

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIÈRES.....	ii
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	viii
RÉSUMÉ.....	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I	
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1. Généralités :.....	5
1.1.1. Épinette noire :.....	5
1.1.2. Aire de distribution et habitat.....	6
1.1.3. Caractéristiques de l'épinette noire:.....	7
1.1.4. Poids économique:.....	11
1.2. Traitements sylvicoles et qualité du bois.....	12
1.2.1. Éclaircie commerciale:.....	12
1.2.2. Fertilisation:.....	12
1.2.3. Qualité du bois:.....	13
1.3. Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la qualité du bois.....	17
1.3.1. Effets sur la croissance.....	17
1.3.2. Effets sur la densité du bois.....	19

1.3.3.	Effets sur l'anatomie de la fibre de bois.....	21
1.4.	Effet combiné de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance, la densité et l'anatomie des trachéides	23
CHAPITRE II		
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....		25
2.1	Matériel.....	25
2.1.1	Sites d'étude	25
2.1.2	Dispositif expérimental.....	26
2.1.3	Échantillonnage et préparation des échantillons :.....	28
2.1.4.	Préparations des échantillons pour la densitométrie à rayon X.	29
2.1.5.	Préparations des échantillons pour l'analyse de la qualité des fibre.....	30
2.2	Méthodes	31
2.2.1	Densitomètre	31
2.2.2.	Analyse de la qualité de la fibre	32
2.3	Analyses statistiques.....	33
2.3.1	Effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la masse volumique	34
2.3.2	Effets de l'éclaircie commerciale sur les propriétés morphologiques des trachéides.....	35
2.3.3	Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance et la masse volumique du bois	36
2.3.4	Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur les propriétés morphologiques des trachéides.....	36
CHAPITRE III		
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS		38

3.1.	Statistiques descriptives.....	38
3.2.	Variations radiales et longitudinales de la croissance et des propriétés physiques et anatomiques du bois	40
3.2.1	Variations radiale et longitudinale de la largeur des cernes	40
3.2.2	Variations radiale et longitudinale de la masse volumique	43
3.2.3	Variations radiales et longitudinales de la morphologie des trachéides	47
3.3.	Effets de l'éclaircie commerciale sur les propriétés du bois.....	50
3.3.1	Effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale.....	52
3.3.2	Effets de l'éclaircie commerciale sur la masse volumique.....	55
3.3.3	Effets de l'éclaircie commerciale sur la morphologie des trachéides :	57
3.4	Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur les propriétés du bois	60
3.4.1.	Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance radiale.....	60
3.4.2.	Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la masse volumique.....	63
3.4.3.	Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la morphologie des trachéides	65
	CONCLUSION.....	69
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	72

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Aire de distribution de l'épinette noire (Adapté de Ostrander 1974).....	7
Figure 1.2 Variation de la masse volumique du bois en fonction de l'âge cambial pour 9 essences résineuses de l'Ouest (Tirée de Jozsa et Middleton 1997).....	15
Figure 2.1 Localisation des sites expérimentaux	26
Figure 2.2 Schéma explicatif du plan expérimental.....	28
Figure 2.3 Schéma d'échantillonnage des disques sur les arbres de l'étude.....	29
Figure 2.4 Densitomètre à rayon X de Quintek Measurement Systems (QMS).....	32
Figure 2.5 Analyseur de la qualité de la fibre de la compagnie OPTEST.....	32
Figure 3.1 Variation des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge cambial au niveau du DHP.....	41
Figure 3.2 Variations longitudinales des composantes de la largeur des cernes : A. Largeurs moyennes des cernes; du bois initial et du bois final; B. Largeur moyenne du cerne avec la hauteur à différentes classes d'âges cambiaux; C. Largeur du bois initial avec la hauteur à différentes classes d'âges cambiaux; D. Largeur du bois final avec la hauteur à différentes classes d'âges cambiaux.....	42
Figure 3.3 Variation de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge cambial.....	45
Figure 3.4 Variations longitudinales de la masse volumique : A. Masse volumiques moyennes des cernes; du bois initial et du bois final; B. Masse volumique du cerne à différentes classes d'âges cambiaux; C. Masse volumique du bois initial à différentes classes d'âges cambiaux; D. Masse volumique du bois final à différentes classes d'âges cambiaux	46
Figure 3.5 Profil de variation radiale de la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides du bois de l'épinette noire.....	48

Figure 3.6 Profil de variation longitudinale de la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides du bois de l'épinette noire	49
Figure 3.7 Variations de la largeur : A) des cernes ; B) du bois initial et C) du bois final chez l'épinette noire avec les traitements d'éclaircie commerciale dans trois sites en Abitibi.....	53
Figure 3.8 Variations de : A) la masse volumique des cernes ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciales dans trois sites en Abitibi.	58
Figure 3.9 Variations de la longueur (A, B) et du diamètre (C, D) du bois initial et du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale dans trois sites en Abitibi.....	59
Figure 3.10 Variations de la largeur A) du cerne ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie de fertilisation dans trois sites en Abitibi	63
Figure 3.11 Variations de la masse volumique : A) du cerne ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale et de fertilisation dans trois sites	65
Figure 3.12 Variations de la longueur (A, B) et de la largeur des trachéides (C, D) du bois initial et du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale et de fertilisation dans trois sites	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Pourcentage des constituants organiques du bois de l'épinette noire (Zhang et Koubaa 2009).....	10
Tableau 1.2	Propriétés physico-mécaniques du bois de l'épinette noire (Jessome 1977)...	11
Tableau 2.1	Caractéristiques des sites de l'étude.....	27
Tableau 2.2	Nombre d'arbres échantillonnés par traitement.....	27
Tableau 3.1	Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses, en %) de la masse volumique et de la largeur des cernes du bois de l'épinette noire issu de trois peuplements en Abitibi.	39
Tableau 3.2	Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses en %) de la longueur et de la largeur des trachéides du bois de l'épinette noire issu de trois peuplements en Abitibi.	39
Tableau 3.3	Résultats des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de la hauteur, de l'éclaircie commerciale, du temps et de la surface terrière sur la largeur et la masse volumique des cernes et de leurs composants.....	51
Tableau 3.4	Résultats des analyses de variance des effets du site, de l'éclaircie commerciale, du temps et de la surface terrière sur la longueur et la largeur des trachéides du bois initial et du bois final de l'épinette noire.	52
Tableau 3.5	Synthèse des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de la hauteur, de l'éclaircie commerciale, de la fertilisation, du temps et de la densité initiale du peuplement sur la largeur et la masse volumique des cernes et de leurs composants.....	61
Tableau 3.6	Synthèse des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de l'éclaircie commerciale, de la fertilisation, du temps et de la densité du peuplement sur la longueur et la largeur du bois initial et du bois final des trachéides de l'épinette noire à hauteur de poitrine (1,30m).....	67

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine (1.30 m)
EWD	Densité du bois initial
EWL	Largeur du bois initial
LWD	Densité du bois final
LWP	Proportion du bois final
LWL	Largeur du bois final
RD	Densité du cerne
RW	Largeur du cerne
SCF	Service Canadien des Forêts
UQÀM	Université du Québec à Montréal
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
α	Niveau de confiance statistique

RÉSUMÉ

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) est une des espèces les plus répandues de la forêt boréale. En plus d'avoir une importance écologique, cette essence a un rôle économique considérable pour l'industrie forestière québécoise. Les traitements sylvicoles sont appliqués pour améliorer la croissance radiale des tiges, mais moins d'attention est accordée à l'impact de ces traitements sur la qualité du bois issu des peuplements naturels. L'objectif de cette étude est composé de deux parties. Dans la première, nous nous sommes intéressés à la variabilité des composantes intra-cernes de la masse volumique du cerne, la largeur des cernes et l'anatomie des trachéides avec l'âge cambial et le niveau dans l'arbre. Dans une seconde partie, nous avons étudié l'influence de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur ces propriétés.

Nous sommes appuyés sur un effectif de 59 arbres dominants d'épinette noire provenant de trois peuplements (Castagnier sud, Miniac sud et lebel sur Lebel sur Quévillon), des disques de 10 cm ont été prélevés à différentes niveaux de l'arbre. Les propriétés du bois à savoir, la largeur des cernes et la masse volumique du bois ont été mesurés par le densitomètre à rayon X (QMS) et la longueur et le diamètre des trachéides à l'aide d'un analyseur de la qualité des fibres (FQA). Les modèles mixtes ont été utilisés à l'aide de la procédure Proc mixed du programme SAS pour vérifier l'effet de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur les propriétés du bois

Les résultats de cette étude ont permis d'établir les patrons de variations radiale et longitudinale de largeur des cernes, la masse volumique du bois et la morphologie des trachéides de l'épinette noire. Ils montrent une très grande variation radiale de la largeur des cernes, la densité du bois et la morphologie des trachéides, particulièrement dans la phase juvénile du bois.

Les résultats montrent aussi, que l'éclaircie commerciale appliquée simple ou combinée à la fertilisation n'a aucun effet sur les propriétés du bois étudiées, tandis que la fertilisation a un effet significatif sur la masse volumique. On constate également que l'effet de la hauteur est hautement significatif par rapport aux effets des traitements appliqués simple et/ou combiné. Le temps de l'application des traitements semble avoir une influence sur la réponse des peuplements.

Mots clés : épinette noire, masse volumique, morphologie des trachéides, éclaircie commerciale, fertilisation, *Picea mariana*

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les ressources forestières tiennent une place particulière dans l'économie québécoise et constituent l'un des piliers du développement social. Elles demeurent le secteur le plus important dans la balance commerciale de la province. Cependant, avec l'installation de la première usine papetière, en plus de l'achèvement de la construction du chemin de fer transcanadien, les coupes des résineux se sont intensifiées (Lefort et al 2003).

De même, avec les pressions environnementales, la forte demande en matière ligneuse et la diversification des usages du bois ont contribué à la diminution du potentiel des superficies consacrées pour répondre aux besoins de l'industrie. Aussi la raréfaction de la fibre de bois près des usines a poussé les industriels à chercher le bois plus loin vers la limite nordique de la forêt commerciale. En plus, l'augmentation des coûts de récolte et de transport se répercutent sur le coût de la fibre.

Cet état de fait a conduit le gouvernement du Québec à mettre en place un chantier de réflexion sur l'avenir de la forêt québécoise. La commission d'étude sur la gestion des forêts publiques au Québec (CEGFPQ 2004), la Commission Coulombe, a permis d'entamer une réflexion collective et de poser des jalons vers l'aménagement forestier durable (AFD). L'application de l'AFD nécessite la réduction des aires de coupes que les aménagistes cherchent à compenser par la sylviculture intensive qui s'appuie sur de nombreux traitements sylvicoles (Colombo et al 2005).

L'emploi de cette stratégie dépend de la disponibilité des connaissances sur les espèces d'intérêt commercial. Les traitements sylvicoles susceptibles d'être appliqués selon cette démarche demandent une connaissance approfondie et objective de la physiologie de ces espèces, dans ce cas-ci l'épinette noire (Young, 2008). Ces connaissances de base permettent de situer chaque espèce dans la dynamique de la végétation dans une démarche

d'aménagement écosystémique et d'adapter le choix des interventions sylvicoles et des pratiques associées pour des objectifs d'amélioration de la qualité du bois recherchée par l'industrie.

