 34(4):625-642.
- Kollmann, F. et Côté, W. 1968. Principles of wood science and technology. Volume I: Solid wood. Springer-Verlag, New York.
- Koubaa, A., Zhang, S.Y., Isabel, N., Beaulieu, J. et Bousquet, J. (2000). Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce. *Wood and Fiber Science*, 32(1):61-71.
- Koubaa, A., Zhang, S.Y. et Makni S. (2002). Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of Forest Science*, 59(5-6):511-518.
- Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S.Y., Beaulieu, J. et Bousquet, J. (2005). Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP). *Wood and Fiber Science*, 37(3):445-455.
- Krause, C., Rossi, S., Thibeault-Martel, M. et Plourde, P.Y. (2010). Relationships of climate and cell features in stems and roots of black spruce and balsam fir. *Annals of Forest Science*, 67(4):402.
- Kretschmann, D.E. (2010). Mechanical Properties of Wood. *Dans Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. ROSS, R.J. Madison, Wisconsin, USA: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory: 509p
- Kuuluvainen, T. (1991). The effect of two growth forms of Norway spruce on stand development and radiation interception: a model analysis *Trees*, 5(3): 171-179.
- Laplante, S. (2009). Effet de l'éclaircie précommerciale 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-St-Jean. Mémoire de maîtrise. Saguenay, Université du Québec à Chicoutimi : 50p.

Larson, P.R. (1962). A biological approach to wood quality. TAPPI, 45(6): 443-448.

Larson, P.R. (1964). Contribution of different-aged needles to growth and wood formation of young red pine. Forest Science, 10(2): 224-238.

Larson, P.R. (1994). The vascular cambium: Development and structure. Springer Series in Wood Science. T. E. Timell. Berlin, Germany, Springer Series in Wood Science: 725p

Larson, P.R. (1972). Evaluating the quality of fast-grown coniferous woods. Proceedings of the Western Stand Management Committee, Seattle, Washington.

Larson, P.R., Kretschmann, D.E., Clark III, A. et Isebrands, J.G. (2001). Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis. Madison, WI, USA., (General Technical Report, FPL-GTR-129) United States, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 42p

Law, K. et Valade, J. (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: 3-7p.

Lei H., Gartner B.L. et Milota, M.R. (1997). Effect of growth rate on the anatomy, specific gravity, and bending properties of wood from 7-year-old red alder (*Alnus rubra*). Canadian Journal of forest Research, 27(9):80-85.

MacDonald, G.B. (1995). The case for boreal mixedwood management: An Ontario perspective. The Forestry Chronicle, 71(6):725-734.

- Mäkinen, H. et Colin, F. (1999). Predicting the number, death, and self-pruning of branches in Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(8):1225-1236.
- Mäkinen, H. et Hein, S. (2006). Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. *European Journal of Forest Research*, 125(3):239-248.
- Mäkinen, H., Saranpää, P. et Linder, S. (2002 a). Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holzforschung*, 56(5): 449-460.
- Mäkinen, H., Saranpää, P. et Linder, S. (2002 b). Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(2): 185-194.
- Man, R. et Lieffers, V.J. (1999). Are mixtures of aspen and white spruce more productive than single species stands? *The Forestry Chronicle*, 75(3): 505-513.
- Mvolo, C.S., Koubaa, A., Beaulieu, J., Cloutier, A. et Mazerolle, M.J. (2015 a). Variation in Wood Quality in White Spruce (*Picea Glauca* (Moench) Voss). Part I. Defining the Juvenile–Mature Wood Transition Based on Tracheid Length. *Forests*, 6(1): 183-202.
- Mellerowicz E.J., Bourquin K., Gray-Mitsumine H., Kallas M., Lehtiö A., Raza J., Regan S., Rudsander S., Sandberg U.B. et Teeri, T.T. (2000). Cell wall enzyme discovery using high throughput and expression analysis in polar wood forming tissue. *Proceeding of the symposium on Friendly and Emerging Technologies for a Sustainable Pulp and Paper Industry*, Taiwan Research Institute, Taipei, Taiwan: 25-27p.