L'éclaircie commerciale et la fertilisation sont des traitements sylvicoles conçus pour augmenter la croissance radiale des arbres et raccourcir le temps de production. L'éclaircie agit directement sur la cime vivante. Celle-ci est le siège de la photosynthèse où sont synthétisés les éléments nécessaires au développement et à la croissance des tiges (Larson 1969); alors que la fertilisation vise à accélérer la croissance des tiges par un apport supplémentaire en éléments nutritifs. Contrairement à l'éclaircie, la fertilisation a reçu moins d'attention comme traitement sylvicole et cela dans l'ensemble du territoire québécois.

La revue de la littérature mentionne que la stimulation de la croissance par l'éclaircie commerciale et la fertilisation peut provoquer une diminution de la qualité du bois chez différentes essences en agissant sur les caractéristiques anatomiques et la masse volumique du bois (Jaakkola et al 2006, Jyske 2008, Vincent et al 2009). Toutefois les résultats qui amènent à confirmer cette hypothèse chez l'épinette noire sont encore rares (Yang et Hazenberg 1994, Zhang et Chauret 2001).

Le concept de qualité du bois vient prendre place parmi les préoccupations de ceux qui s'intéressent aux espèces ligneuses. Une notion globale a été énoncée par Zhang (1997) : «*Toutes les caractéristiques et propriétés du bois qui affectent la valeur et la durabilité du produit fini, à partir des travaux de coupe de bois en forêt jusqu'à l'usine de transformation du bois*». Bien que l'on puisse apercevoir certains attributs de base pour définir la qualité du bois de l'épinette noire, la densité du bois est reconnue chez cette espèce comme un estimateur synthétique de la qualité de ce bois et de sa structure anatomique (Alteryac, 2005). Ces critères peuvent être inhérents à l'espèce, mais sont souvent influencés par l'environnement de croissance de l'arbre (Jozsa et Middleton 1997).

Ce travail s'inscrit dans une lignée de recherches accomplies sur l'épinette noire (Alteryac 2005, Vincent et al, 2009). Il consiste à :

- 1) décrire la variabilité intra-cernes des composantes de la largeur des cernes, de la masse volumique et de l'anatomie des trachéides;
- 2) évaluer l'effet des pratiques sylvicoles (Éclaircie commerciale, fertilisation) sur ces propriétés.

Les objectifs spécifiques de cette recherche peuvent se décliner en quatre points :

- i) Tracer les patrons de variations radiale et longitudinale de la largeur des cernes, la densité du bois et l'anatomie des trachéides;
- ii) Étudier l'effet de l'éclaircie commerciale sur la croissance des cernes, la masse volumique du bois et l'anatomie des trachéides;
- iii) Étudier l'effet de la fertilisation sur la croissance des cernes, la masse volumique du bois et l'anatomie des trachéides;
- iv) Étudier l'effet combiné des deux traitements sur la croissance, la masse volumique du bois et l'anatomie des trachéides.

L'hypothèse sur laquelle repose ce projet est que l'éclaircie commerciale diminue la compétition pour les éléments nutritifs et offre plus de lumière pour les arbres résiduels. Cela se traduit par une amélioration de la croissance. De la même façon, la fertilisation des sites offre plus d'éléments nutritifs aux arbres ce qui accélère la croissance. Or, pour notre espèce d'étude, on s'attend à ce que la réponse soit moins importante vu la nature conservatrice de cette essence puisqu'elle réagit faiblement à la variation des ressources dans le milieu (Vincent et al. 2009). Les hypothèses testées sont :

- i. Les variations intra-arbres sont plus importantes dans le bois juvénile que dans le bois mature.
- ii. L'éclaircie commerciale et la fertilisation augmentent la croissance radiale des tiges et le diamètre des trachéides, mais diminuent la masse volumique du bois et la longueur des trachéides;

- iii. Les variations intra-arbres de la largeur des cernes et propriétés du bois sont beaucoup plus importantes que celles dues aux traitements d'éclaircie et de fertilisation.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans cette section on abordera l'espèce étudiée en général et on décrira les notions essentielles à la compréhension de l'ensemble de l'étude. Cette phase nous conduira à l'élaboration du contexte dans lequel notre travail se situe.

1.1. Généralités :

1.1.1. Épinette noire :

L'épinette noire (*Picea mariana* Mill. B.S.P.), un Pinacea, est une espèce sempervirente à longue longévité. L'âge moyen pour cette essence est d'environ 200 ans, mais il est possible d'observer des sujets de 280 ans (Burns et Hankala 1990). Sa croissance est lente et peut atteindre, à maturité, entre 9 et 20 mètres de hauteur et un diamètre se situant généralement entre 10 et 25 centimètres sur des sites fertiles. Cependant, dans des sites défavorables, elle demeure petite (Viereck et Johnston 1990). Son tronc est pyramidal et droit, avec une écorce mince, rougeâtre et écailleuse. Les branches de l'épinette noire sont petites et les aiguilles sont vert bleuâtre. Elles sont linaires à petites tiges et étalées de 0,5 à 1,5 centimètres de long (Zhang et Koubaa 2009). L'enracinement de cette essence est généralement peu profond et se limite au premiers 10 centimètres du sol, rendant l'arbre sujet au chablis à la suite des traitements sylvicoles (Gagnon et al 1998, Ruel 1995).

La forêt boréale est reconnue par la fréquence élevée de feux. L'épinette noire est surtout adaptée à cet environnement. Selon Gagnon et al (1998), après un feu, le comportement reproductif de l'épinette noire, caractérisé par une installation rapide après feu, est sensiblement le même que celui du pin gris. En fait, au passage du feu, les cônes semi-

sérotineux s'ouvrent et les graines disséminées sur le sol permettent la régénération de la ressource. Après le feu, l'épinette noire se comporte comme une espèce pionnière même si sa grande tolérance à l'ombre la classe comme espèce de fin de succession (Pothier 2002). Autrement, en l'absence de feu, la reproduction naturelle se fait par marcottage¹ (Gagnon et al 1998).

1.1.2. Aire de distribution et habitat

La présence d'écosystèmes dominés par l'épinette noire dans la région boréale est remontée au début de l'holocène (Williams et al 2004). Cette espèce strictement nord-américaine, pousse dans le nord, l'est et l'ouest du Canada. On la trouve également dans le nord du Massachusetts et du Labrador sur la frontière Est, et du sud-est de la Colombie Britannique jusqu'en Alaska sur la côte Ouest (Figure 1.1) (Burns et Hankala 1990, Gagnon et al 1998).

Au niveau de son habitat, c'est une essence tolérante à l'ombre et croit sur des sites de toutes textures et de toutes topographies. Plus au sud de la forêt boréale, on la retrouve sur les sites les plus secs ou les plus humides, tandis que sur le reste du territoire on la retrouve un peu partout (Gagnon et al 1998). Physiologiquement, l'épinette noire est en mesure de supporter des écarts très importants de température (Viereck et Johnston 1990).

Les peuplements d'épinette peuvent être équiennes ou inéquiennes selon la longueur de la période depuis le dernier feu (Ritchie 1987). On peut la trouver associée à l'épinette blanche (*Picea glauca*), au sapin baumier (*Abies balsamea*), au pin gris (*Pinus banksiana*), et au bouleau blanc (*Betula papyrifera*) (Alteyrac 2005).

L'épinette noire est vulnérable à de nombreuses rouilles des aiguilles à plusieurs champignons entraînant une défoliation et une réduction de sa vigueur (Zhang et Koubaa 2009). Parmi les principaux facteurs de perturbation, on note la tordeuse des bourgeons de

¹ Le marcottage : c'est un processus par lequel une branche vivante entre en contact avec le sol et développe les racines (Gagnon et al 1998).

l'épinette (TBE)². Bien que, le sapin baumier (*Abies balsamea*) soit le principal hôte sans contredit, elle peut causer un ralentissement de la croissance des peuplements d'épinette (Pothier 2002; Gagnon et Morin 2001).



Figure 1.1 Aire de distribution de l'épinette noire (Adapté de Ostrander 1974)

1.1.3. Caractéristiques de l'épinette noire:

1.1.3.1. Caractéristiques anatomiques :

Les caractéristiques des cellules et la manière dont elles sont disposées forment le plan ligneux. Ce plan est relativement simple et uniforme chez les résineux (gymnospermes).

² La tordeuse des bourgeons de l'épinette *Choristoneura flumiferana* (Clemens) est l'insecte le plus destructeur des peuplements de conifères de l'Amérique du Nord. (<http://www.mnrf.gouv.qc.ca>)

Cela lui permet d'être approprié pour applications distinctes comparativement aux feuillus (Panshin et de Zeeuw, 1980).

Certaines caractéristiques sont observables à l'œil nu, d'autres ne sont accessibles qu'avec l'aide d'un microscope. Sur le plan macroscopique, la couleur du bois de l'épinette noire est claire, allant d'un blanc presque parfait à un brun jaunâtre pâle. Son bois n'a pas d'odeur particulière ni de goût distinctif (Zhang et Koubaa 2009). À la surface du bois, les cernes de croissance sont marqués. Le bois initial ou bien de printemps, produit au début de saison, est plus épais et clair que le bois final ou bois d'été, produit plus tard. Dans chaque cerne, la transition entre le bois initial et bois final se fait progressivement (Marguerie et al 2000). Le duramen ou bois de cœur est non différencié de l'aubier chez l'épinette noire.

Au plan microscopique, les unités de base qui composent le bois des conifères sont des trachéides. Environ 90 % du volume du bois de résineux est constitué de trachéides longitudinales. Elles remplissent à la fois le rôle de conduction de la sève et de soutien mécanique de la structure, alors que les rayons ligneux servent d'éléments de stockage et de distribution de réserves horizontalement (Core et al 1979). À maturité, les trachéides de l'épinette noire mesurent en moyenne entre 3,0 et 4,5 mm de long et le diamètre varie en moyenne entre 20 et 40 μm . Dans chaque cerne de croissance, la longueur des trachéides du bois final est plus longue que celle du bois initial. Aussi, la paroi des cellules est relativement épaisse dans le bois d'été par rapport au bois de printemps.

Ces trachéides portent sur ces extrémités et sur ces faces radiales des ponctuations. Ces dernières sont des moyens de communication et de passage de la sève entre des trachéides adjacentes. Les ponctuations des champs de croisement (plages de contact des trachéides axiales avec le parenchyme de rayon) sont du type picéoïde. En général, elles sont au nombre de 2 à 4 par champ de croisement. Tandis que le type aréolé orne la face radiale des trachéides du bois initial. Ces ponctuations se trouvent plus souvent en rangées simples (Marguerie et al 2000).

Les rayons sont nombreux et unisériés. On retrouve les canaux résinifères chez l'épinette noire. Ils peuvent être longitudinaux, se présentent comme de fines lignes, et transversaux incluse dans un rayon appelé fusiforme. Ces derniers sont dispersés, comprenant

un à deux canaux résinifères transversaux et font jusqu'à 16 cellules de haut, ou plus (Zhang et Koubaa 2009).

1.1.3.2. Caractéristiques chimiques :

La principale composante de la cellule de bois est la cellulose sous forme de microfibrilles. Elle renferme aussi une matrice de polymères non cellulosiques, principalement les hémicelluloses et la lignine (Tableau 1.1). La lignine se trouve entre les cellules de surface et à l'intérieur des cellules. La cellulose et les hémicelluloses ont des structures complexes appelés polysaccharides. La lignine est un polymère phénolique qui comprend aussi du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène. En outre, le bois contient des extractibles et de nombreux composants moléculaires de poids léger, qui sont solubles dans les solvants organiques neutres et dans l'eau. Il contient aussi de petites quantités de substances inorganiques qui constituent les cendres après calcination.

1.1.3.3. Caractéristiques physico-mécaniques :

La large utilisation du bois en tant que matériau s'explique par le rapport entre ses propriétés mécaniques et sa densité. La densité ou masse volumique du bois est un excellent indicateur de sa résistance mécanique. Chez l'épinette noire, la masse volumique basale est de 406 kg/m³ (Tableau 1.2). Celle du bois initial est de 396 kg/m³ et celle du bois final est de 607 kg/m³ (Koubaa et al 2000). Le retrait chez l'épinette noire est faible. Cependant le retrait longitudinal élevé est attribuable à la présence du fil torse près de la moelle (Zhang et Koubaa 2009).

Tableau 1.1 Pourcentage des constituants organiques du bois de l'épinette noire (Zhang et Koubaa 2009)

<i>Composants chimiques</i>	<i>Pourcentage (%)</i>
Alpha Cellulose	43,5
Holocellulose	62,5
Lignine	25,3
Hémicelluloses :	27,8
Arabinogalactane	1,7
Pectine	1,7
Glucomanne	17,6
Xylane	7,0
Pentosane	7,6
Extractibles	3,2
Cendres	0,2
Acétyle	1,1

Les propriétés mécaniques sont les plus importantes caractéristiques des produits du bois destinés à une utilisation structurale. La rigidité et la résistance à la déformation d'un matériau découlent directement de ses propriétés mécaniques. Le bois étant un matériau anisotrope, il ne possède pas de propriétés mécaniques semblables dans les trois directions (Reid et al 2009). Ces propriétés varient considérablement dans les directions longitudinale, tangentielle et radiale. Le module d'élasticité (MOE) le module de rupture (MOR) en flexion sont les paramètres les plus communs pour caractériser les propriétés mécaniques du bois. L'épinette noire présente des propriétés mécaniques plus élevées que celles de l'épinette blanche et du sapin baumier. Concernant le bois de dimension, on constate chez l'épinette noire une augmentation du bas vers le haut de l'arbre du MOE et du MOR (Zhang et Chauret 2001). Les travaux d'Alteyrac (2005) sur l'épinette noire ont conclu que la densité moyenne des cernes a un plus grand effet sur le MOR que sur le MOE. L'épinette noire demeure la meilleure espèce de l'Est du Canada pour répondre à la norme MSR (*Machine Stress Rated*) (Liu et al 2007). Les valeurs numériques des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de l'épinette noire sont résumées dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 Propriétés physico-mécaniques du bois de l'épinette noire (Zhang et Koubaa 2009)

Propriétés physiques						
Masse volumique (kg/m ³)	Retrait radial (%)	Retrait tangentiel (%)	Retrait volumétrique (%)			
406	3,8	7,5	11,1			
Propriétés mécaniques						
Module d'élasticité en flexion statique (MPa)	Module de rupture en flexion statique (MPa)	Module d'élasticité en flexion au choc (MPa)	Module d'élasticité en compression parallèle au fil (MPa)			
9 100	40,5	10 500	8 690			

1.1.4. Poids économique:

L'épinette noire apparaît comme l'un des piliers de l'industrie forestière au Québec. Son abondance et la qualité de son bois en font une essence économiquement importante au Québec (Viereck et Johnston 1990, Koubaa et al 2005, Alteyrac et al 2006). Elle est commercialisée dans la même catégorie que le sapin baumier et le pin gris sous la désignation S-P-F (Mullins et McKnight 1981).

Chaque année, on compte des centaines de milliers de plants d'épinette noire mis en terre dans l'Est du Canada. L'épinette noire sert principalement à la fabrication de pâtes et papiers. Bien que la plupart des billes sont destinées à l'industrie des pâtes et papiers, sa fibre de bois est appréciée aussi par les industries de sciage, pour les travaux de menuiserie, les montants d'échelles, les tables d'harmonie pour instruments de musique, les contenants, les contre-plaqués et les panneaux de particules (Zhang et Koubaa 2009 ; Mullins et Mc Knight 1981; Panshin et de Zeeuw 1980). Le bois d'épinette noire convient à différents produits composites surtout les panneaux de fibres à moyenne densité (MDF).

1.2. Traitements sylvicoles et qualité du bois

1.2.1. Éclaircie commerciale:

Une densité de peuplement élevée favorise la compétition entre les tiges pour les ressources du milieu (la lumière, l'eau et les éléments nutritifs). Celles-ci deviennent limitées lorsque le nombre des arbres devient important sur une surface donnée, ce qui diminue la croissance des arbres. L'éclaircie commerciale est un traitement qui consiste à éliminer quelques tiges au profit d'un ensemble de tiges jugées intéressantes pour leur assurer un bon environnement. Suite à une éclaircie commerciale, le degré de compétition entre les arbres diminue (Sheedy et Bertrand 1997) et la disponibilité de la lumière, de l'eau et des nutriments dans les peuplements augmente (Mayor et Rodà 1993; Aussenac et al 1995). Le but est d'accélérer la croissance en diamètre et en volume des tiges résiduelles tout en récupérant la mortalité anticipée (Zhang et al 2006; Barbour et al 1992). Ainsi, la diminution de l'âge d'exploitabilité permet de produire plus de volume sur une superficie donnée durant une période plus courte (Hébert 2004).

1.2.2. Fertilisation:

La croissance et la productivité d'un peuplement sont étroitement liées à la disponibilité des éléments nutritifs (macro et oligo-éléments). La déficience des sols boréaux en éléments nutritifs est largement reconnue comme l'un des facteurs qui limitent la productivité des peuplements (Islam et Macdonald 2005). Dans les sols pauvres, les traitements sylvicoles visant la gestion de la densité ne pourront pas aboutir à des résultats satisfaisants. Dans ce cas, les aménagistes optent pour la fertilisation. En effet, la capacité photosynthétique des plantes est positivement corrélée au taux d'azote dans les feuilles (Meziane et Shipley 2001) qui est à son tour déterminé par le taux de fertilité du sol. C'est pour cette raison que la fertilisation devient intéressante pour amender et améliorer la station.

1.2.3. Qualité du bois:

Il est difficile de donner une définition précise à la qualité du bois. Dans la littérature scientifique on trouve plusieurs définitions proposées par divers auteurs. Briggs et Smith (1986) ont défini la qualité du bois comme étant une mesure de son aptitude à satisfaire aux exigences liées à l'utilisation à laquelle il est destiné. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois pour une utilisation donnée sont héréditaires, mais sont souvent influencées par l'environnement de croissance de l'arbre (Jozsa et Middleton 1997; Dickson et Walker, 1997).

Chez l'épinette noire, la densité de bois est considérée comme un critère déterminant de la qualité du bois car elle influence les propriétés mécaniques du bois (Barbour et al 1996) et le rendement en fibres (Zhang 1997). La longueur des trachéides ainsi que l'épaisseur des parois sont des critères importants car ils influencent le procédé de fabrication de la pâte et du papier (Law et Valade 1997).

1.2.3.1. Densité du bois

La masse volumique ou la densité du bois est une intégration des caractéristiques anatomiques de la fibre, incluant l'épaisseur de la paroi secondaire des trachéides, le diamètre des trachéides, la proportion du bois initial ou bois de printemps et la proportion de bois final ou bois d'été (Erickson et Harrison 1974 ; Jozsa et Middleton 1997; Mäkinen et al 2002; Macdonald et Hubert 2002; Barbour et al 2003; Jaakkola et al 2005a; Zhu et al 2007).

Par sa forte corrélation avec les propriétés mécaniques du bois, la densité de bois est le critère clé de la qualité du bois (Zobel et Jett 1995). La densité permet de classer le type de bois et, donc, le reflet de leur qualité. Un bois dense est réputé avoir de bonnes qualités car la proportion du bois final est élevée (Jyske 2008). Il faut souligner que la variation de la densité est liée à plusieurs facteurs. La densité est variable selon le niveau de découpe dans l'arbre (Alteyrac et al 2006, Jyske 2008,), selon la position radiale (Koubaa et al 2005, Alteyrac 2005, Park et al 2009) et selon l'âge cambial (Koubaa et al 2005; Zhang et Koubaa

2009; Erikson et Harrison 1974; Haygreen et Bowyer 1989; DeBell et al 2002). En outre, ces variations sont conditionnées par les zones géographiques (DeBell et al 2004).

1.2.3.2. Anatomie de bois

Les trachéides sont des cellules simples formant le bois chez les résineux. Elles servent à la fois à donner sa résistance au bois (tissus de soutien, bois d'été) et à conduire l'eau et les liquides nutritifs (tissus de conduction, bois de printemps). La morphologie de la fibre du bois influe directement sur ces propriétés mécaniques. Celles-ci affectent les propriétés et le traitement du bois d'œuvre et du papier (Vahey et al 2007). En effet, la longueur des trachéides est un indicateur important de la qualité de bois puisque les fibres longues permettent de produire le papier fort et de meilleure qualité. L'épinette noire, caractérisée par une croissance lente, donne une fibre de bois de bonne qualité pour la fabrication des pâtes et papiers (Burns and Honkala 1990).

Chez les conifères, la longueur des trachéides est l'un des paramètres de détermination du bois juvénile dans la tige (Josza et Middleton 1997). Ce type de bois possède des propriétés différentes par rapport au bois mature. Cette différence se manifeste par des trachéides courtes (quatre fois moins longues que les trachéides du bois mature). Les trachéides sont plus courtes près de la moelle et leur longueur augmente progressivement vers l'écorce (Mäkinen et al 2008). Cette différence de la longueur des trachéides témoigne de la transition graduelle du bois juvénile au bois mature (Panshin et de Zeeuw 1980).

1.2.3.3. Variations intra-arbres des propriétés du bois :

Le processus de formation du bois est sujet à des changements qui vont conduire à des variations intra-arbre des propriétés physiques (la densité) et anatomiques du bois dans l'arbre. Ces variations intra-arbre des propriétés du bois peuvent être divisées en variation radiale de la moelle à l'écorce, variation axiale de la base à l'apex de la tige, et la variation intra-cerne (Panshin et de Zeeuw, 1980). La variation radiale de la masse volumique est déjà

comme pour la plupart des essences commerciales nord-Américaines (Parskin De Zeeuw 1980, Jozsa et Middleton 1997) (Figure 1.2).