- Mvolo, C.S., Koubaa, A., Defo, M., Beaulieu, J., Yemele, M.C. et Cloutier, A. (2015 b). Prediction of tracheid length and diameter in white spruce (*Picea glauca*). IAWA Journal, 36(2):186-207.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs MFFP (2015). Ressources et industries forestières : Portrait statistique. Québec, Canada, Direction du développement de l'industrie des produits du bois: 106p.
- Inventaire forestier national (2015) : Contexte de l'inventaire forestier. Consulté le 18 mars 2015 http://nfdp.ccfm.org/inventory/background_e.php#4.
- Nicholls, J. (1984). Tracheid cell dimensions and density relationship for normal and abnormal wood of *Pinus radiata* D. Don. Australian Forest Research, 14(2):85-98.
- Niemistö, P. (1995). Influence of initial spacing and row-to-row distance on the crown and branch properties and taper of silver birch (*Betula pendula*). Scandinavian Journal of Forest Research, 10(1-4):235-244.
- Olson, M.E., Anfodillo T., Rosell J.A., Petit G., Isnard A.C. S., León-Gómez C., Alvarado-Cárdenas L.O. et Castorena. M. (2014). Universal hydraulics of the flowering plants: Vessel diameter scales with stem length across angiosperm lineages, habits and climates. Ecology Letters, 17(8):988-997.
- Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (1996). Manuel de foresterie. Les Presses de l'Université Laval et l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec.
- Ouais, 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.) BSP) avant et après traitements sylvicoles.

- Mémoire de Maitrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Québec. 96p.
- Panshin, A.J. et Zeeuw, C. (1980). Textbook of Wood Technology. McGraw-Hill Book Co., New York. 772p.
- Pamerleau-Couture, É. (2011). Impact de trois interventions sylvicoles sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire en forêt boréale. Mémoire de Maitrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Québec. 110p
- Paquette, A. et Messier, C. (2011). The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1):170-180.
- Pape, R. (1999). Effects of thinning regime on the wood properties and stem quality of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(1):38-50.
- Peterson, M.G., Dietterich, H.R. et Lachenbruch, B. (2007). Do Douglas-fir branches and roots have juvenile wood? *Wood and Fiber Science*, 39(4):651-660
- Peltola, H., Kilpelainen A., Sauvala K., Raisanen T. et Ikonen V.P. (2007). Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of scots pine. *Silva Fennica*, 41(3):489-505.
- Pinheiro, J. et Bates, D. (2006). *Mixed-effects models in S and S-PLUS*: Springer Science & Business Media.
- Pitt, D.G., Comeau, P.G., Parker, Parker, W.C., Maelsaac, D., McPherson, S., Hoeping, M.K., Stinson, A.L. et Mihajlovich, M. (2010). Early vegetation control for the regeneration of a single-cohort, intimate mixture of white spruce and trembling aspen on upland boreal sites. *Canadian Journal of forest Research*, 40(3):549-564.

- Pothier, D., Raulier, F. and Riopel, M. 2004. Ageing and decline of trembling aspen stands in Quebec. *Canadian Journal of forest Research*, 34(6): 1251-1258.
- Plomion, C., G. Leprévost et A. Stokes (2001): Wood formation in trees. *Plant Physiology*, 127(4):1513-1523.
- Raven, P.H., Evert, R.F. et Eichhorn, S.E. (2000). *Biologie végétale : De Boeck Supérieur*. De Boeck Université, Evrard: 944 p
- Robertson, G., Olson, J., Allen, P., Chan, B et Seth, R. (1999). Measurement of fiber length, coarseness, and shape with the fiber quality analyzer. *TAPPI Journal*, 82(10):93-98.
- Rowell, R.M., Roger, P., Han, J.S., Rowell, J.S., et Tshabalala, M.A. (2005). Cell wall chemistry. In: *Handbook of wood chemistry and wood composites*, R.M. Rowell. edition. CRC press, Boca Raton, Florida. 35-74p.
- Rosner, S. (2013). Hydraulic and biomechanical optimization in Norway spruce trunkwood - A review. *IAWA Journal*, 34(4):365-390.
- Salmén, L., et Olsson, A.M. (1998). Interaction between hemicelluloses, lignin and cellulose: structure-property relationships. *Journal of Pulp and Paper Science*, 24(3):99-103.
- Saucier, J.P., Grondin, P., Robitaille, A., Gosselin, J., Morneau, C., Richard, P.J.H., Brisson, J., Sirois, L., Leduc, A., Morin, H., Thiffault, E., Gauthier, S., Lavoie, C., et Payette, S. (2009). *Ecologie forestière. Dans Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Manuel de foresterie. 2e édition. Ouvrage collectif, Edition Multi-Mondes, Québec.*