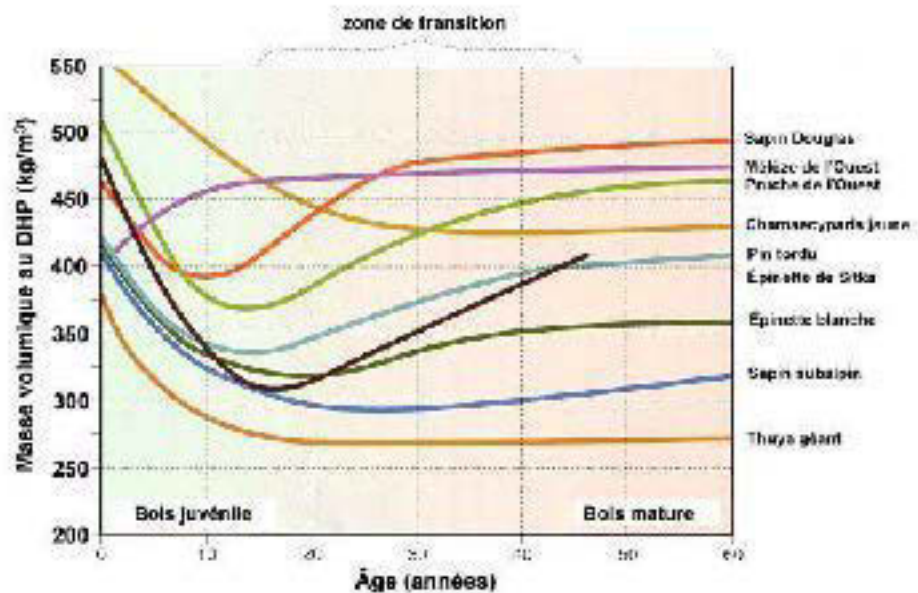


Figure 1.2 Variation de la masse volumique du bois en fonction de l'âge cambial pour 9 essences résineuses de l'Ouest (Jozsa et Middleton 1997)

Chez l'épinette noire, le profil radial de la masse volumique moyenne du cerne suit le modèle II décrit par Parskin et de Zeeuw (1980). Ce type II est caractérisé par une diminution de la densité du bois près de la moelle et par une augmentation de la densité vers l'écorce. En effet, les premiers cerne sont caractérisés par une masse volumique élevée (la zone du bois juvénile) qui diminue rapidement pour atteindre un minimum vers la zone de transition du bois juvénile au bois mature. L'observation du profil de densité au niveau d'un cerne révèle la présence de deux principaux types de bois : un bois peu dense formé en début de croissance du cerne, le bois initial, et un bois plus dense formé à la fin, le bois final. La variation intra-cerne de la masse volumique de l'épinette noire est très importante, passant par 350 kg/m³ dans le bois initial pour arriver à 650 kg/m³ dans le bois final (Koubaa et al

2005). La différence dans la masse volumique du bois initial et du bois final de l'épinette noire est due principalement aux différences entre la structure et la composition chimique des parois des trachéides du bois initial et du bois final (Jyske 2008).

Par rapport à la variation radiale, la variation en fonction de la hauteur a été moins étudiée. Alteyrac (2005) a conclu que l'effet de la hauteur dans l'arbre sur la masse volumique du bois est accentué dans le bois juvénile. La masse volumique de la base de la tige est caractérisée par une augmentation avec la hauteur pour les premières années puis diminue pour atteindre une valeur minimale à moitié de la tige, ensuite augmente jusqu'au sommet de l'arbre. Cependant, ces études ne présentent pas de données sur la variation intracernes de la masse volumique entre les différentes hauteurs dans la tige. Chez l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.), certaines études ont rapporté des résultats un peu contradictoires. Par exemple, Mäkinen et al (2007) n'a pas trouvé un effet significatif de la hauteur sur la masse volumique moyenne des cernes alors que Jyske (2008) a conclu que la masse volumique moyenne des cernes augmente de la base vers le haut de la tige.

Chez l'épinette noire (Antal et Micko, 1994) et la plupart des espèces résineuses (Jozsa et Middleton 1997), la longueur des trachéides est courte à proximité de la moelle, puis augmente peu à peu pour atteindre son maximum dans le bois mature. Les trachéides du bois final sont considérées plus longues, alliant des parois plus épaisses que celles du bois initial. Chez l'épinette noire, la longueur moyenne des fibres se situe entre (3,0 et 4,5mm) et le diamètre moyen entre 25 et 35 μ m (Zhang et Koubaa 2009).

La variation en fonction de la hauteur de la longueur des trachéides est moins importante que la variation radiale. La longueur des trachéides augmente généralement de la base de l'arbre jusqu'à un point près de la base de la cime où elle atteint un maximum. Par la suite, elle décroît jusqu'au sommet (Jyske 2008).

1.3. Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la qualité du bois.

1.3.1. Effets sur la croissance

1.3.1.1. *Éclaircie commerciale*

La réaction la plus connue des arbres aux traitements d'éclaircie est une augmentation du diamètre des arbres. L'éclaircie commerciale diminue le degré de compétition entre les tiges (Sheedy et Bertrand 1997) et augmente la disponibilité de la lumière, de l'eau et des nutriments dans les peuplements (Mayor et Roda 1993; Aussenac et al 1995). L'augmentation de la quantité de lumière induit une augmentation de la croissance des arbres (Mayor et Roda 1993), due à l'augmentation de l'activité photosynthétique (Day et Nanang 1997) et une accélération de la croissance racinaire, due à la pénétration de la lumière jusqu'au sol (Zahner et Whitmore 1960; Aussenac et al 1982).

En effet, les études effectuées sur différentes essences de la forêt boréale ont montré que les éclaircies commerciales améliorent la croissance radiale des tiges résiduelles (Barbour et al 1994; Zhang 1997; Jaakkola et al (2006). Certaines de ces études ont fait l'objet d'un suivi de traitement d'éclaircie commerciale à plus long terme. Ces études diffèrent entre elles notamment par l'âge du peuplement lors de l'intervention et par les espèces forestières observées. Cependant, elles visent pour la plupart l'acquisition de connaissances sur les effets du traitement au regard de la croissance du diamètre et en volume des tiges.

Chez l'épinette de Norvège, Jaakkola et al (2006) ont signalé une augmentation de la croissance de l'ordre de 8% à 29% selon l'intensité de l'éclaircie, modérée et intensive, respectivement.

Chez le pin gris, diverses études traitent de l'effet des éclaircies sur la croissance des tiges. En effet, les résultats de Schneider (2007) montrent que l'évolution du diamètre à hauteur de poitrine (DHP : diamètre mesuré à une hauteur de 1,3 m à partir de la base de l'arbre) des tiges résiduelles après éclaircie est proportionnelle à la surface terrière enlevée. Zhang et al (2006) ont constaté que le DHP dominant passe de 8 cm (témoin) à 20 cm

(éclaircie intense) 34 ans après traitement d'éclaircie pré-commerciale d'un peuplement naturel de pin gris au nouveau Brunswick. Tong et al (2005) ont remarqué les mêmes effets lors de leur étude sur dix peuplements de pin gris en Ontario.

L'équipe de recherche de Tasissa (Tasissa et al 1997; Tasissa et Burkhart, 1998) a observé chez le pin blanc un effet significatif sur la croissance après une deuxième éclaircie. Weetman (1975) a remarqué que l'enlèvement de 25% à 50% de la surface terrière d'un peuplement pur et équienne d'épinette noire a produit un gain de 10% et 38% de volume à l'échelle de l'arbre, respectivement, et une perte de 13,5% et 45% de volume marchand à l'échelle du peuplement.

Peu de résultats ont été publiés sur l'éclaircie commerciale des pessières noires de 90 ans et plus. Vincent et al (2009) rapportent une augmentation de la croissance radiale des tiges dix ans après traitement d'éclaircie commerciale dans dix peuplements éclaircis d'épinette noire âgés de 48 à 99 ans. Ils ont conclu que la réponse au traitement d'éclaircie dépend du diamètre de l'arbre et de la compétition, avec les plus gros arbres présentant la plus faible réponse au traitement. Par la suite, l'application de ce traitement dans les vieux peuplements est inefficace sur des espèces particulières dont le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh., Godbout 2002).

1.3.1.2. Fertilisation

La réponse des peuplements à la fertilisation dépend de plusieurs facteurs dont la qualité du site, le type d'essence, l'âge du peuplement, le type de sol et la densité de peuplement (Johnson 1992). La densité du peuplement est un autre facteur très important à considérer dans la réponse des peuplements à la fertilisation. Par ailleurs, les meilleures réponses sont dans les peuplements moins denses (Yang 1998). En effet, dans un peuplement dense, l'amélioration temporaire de la qualité du site par la fertilisation permet d'atténuer la compétition au niveau racinaire mais la compétition pour la lumière s'amplifie provoquant ainsi une exacerbation de la mortalité (Foster et Morrison 2002; Brockley 2005). Ceci justifie

l'importance des éclaircies avant de pratiquer la fertilisation (Weetman 1975; Jozsa et Brix 1989; Weetman et al 1995; Jaakkola et al 2006).

Au Canada, plusieurs études montrent l'importance de la fertilisation pour augmenter la productivité forestière. Newton et Amponsah (2006) ont réalisé une méta-analyse d'expériences de fertilisation sur 65 peuplements de pin gris et 43 peuplements d'épinette noire. Les résultats de leurs analyses montrent une relation linéaire entre la croissance en volume et la fertilisation. En Scandinavie, chez l'épinette de Norvège, la fertilisation augmente largement la croissance radiale des tiges (Jacobson et Pettersson 2001; Makinen et al 2002; Makinen et al 2005; Jaakkola et al 2006; Lindgren et al 2007).

Une étude de Blevins et al (2005) sur un peuplement de pin tordu (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm.) en Colombie-Britannique montre que la fertilisation azotée augmente la productivité à l'échelle de l'arbre et du peuplement en augmentant la disponibilité des ressources par arbre et par hectare. Ceci est dû à l'augmentation de la biomasse foliaire et de l'efficacité de croissance à l'échelle de l'arbre et du peuplement. D'autres études sur la même essence ont conclu que la réponse des arbres aux fertilisants ne dépend pas de la qualité de la station (Brockley 2005; 2007; Shannon et al 2006).

1.3.2. Effets sur la densité du bois

1.3.2.1. Éclaircie commerciale

L'impact de l'espacement entre les arbres sur la densité du bois, a été mis en évidence chez plusieurs espèces de la forêt boréale. Chez l'épinette de Norvège, Jaakkola et al (2005a) ont constaté une diminution de la densité moyenne du cerne et de la densité du bois final suite au traitement d'éclaircie tandis que celle de bois initial est non significative. Cette diminution s'explique par la réduction de la proportion de bois final de 25,6 % (intensité faible) à 17,2 % (forte intensité). Une autre étude sur la même essence, a constaté une diminution de la densité moyenne des cernes de 10% dans les espacements larges (3,5m x 3,5m) comparativement aux espacements de 2m x 2m (Sjolte-Jorgenstern 1967).

Au Canada, Barbour et al (1992) n'ont constaté aucun effet de l'éclaircie pré-commerciale sur un peuplement d'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.). Cependant, chez le sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.Franco), Jozsa et Brix (1989) ont affirmé la présence d'un effet négatif à court terme de l'éclaircie sur la densité du bois et le pourcentage du bois final.

Chez l'épinette noire, Zhang et Chauret (2001) ont constaté une diminution de la densité du bois en dessous d'une densité de peuplement de 1400 tiges/ha. Yang et Hazenberg (1994) ont constaté également que la densité du bois dans les espacements (2,7m x 2,7m) et (3,6m x 3,6m), a diminué de l'ordre de 8% comparativement à celle observée dans les espacements de (1,8m x 1,8m).

1.3.2.2. Fertilisation

Les résultats de l'effet de la fertilisation sur la densité de bois diffèrent d'une essence à une autre. Chez l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst), Jaakkola et al (2006) ont constaté une diminution immédiate de la densité de l'ordre de 7% après traitement de fertilisation. Une autre étude sur la même espèce en plantation (âgée de 24 ans) effectuée par Mäkinen et al (2005a) a révélé une forte diminution de la densité moyenne des cernes de l'ordre de 23%. Les mêmes résultats ont été signalés par Lundgren (2004). En Ontario, chez le pin gris (*Pinus banksiana*, Lamb.), Scott et al (1982) ont constaté une réduction de 6% de la densité moyenne du bois dans les cinq années subséquentes de traitement de fertilisation.

Chez le sapin de Douglas, plusieurs recherches montrent une baisse de la densité d'environ 10 à 15% (Erickson et Harrison 1974; Parker et al 1976; Jozsa et Brix 1989). Les études menées par Siddiqui et al (1972) dans l'Est du Canada montrent une diminution de la densité du bois de l'ordre de 10% chez l'épinette noire (*Picea mariana*). Toutefois, les travaux de Mörling (2001) sur un peuplement naturel équienne de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) au nord de la Suède ne montrent aucun effet significatif de la fertilisation sur la densité moyenne des cernes. Les mêmes résultats ont été révélés par Yang et al (1988) chez le pin tordu.

De plus, plusieurs études attestent la disparition de l'effet de la fertilisation à long terme (Blair et Olson 1984; Briggs et Smith 1986; Zobel et Van Buijtenen 1989; Blanche et al 1992; Jaakkola et al 2006). Ceci semble logique surtout dans les jeunes peuplements où la forte croissance induite par la fertilisation provoque une accélération de la fermeture de la canopée. Les applications singulières de la fertilisation ont des effets temporaires sur la croissance des arbres, d'où la disparition de son effet sur la densité du bois après le retour du site à son statut initial. Cependant, dans les expériences de fertilisation répétées, la croissance est continuellement élevée (Albaugh et al 2004; Jaakkola et al 2006; Lindgren et al 2007) tandis que la densité du bois demeure faible (Jaakkola et al 2006).

1.3.3. Effets sur l'anatomie de la fibre de bois

1.3.3.1. *Éclaircie commerciale*

La gestion de la densité d'un peuplement est le moyen le plus propice afin d'améliorer la production. Toutefois, les billes issues des peuplements aménagés sont sujettes à une diminution de la qualité du bois (Larson, 1969).

L'augmentation de la croissance des tiges suite à l'ouverture de la canopée par les éclaircies est due au développement du houppier (cime verte). En effet, la relation entre le volume de la cime vivante et la formation du bois est fortement exprimée. Dans les espacements larges, le houppier des arbres couvre presque la hauteur de la tige avec une augmentation de la proportion de bois juvénile. Ceci a pour conséquence un retard dans la transition au bois mature. Cette transition est caractérisée par l'augmentation graduelle de la longueur de la fibre de la moelle vers l'écorce. Ces variations de la longueur des fibres trouvent leur origine dans les variations génotypiques mais aussi dans les conditions de croissance.

Chez l'épinette de Norvège, Jaakkola et al (2005b) ont rapporté que les éclaircies fortes engendrent des trachéides courtes en comparaison avec les intensités faibles. Par contre, le diamètre de lumen augmente avec l'augmentation de l'intensité.

Chez l'épinette noire, une étude réalisée par Yang et Hazenberg (1994) en Ontario, a traité l'effet de l'espacement initial sur la longueur des trachéides d'épinettes noires issues de plantations. Les résultats de cette étude révèlent une différence significative de la longueur des trachéides avec l'intensité des espacements. Les trachéides étaient plus courtes dans les espacements larges (3,6m x 3,6m) que celles des deux autres espacements (2,7m x 2,7m et 1,8m x 1,8m). Ils ont constaté aussi que la longueur des fibres en plantation est inférieure à celles des tiges issues de peuplement naturel. Les mêmes résultats ont été observés chez le pin radiata (*Pinus radiata* D. Don) Cown (1973).

1.3.3.2. Fertilisation

La fertilisation azotée amplifie la croissance des arbres (Mäkinen et al 2002; Lindgren et al 2007). Cette forte croissance semble avoir des impacts indésirables sur les propriétés du bois semblables à celles qui découlent de l'application des éclaircies.

Chez l'épinette de Norvège, différents résultats de la relation entre le taux de croissance et les dimensions des trachéides ont été signalés. A titre d'exemple, l'étude de Jyske (2008) n'a constaté aucun effet significatif entre la croissance radiale des tiges et la structure des fibres. Cependant, Mäkinen et al (2002) ont démontré une relation inversement proportionnelle entre l'épaisseur des cernes et la longueur des fibres. En effet, la fertilisation a augmenté le taux de croissance par un facteur de trois et diminué la longueur des trachéides de l'ordre de 17%. De même, le diamètre des trachéides a augmenté de 12%. Les tiges issues des sites fertilisés ont des fibres de large diamètre comparativement à celles issues des sites non fertilisés (Denne, 1973 et Mäkinen et al 2005). Chez le pin tordu (*Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia* Englem.), Yang et al (1988) ont constaté une diminution modérée de la longueur des trachéides suite au traitement de fertilisation.

1.4. Effet combiné de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance, la densité et l'anatomie des trachéïdes

Les effets combinés de l'éclaircie et de la fertilisation sur la croissance ont été étudiés chez plusieurs espèces en forêt boréale. Soucy (2003) a constaté que les traitements d'éclaircie commerciale et de fertilisation appliqués de façon combinée dans un peuplement naturel d'épinette noire au Québec n'ont pas manifesté d'interaction mais au contraire une addition de leurs effets respectifs sur le taux de croissance des tiges. En effet, dans un peuplement dense, la fertilisation permet d'atténuer la compétition au niveau racinaire par l'amélioration temporaire de la qualité du site. Cependant la compétition pour la lumière s'amplifie provoquant ainsi un accroissement de taux de mortalité (Foster et Morrison 2002; Brockley 2005). Ceci justifie l'importance des éclaircies avant de pratiquer la fertilisation (Weetman 1975; Jozsa et Brix 1989; Weetman et al 1995; Jaakkola et al 2006).

Une étude de Blevins et al (2005) sur un peuplement de pin tordu (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm.) en Colombie-Britannique a démontré que la combinaison de l'éclaircie et de la fertilisation produit la plus forte croissance à l'échelle de l'arbre à cause des hausses de la biomasse foliaire.

L'application simultanée des deux traitements a des effets sur les propriétés de la fibre. En effet, le diamètre des fibres augmente avec l'augmentation de l'intensité photosynthétique suite à l'augmentation de la concentration d'azote dans le sol (Brix et Mitchell, 1980). L'étude de Nyakuengama et al (2002) sur le pin radiata démontre que l'application des fertilisants au milieu de la rotation sur des sites de bonne qualité augmente la densité et la longueur des fibres. Deux ans après, Nyakuengama et al (2003) ont constaté une diminution de l'épaisseur des parois cellulaires des trachéïdes suite au traitement de fertilisation, par conséquent une diminution de la densité. Les différentes réponses de fibres aux types de fertilisants montrent l'impact de ces engrais sur les propriétés du bois et, à terme, la qualité du bois.

Mörling (2001) a constaté que l'application simple de fertilisation ou d'éclaircie ne produit pas d'effet significatif sur la densité du bois dans un peuplement de pins sylvestres âgé de 56 ans. Cependant, la combinaison des deux traitements a produit une diminution très

significative de la densité du bois. De même, l'étude de Zhang et al (2005) sur un peuplement de sapin rouge (*Abies magnifica* A. Murr.) a démontré que les traitements d'éclaircie et de fertilisation améliorent la croissance des tiges et accélèrent le développement du peuplement.

Les résultats d'une étude récente de Jyske (2008) sur un peuplement d'épinette de Norvège (*Picea abies*) en Finlande montrent une augmentation de la croissance radiale des tiges (DHP) de l'ordre de 8% à 64% suite aux traitements d'éclaircie commerciale et de fertilisation. Cette croissance s'accompagne d'une faible diminution de la densité moyenne du bois, de la longueur ainsi que l'épaisseur des parois cellulaires. Des résultats similaires ont été rapportés par Jaakkola et al (2006).

CHAPITRE II

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Matériel

On présente aux sections suivantes la zone de l'étude, le dispositif expérimental et le matériel expérimental que nous avons utilisés dans cette étude.

2.1.1 Sites d'étude

L'étude a été menée dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, dans le nord-ouest du Québec. La région fait partie de la forêt boréale canadienne (Rowe 1972). Le climat est continental, avec une température journalière moyenne entre 0,8 et 1,2 ° C. Les précipitations annuelles varient de 671 à 899 mm avec une moyenne mensuelle maximale de 113 mm tombant en Juillet (Environnement Canada 2009). La topographie est relativement plane et l'altitude d'environ 300 à 350 m. Le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP), l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench)), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), et le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) sont les essences dominantes sur le territoire de l'étude.

Les tiges d'épinettes noires qui ont été utilisées pour cette étude ont été récoltées à deux périodes dans trois sites en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada : Castagnier sud, Miniac sud et Lebel sur Quévillon (Figure 2.1). La première récolte a été effectuée en juin 2005 dans les trois sites expérimentaux. La deuxième série d'échantillons a été récoltée à l'été 2007 dans les sites, de Castagnier sud et Lebel sur Quévillon. Les caractéristiques des sites et des arbres sont résumées dans les tableaux 2.1 et 2.2.

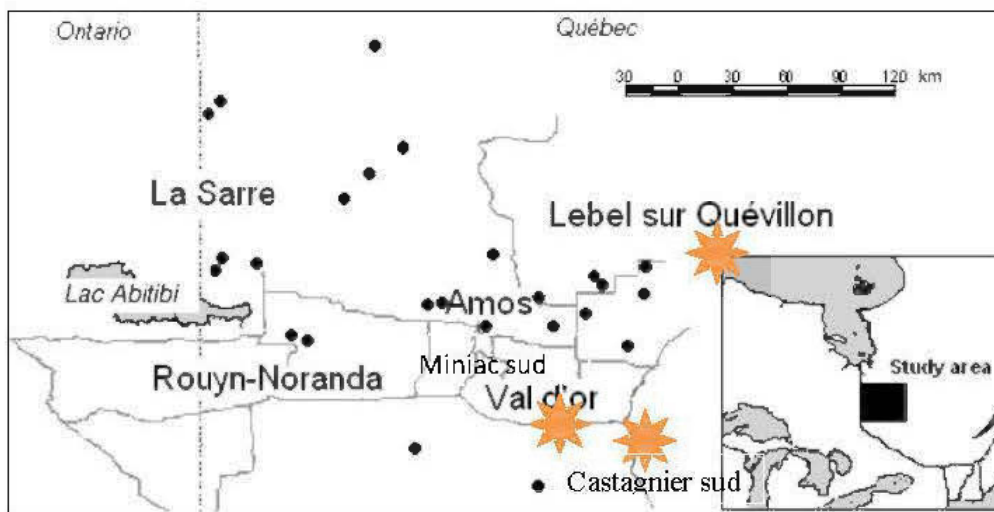


Figure 2.1 Localisation des sites expérimentaux

2.1.2 Dispositif expérimental

Trois peuplements équiens d'épinette noire ont été sélectionnés parmi les peuplements ciblés par les traitements d'éclaircie commerciale dans la région. Le sol est de type argileux lourd mal drainé avec une couche de litière de 10 à 20 centimètres d'épaisseur. Le dispositif original est un dispositif aléatoire en blocs complets comprenant trois traitements d'éclaircie : témoin et densités relatives 0,5 et 0,4 (par rapport à la surface terrière) effectués sur des parcelles expérimentales de 4 ha chacun.