- Seymour, R. et Hunter Jr, M.L. (1999). Principles of ecological forestry. In: Hunter M.L Jr edition Maintaining biodiversity in forested ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge: 22–61p.
- Schneider, R., Zhang, S.Y. Swift, D.E., Bégin J. et Lussier. J.M. (2008). Predicting selected wood properties of jack pine following commercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(7):2030-2043.
- Smith, J., Harvey B.D., Koubaa, A., Brais, S. et Mazerolle, M.J. (2016). Sprucing up the mixedwoods: growth response of white spruce (*Picea glauca*) to partial cutting in the eastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(10):1205-1215.
- Taylor, F. W. et Burton, J.D. (1982). Growth ring characteristics, specific gravity, and fiber length of rapidly grown loblolly pine. *Wood and Fiber Science*, 14(3):204-210.
- Taylor, F.W., Wang, E.I., Yanchuk, A. et Micko, M.M. (1982). Specific gravity and tracheid length variation of white spruce in Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 12(3):561-566.
- Tasissa, G. et Burkhart, H.E. (1998). Modeling thinning effects on ring specific gravity of loblolly pine (*Pinus taeda L.*). *Forest Science*, 44(2):212-223.
- Team, R.C. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2013: ISBN 3-900051-07-0.
- Thorpe, J.P. (1992). Patterns of diversity in the boreal forest. *Dans The Ecology and Silviculture of Mixed-species Forests*. Springer. 65-79p

- Tsoumis, G. et Panagiotidis, N. (1980). Effect of growth conditions on wood quality characteristics of black pine (*Pinus nigra* Arn.). *Wood Science and Technology*, 14(4):301-310.
- Wang, E.I. et Micko, M.M. (1984). Wood quality of white spruce from north central Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 14(2):181-185.
- Wang, L., Payette, S. et Bégin, Y. (2002). Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(3):477-486.
- Wellwood, R. (1952). The effect of several variables on the specific gravity of secondgrowth Douglas fir. *The Forestry Chronicle*, 28(3):34-44.
- Yang, J. et Lu, H.J. (1997). Wood density, mechanical properties and their conversion. *China Wood Industry*, 11(1):35-38.
- Yang, K. (2002). Impact of spacing on juvenile wood and mature wood properties of white spruce (*Picea glauca*). *Taiwan Journal of Forest Science*, 17(1):13-29.
- Zhang, S.Y. (1998). Effect of age on the variation, correlations and inheritance of selected wood characteristics in black spruce (*Picea mariana*). *Wood Science and Technology*, 32(3):197-204.
- Zhang, S.Y. (1992). Structure-property relationship of wood in East-Liaoning oak. *Wood Science and Technology*, 26(2):139-149.
- 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, S.Y. et Koubaa, A. (2009). Les résineux de l'est du Canada : Écologie forestière, caractéristique, transformation et usages. Québec, Canada : FPInnovations. Publication spéciale SP-526F : 400 p.
- Zobel, B.J. et Van Buijtenen, J.P. (1989). Wood variation, its causes and control. Springer-Verlag, Berlin: 363 p.