Dans chacun des blocs et parcelles expérimentales du dispositif décrit ici-haut, une fertilisation azotée correspondant à une dose de 200kg N/hectare est effectuée selon un dispositif en tiroirs (Split-plot) dans lequel l'éclaircie commerciale constitue la parcelle principale et la fertilisation est appliquée en sous-parcelle. L'effet de la fertilisation et l'interaction entre la fertilisation et l'éclaircie seront évalués selon un dispositif en tiroirs (trois blocs, trois traitements d'éclaircie avec ou sans fertilisation). Ce dispositif est répété dans les trois sites (blocs).

Tableau 2.1 Caractéristiques des sites de l'étude

Caractéristiques	Sites		
	Castagnier-sud	Miniac-sud	Quévillon
Latitude (Nord)	N48° 45'	N48° 52'	N49° 06'
Longitude (West)	W77° 50'	W78° 10'	W76° 59'
Âge du peuplement	95	93	93
Hauteur des tiges (m)	20,1	17,6	15
DHP ^a	18,9	16,1	16,2
Indice du site (SI ₅₀ ^b)	17,0	15,9	16,4
Surface terrière initiale (m ² /ha)	35,8	38,9	34,8
Saison de traitement	Hiver 2001	Hiver 2000	Hiver 1999
Saison de récolte	Automne 2005 / Été 2007	Automne 2005	Été 2007
Type de sol	Argile lourde	Argile lourde	Argile lourde

^a Moyenne de diamètre de six individus de l'épinette noire par site au DHP (1.30m) en (cm).

^b Hauteur en m à l'âge 50), calculé par le model de Chapman-Richards et adapté par les coefficients de Pothier et Savard (1998)

Tableau 2.2 Nombre d'arbres échantillonnés par traitement

Site	Traitement	Intensité	Nombre d'arbres
Castagnier Sud		Témoin (T0)	6
	Éclaircie commerciale	Modérée (E1)	6
		Forte (E2)	6
		Éclaircie-fertilisation	T0F1, E1F1, E2F1
Miniac Sud		Témoin (T0)	2
	Éclaircie commerciale	Modérée (E1)	2
		Forte (E2)	2
		Éclaircie-fertilisation	T0F1, E1F1, E2F1
Lebel Sur Quévillon		Témoin (T0)	6
	Éclaircie commerciale	Modérée (E1)	6
		Forte (E2)	6
		Éclaircie-fertilisation	T0F1, E1F1, E2F1

2.1.3 Échantillonnage et préparation des échantillons :

Les arbres proviennent de peuplements forestiers naturels composés principalement d'épinettes noires (*Picea mariana*). Un feu de forêt avait permis l'établissement de ces essences sur le territoire. Un total de 60 tiges d'épinette noire a été récolté à deux suivies: 36 arbres en 2005 et 24 arbres en 2007. Deux à quatre épinettes noires dominantes ont été identifiées et récoltées aléatoirement par parcelle. À l'intérieur de chaque grume, nous disposons de plusieurs niveaux. Des rondelles de 5 cm d'épaisseur ont été coupées à tous les mètres à partir de la base jusqu'au sommet de l'arbre (Figure 2.3). On constate une certaine variabilité entre les arbres concernant leur hauteur, leur diamètre et la datation de la moelle à hauteur de 1,3 m. En particulier, on note une différence maximale de 10m entre l'arbre le plus petit et l'arbre le plus long de l'échantillonnage, et l'on constate que les arbres les plus vieux ont tendance à être plus grands et plus gros. Pour l'étude des variations en fonction de la hauteur, les cernes annuels ont été regroupés en 5 classes selon l'âge cambial : (classe1 (1-10) ; classe2 (11-20) ; classe3 (21-30) ; classe4 (31-40) et classe5 (41-50).

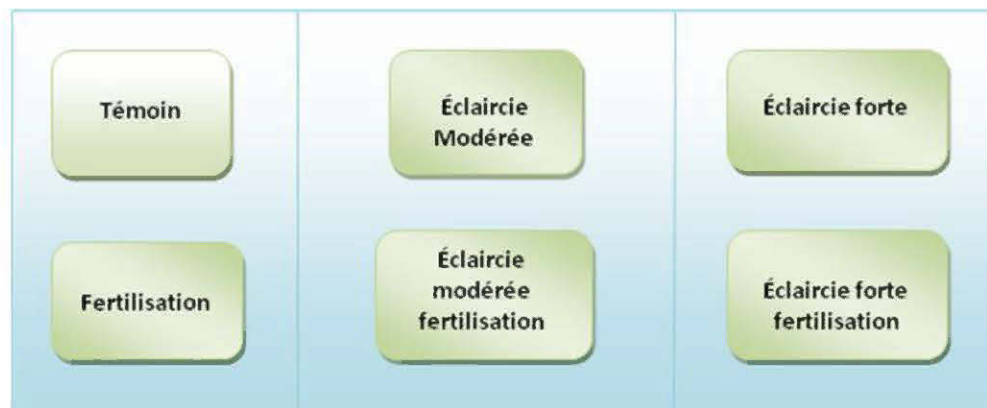


Figure 2.2 Schéma explicatif du plan expérimental

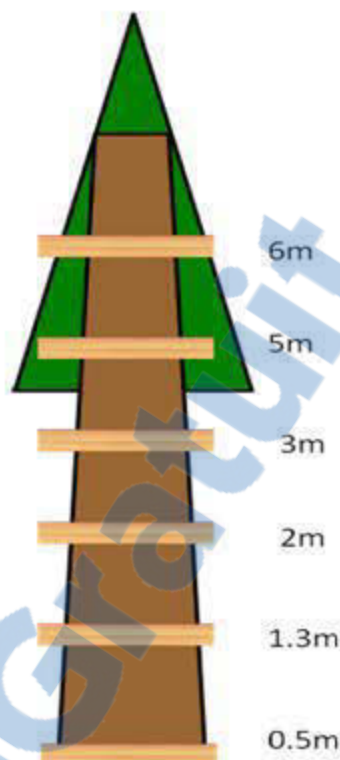


Figure 2.3 Schéma d'échantillonnage des disques sur les arbres de l'étude

2.1.4. Préparations des échantillons pour la densitométrie à rayon X.

Dans chaque disque de 30 cm dans l'arbre, une bande de 2 cm a été obtenue à l'aide d'une scie à ruban. L'échantillon final est obtenu à l'aide d'une circulaire double scie qui permet d'avoir une bande régulière de 1,57 mm d'épaisseur dans la direction longitudinale. À l'aide de l'appareil de Soxhlet³ qui permet d'enlever les substances extractibles les bandes sciées ont été traités dans un mélange cyclohexane/éthanol (2 : 1) pendant 24 heures puis dans l'eau distillée pour un autre 24h pour enlever les extractibles. Après extraction, les bandes ont été séchées à l'air sous une contrainte pour empêcher leur déformation. Après

³ Soxhlet ou un extracteur de Soxhlet est une pièce de verrerie qui permet de faire l'extraction par solvant des extractibles dans le bois. Cet appareil porte le nom de son inventeur : Franz von Soxhlet.

séchage et conditionnement, les échantillons ont été balayés avec un densitomètre à rayon X (Figure 2.4). L'épaisseur des échantillons doit être constante, une condition nécessaire à la qualité des résultats puisque la mesure de la densité s'effectue par mesure de l'absorption des rayons X qui dépend de l'épaisseur du matériau traversé par le rayon. Les échantillons ont été systématiquement mesurés au pied à coulisse avec une précision de $\pm 0,01$ mm.

2.1.5. Préparations des échantillons pour l'analyse de la qualité des fibre

Dans la présente étude nous avons mesuré la longueur et le diamètre des fibres afin de comparer leurs variations suite aux effets des traitements de fertilisation et d'éclaircie commerciale comparativement aux témoins. Pour ce faire, nous avons procédé à un échantillonnage systématique sur les rondelles extraites au DHP avec une identification des années de traitement. Sur chaque cerne, des portions du bois initial et du bois final ont été extraites et macérées.

Les échantillons extraits pour la mesure des propriétés des fibres ont été macérés selon la procédure décrite par Cloutier (2005). Cette méthode a été utilisée mais légèrement modifiée selon les étapes suivantes pour :

- Saturer les éclisses d'eau bouillante pour les ramollir. Une fois ramollis, les échantillons sont «essorés » afin d'éviter la réflexion de l'excès d'eau dans la binoculaire.
- On extrait un échantillon du cerne ou du bois initial et du bois final, selon le cas de chaque cerne (5ans avant et après la date de traitement d'éclaircie) à l'aide de la binoculaire et un scalpel.
- On dépose les échantillons 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 pendant cinq heures. Le mélange est un oxydant très puissant et permet la macération des fibres.
- Lorsque le traitement est terminé, on prend les échantillons macérés avec une pince et on les dépose dans l'eau pour les rincer.

- L'échantillon est par la suite mis dans un mélangeur pour obtenir une suspension en fibres prêtes à passer dans l'analyseur de la qualité de la fibre (FQA) (Figure 2.5) pour analyse.

2.2 Méthodes

2.2.1 Densitomètre

La croissance et la densité du bois ont été mesurées sur des échantillons destructifs par le densitomètre à rayon X de Quintek Measurements System, Inc. (QMS) (Figure 2.4). Le QMS est conçu pour analyser de planchettes de bois minces. Les échantillons doivent pouvoir se positionner correctement dans le chariot et mesurer entre 1 mm à 2 mm d'épaisseur. Les échantillons extraits à différentes hauteurs de chaque arbre ont été sciés selon ces normes, pour pouvoir être analysés, procurant alors un rapport d'analyse individuelle des données.

Le fonctionnement du densitomètre à rayon X (QMS) est basé sur l'atténuation d'un rayon X traversant un échantillon avec une résolution linéaire de 0,02 mm. Le logiciel « Tree Ring Analyzer utilisé avec l'appareil » a permis d'estimer, pour chaque arbre et chaque cerne, les paramètres suivants : largeur du cerne (RW), du bois initial (EWW) et du bois final (LWW) ainsi que les masses volumiques du cerne (RD), du bois initial (EWD) et du bois final (LWD). La proportion du bois final a été estimée selon le rapport de la largeur du bois final par rapport à celle du cerne.

Le Logiciel Matlab a été utilisé pour modéliser les profils des données bruts de densité intra-cernes du bois pour déterminer le point de transition de bois initial - bois final. La décomposition du profil de densité de chaque cerne permet de déterminer la transition bois initial et bois final (le point d'inflexion de la courbe) selon la procédure décrite par Koubaa et al (2002).



Figure 2.4 Densitomètre à rayon X de Quintek Measurement Systems (QMS)



Figure 2.5 Analyseur de la qualité de la fibre de la compagnie OPTEST

2.2.2. Analyse de la qualité de la fibre

L'analyseur de la qualité de la fibre (figure 2.5) est un appareil qui mesure automatiquement et avec précision la qualité de la fibre cellulosique à savoir 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 .

Il est également possible de déterminer la masse linéique des fibres qui exprime la masse de fibres rapportée à sa longueur (en mg/m), sur un étendue qui varie de 0,1 à 0,5 mg/m et la rectitude des fibres caractérisée par la courbure, les angles et le nombre des coudes par fibre. La longueur des fibres peut être exprimée selon la moyenne arithmétique (L_N), calculée selon l'équation 2.1, la moyenne pondérée selon la longueur (L_W) calculée selon l'équation 2.2 ou selon la moyenne pondérée selon le poids (L_{WW}) calculée selon l'équation 2.3.

$$L_N = \frac{\sum n_i L_i}{\sum n_i} \quad [2.1]$$

$$L_W = \frac{\sum n_i L_i^2}{\sum n_i L_i} \quad [2.2]$$

$$L_{WW} = \frac{\sum n_i L_i^3}{\sum n_i L_i^2} \quad [2.3]$$

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

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons utilisé la longueur pondérée (L_{ww} ; Éq. 2.3). L_{ww} est la valeur la plus utilisée puisqu'elle met plus de poids sur les fibres et minimise l'effet des fines et des parenchymes sur la détermination de la longueur moyenne des fibres.

2.3 Analyses statistiques

La première partie de l'analyse porte sur les variations intra-arbres de la largeur des cernes, la masse volumique du bois et l'anatomie des trachéides. Elle se base sur des observations des graphiques représentant la variation radiale de la moelle vers l'écorce de ces différentes propriétés étudiées en fonction de l'âge cambial et de la hauteur de l'arbre.

Les données ont été analysées en utilisant la procédure MIXED (modèle linéaire général mixte) du progiciel SAS (SAS Institute Inc 2004). Les raisons qui expliquent le choix du modèle incluent la présence de données non équilibrées et manquantes. Le modèle inclut simultanément des effets fixes et des effets aléatoires. Tous les facteurs étudiés sont considérés fixes à l'exception de l'arbre qui a été considéré comme aléatoire. Le niveau de signification a été fixé à un seuil de signification statistique $\alpha=0,05$.

Il faut noter que le nombre d'interactions incluses dans les modèles mixtes est limité par la taille des échantillons. Les interactions, quadruples, et quintuples ne peuvent pas être incluses dans les modèles. De plus, seules les interactions qui ont une signification pratique ont été incluses dans les modèles et les interactions non significatives pour toutes les propriétés n'ont pas été considérées.

2.3.1 Effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la masse volumique

L'effet de l'éclaircie commerciale a été étudié selon un dispositif factoriel où les facteurs étudiés sont le site (3 peuplements), l'éclaircie (3 niveaux : Témoin; éclaircie modérée; éclaircie forte), l'arbre (12 à 20 arbres par site), la hauteur dans l'arbre (0,5 m, 1,3 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m etc.); le temps (-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5; où 0 correspond à l'année de l'éclaircie. La surface terrière initiale a été utilisée comme co-variable. L'équation 2.4 montre le modèle utilisé pour étudier l'effet de l'éclaircie commerciale sur les composantes de la densité du bois et de la croissance.

$$M_{ijklmn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + \delta_l + \phi_m + \gamma_n + (\alpha\chi)_{ik} + (\alpha\phi)_{im} + (\chi\phi)_{km} + (\chi\gamma)_{kn} + \varepsilon_{ijklmn} \quad [2.4]$$

Où :

M_{ijklmn} est la moyenne de la propriété dans le site i , dont la surface terrière initiale du peuplement est j ; qui a subi une éclaircie k , de l'arbre l à la hauteur m à un temps n ;

μ est la moyenne de la propriété;

α est l'effet du site;

β est l'effet de la surface terrière initiale;

χ est l'effet de l'intensité de l'éclaircie;

δ est l'effet dû à l'arbre;

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

γ est l'effet du temps (année par rapport à l'année de l'éclaircie);

ε_{ijklmn} est le terme d'erreur.

2.3.2 Effets de l'éclaircie commerciale sur les propriétés morphologiques des trachéides

L'effet de l'éclaircie commerciale sur les propriétés morphologiques des trachéides a été étudié au DHP selon un dispositif factoriel où les facteurs sont le site (3 sites), l'intensité de l'éclaircie (témoin, éclaircie modérée, éclaircie forte), l'arbre (4-6 arbres par intensité, 12 à 20 arbres par site); le temps (-2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5; où 0 correspond à l'année de l'éclaircie) et la surface terrière initiale. Le modèle utilisé pour étudier l'effet de l'éclaircie commerciale sur les propriétés morphologiques des fibres est présenté à l'équation 2.5.

$$M_{ijklm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + \delta_l + \phi_m + (\alpha\chi)_{ik} + \varepsilon_{ijklm} \quad [2.5]$$

Où :

M_{ijklm} est moyenne de la propriété dans le site i , dont la surface terrière initiale du peuplement est j ; qui a subi une éclaircie k , de l'arbre l à la hauteur m à un temps n ;

μ est la moyenne de la propriété;

α est l'effet du site;

β est l'effet de la surface terrière initiale;

χ est l'effet de l'intensité de l'éclaircie;

δ est l'effet de l'arbre;

ϕ est effet du temps (année par rapport à l'année de l'éclaircie)

ε_{ijklm} est le terme d'erreur

2.3.3 Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance et la masse volumique du bois

L'équation 2.6 montre le modèle utilisé pour étudier l'effet de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur les propriétés croissance et de masse volumique du bois. Ces effets ont été étudiés selon un dispositif factoriel où les facteurs sont le site (3 sites), l'intensité de l'éclaircie (Témoin; éclaircie modérée; éclaircie forte), l'arbre, la hauteur dans l'arbre (0,5 m, 1,3 m, 2 m, 3 m, 4 m, etc.); le temps (-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5; où 0 correspond à l'année de l'éclaircie), la surface terrière initiale (comme co-variable) et la fertilisation (fertilisé ou non).

$$M_{ijklmnp} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + \delta_l + \phi_m + \gamma_n + \eta_p + (\alpha\chi)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} + (\alpha\phi)_{im} + (\chi\delta)_{kl} + (\chi\gamma)_{kn} + (\chi\eta)_{kp} + (\delta\gamma)_{ln} + (\alpha\chi\delta)_{ikl} + \varepsilon_{ijklmnp} \quad [2.6]$$

Où :

$M_{ijklmnp}$ est la moyenne de la propriété dans le site i , dont la surface terrière initiale du peuplement est j ; qui a subi une éclaircie k , et une fertilisation l , de l'arbre m à une hauteur n et à un temps p ;

μ est la moyenne de la propriété;

α est l'effet du site;

β est l'effet de la surface terrière;

χ est l'effet de l'intensité de l'éclaircie;

δ est l'effet dû à la fertilisation;

ϕ est l'effet de l'arbre

γ est l'effet de la hauteur dans l'arbre

η est l'effet du temps (année par rapport à l'année de l'éclaircie)

$\varepsilon_{ijklmnp}$ est le terme d'erreur

2.3.4 Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur les propriétés morphologiques des trachéides

L'équation 2.7 montre le modèle utilisé pour étudier l'effet de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur les propriétés morphologiques des trachéides. Ces effets

ont été étudiés au DHP selon un dispositif factoriel ou les facteurs sont le site, l'intensité de l'éclaircie, l'arbre; le temps, la surface terrière initiale (en co-variable) et la fertilisation.

$$M_{ijklmn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + \delta_l + \phi_m + \gamma_n + (\alpha\chi)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} + (\chi\delta)_{kl} + (\alpha\chi\delta)_{ikl} + \varepsilon_{ijklmn} \quad [2.7]$$

Où :

M_{ijklmn} est la moyenne de la propriété dans le site i , dont surface initiale du peuplement est j , qui a subi une éclaircie k , et une fertilisation l , de l'arbre m à un temps n ;

μ est la moyenne de la propriété;

α est l'effet du site;

β est l'effet de la densité initiale du peuplement;

χ est l'effet de l'intensité de l'éclaircie;

δ est l'effet de la fertilisation;

ϕ est l'effet de l'arbre

γ est l'effet du temps (année par rapport à l'année de l'éclaircie)

ε_{ijklmn} est le terme d'erreur;

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Statistiques descriptives

Le tableau 3.1 regroupe, pour tous les arbres, les moyennes et les coefficients de variation des caractéristiques des arbres récoltés dans les trois peuplements d'épinette noire étudiés. Les coefficients de variation de la densité moyenne, la densité du bois initial et la densité du bois final sont de 9%, 8% et 11% respectivement, tandis que ceux pour la largeur des cernes et de ses composantes vont de 42% à 58%. La largeur moyenne des cernes des tiges échantillons dans les 3 sites était de 1,06 mm et la masse volumique moyenne du bois était de 451 kg/m³. La masse volumique du bois final (658 kg/m³) est presque le double de celle du bois initial (384kg/m³) (Tableau 3.1). La masse volumique moyenne varie de 449 à 451 kg/m³. Cette moyenne est en accord avec celles rapportées par (Koubaa et al 2000, Pamerleau-couture 2011, Vincent 2011) pour l'épinette noire, supérieure à celles rapportées pour le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill) (Koga et Zhang 2004) et inférieure à celles rapportées pour le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) (Park et al 2009 et Kasraoui 2011).

D'un autre part, la moyenne de la largeur des cernes dans les trois peuplements âgés de 93 à 95 ans (1,06 mm) est inférieure à celles rapportées par Zhang et Koubaa (2009) (2,51 mm). Cela peut être expliqué par les différences dans l'âge du peuplement et l'origine des arbres (peuplement ou plantation). En effet, il est connu que la croissance radiale est plus élevée dans les tiges issues des plantations que celles issues des peuplements naturels.

Les valeurs moyennes de la longueur et du diamètre des trachéides des arbres issus de trois sites sont résumées au tableau 3.2. La longueur et la largeur moyenne des trachéides sont de 3,16 mm et de 33 µm, respectivement. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur

que celles rapportées pour l'épinette noire (Zhang et Koubaa 2009) et pour l'épinette de Norvège (Jaakkola et al 2005b).

Tableau 3.1 Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses, en %) de la masse volumique et de la largeur des cernes du bois de l'épinette noire issu de trois peuplements en Abitibi.

	Masse volumique (kg/m ³)		
	Cerne (RD)	Bois initial (EWD)	Bois Final (LWD)
Castagnier-sud	454 (9,1)	384 (8,3)	647 (12,0)
Miniac-sud	449 (9,3)	382 (8,3)	667 (11,2)
Quévillon	451 (8,9)	385 (8,3)	663 (11,0)
Moyenne	451(9,1)	384 (8,3)	658 (11,7)
	Largeur (mm)		
	Cerne (RW)	Bois initial (EWW)	Bois Final (LWW)
Castagnier-sud	1,06 (48)	0,81 (51)	0,29(42)
Miniac-sud	0,98 (58)	0,78 (55)	0,25(64)
Quévillon	1,11 (47)	0,87 (49)	0,27(44)
Moyenne	1,06 (50)	0,83 (51)	0,27 (48)

Tableau 3.2 Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses en %) de la longueur et de la largeur des trachéides du bois de l'épinette noire issu de trois peuplements en Abitibi.

Site	Longueur des trachéides (mm)		Largeur des trachéides (µm)	
	Bois initial	Bois final	Bois initial	Bois final
Castagnier-sud	3,04 (9)	3,11 (8)	35,4 (8)	32,3 (7)
Miniac-sud	3,20 (8)	3,28 (6)	36,1 (7)	33,8 (6)
Quévillon	3,14 (8)	3,18 (7)	35,3 (7)	32,6 (8)
Total	3,13 (8)	3,19 (7)	35,3 (7)	32,6 (7)

Par ailleurs, les longueurs et les largeurs moyennes des trachéides du bois initial et du bois final varient très peu entre les sites (Tableau 3.2). Les longueurs moyennes des trachéides du bois initial et du bois final variaient entre 3,04 et 3,20 mm et entre 3,11 et 3,28 mm, respectivement. La longueur moyenne du bois final est toujours légèrement supérieure à celle du bois initial en parfait accord avec les résultats de Panshin et de Zeuw (1980). De la même façon, les largeurs des trachéides moyennes du bois initial et du bois final ont montré aussi très peu de variation entre les sites en se situant entre 35 et 36 μm et entre 32 et 33 μm , respectivement. La largeur moyenne des trachéides du bois initial est supérieure à celle du bois final.

3.2. Variations radiales et longitudinales de la croissance et des propriétés physiques et anatomiques du bois

Les variations intra-arbres de la croissance annuelle, de la masse volumique du bois, et des propriétés morphologiques des fibres sont illustrées dans les figures 3.1 à 3.6. On y présente les variations radiales et longitudinales.

3.2.1 Variations radiale et longitudinale de la largeur des cernes

La figure 3.1 montre la variation des largeurs du cerne (RW), du bois initial (EWW) et du bois final (LWW) avec l'âge cambial dans l'arbre. Les 4 premiers cernes montrent une légère augmentation de la largeur moyenne pour atteindre un maximum à proximité du 7^{ième} cerne, puis diminue rapidement en allant vers l'écorce. À un âge plus avancé (à partir de 40 ans), la largeur du cerne est caractérisée par une diminution moins accentuée pour devenir pratiquement constante (Figure 3.1). La largeur du bois initial suit le même patron de variation radiale que la largeur du cerne. Cependant, la largeur du bois final, présente un profil de variation radiale différent caractérisée par une diminution constante dans les premiers cernes annuels. Cette variation est moins accentuée que celles de la largeur du cerne et du bois initial. À un âge plus avancé, la largeur du bois final devient presque constante

(Figure 3.1). Ces profils de variation sont similaires à ceux générés pour l'épinette noire (Alteyrac, 2005; Koubaa et al 2005).

La figure 3.2 illustre les variations longitudinales des largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final. Les largeurs moyennes du cerne et du bois initial tendent à augmenter avec la hauteur de l'arbre. Ces augmentations s'expliquent par la diminution du nombre de cernes annuels et par conséquent, le nombre de cernes étroits (Figure 3.1). La largeur du bois final reste quasi constante tout le long de la hauteur de l'arbre (Figure 3.2). Ce résultat s'explique par la faible variation de la largeur du bois final avec l'âge cambial. Ces patrons de variation sont similaires à ceux rapportés pour le pin gris (Kasraoui 2011).

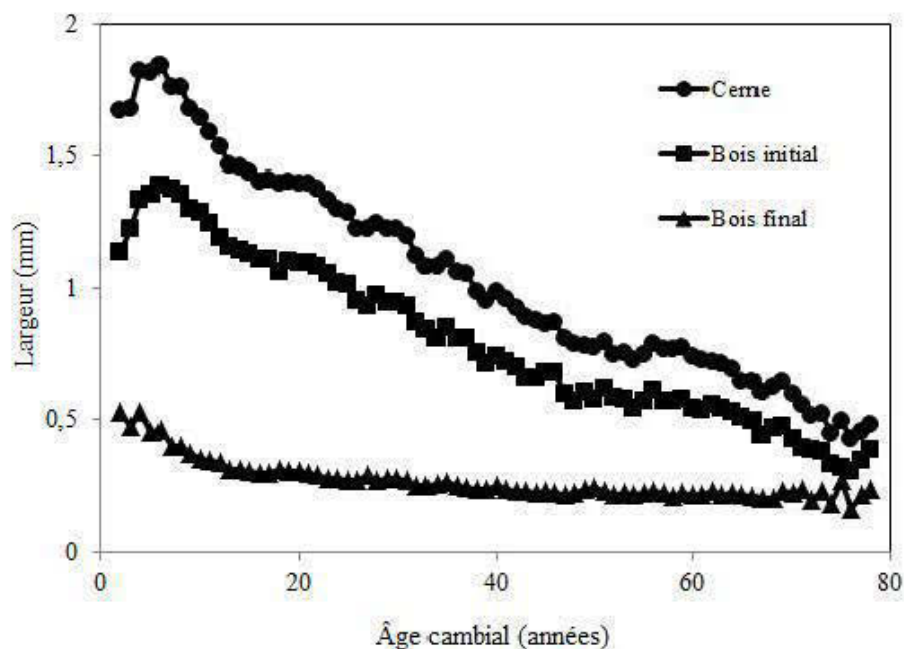


Figure 3.1 Variation des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge cambial au niveau du DHP

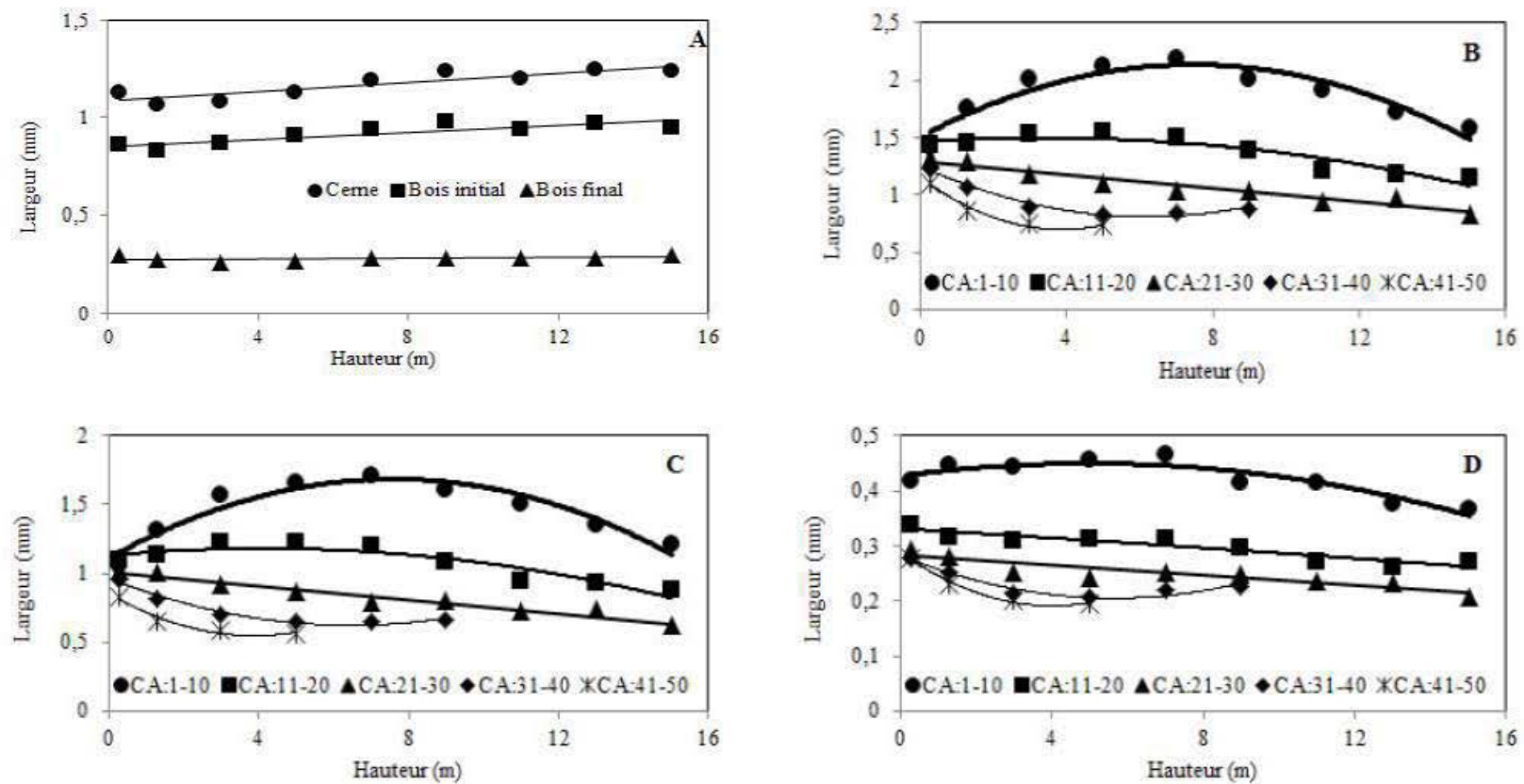


Figure 3.2 Variations longitudinales des composantes de la largeur des cernes : A. Largeurs moyennes des cernes; du bois initial et du bois final; B. Largeur moyenne du cerne avec la hauteur à différentes classes d'âges cambiaux; C. Largeur du bois initial avec la hauteur à différentes classes d'âges cambiaux; D. Largeur du bois final avec la hauteur à différentes classes d'âges cambiaux

Les variations longitudinales des largeurs du cerne (Figure 3.2B), du bois initial (Figure 3.2C) et du bois final (Figure 3.2D) indiquent des différences de patrons selon les classes d'âges. Pour le bois final, la même tendance a été obtenue pour toutes les classes d'âge 1-10, 11-20 et 21-30, soit une diminution de la base vers la cime. Par contre, pour les classes d'âge du bois mature (31-40 et 41-50), la largeur moyenne du bois final diminue initialement jusqu'à 3 m de hauteur puis tend à se stabiliser ou à augmenter légèrement vers la mi-hauteur de l'arbre. Les variations des largeurs du cerne (Figure 3.2B) et du bois initial (Figure 3.2C) pour la classe d'âge 1-10, sont caractérisées par une augmentation près de la base jusqu'à mi-hauteur suivi d'une diminution constante jusqu'au sommet de l'arbre. Pour les classes d'âge 11-20 et 21-30, les largeurs du cerne et du bois initial diminuent avec l'augmentation de la hauteur dans l'arbre. Pour les classes d'âge 31-40 et 41-50, la largeur moyenne du cerne et celle du bois initial diminuent initialement jusqu'à 3 m de hauteur puis tendent à se stabiliser ou à augmenter légèrement vers la mi-hauteur de l'arbre. Des tendances similaires ont été rapportées par Kasraoui (2011) pour le pin gris.

3.2.2 Variations radiale et longitudinale de la masse volumique

La Figure 3.3 illustre les profils de variations radiales des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final de l'épinette noire à hauteur de poitrine (DHP = 1,3 m). Le profil radial de la masse volumique moyenne du cerne de l'épinette noire est bien connu (Alteyrac 2005, Koubaa et al 2005) et 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. En effet, les premiers cernes sont caractérisés par une masse volumique élevée probablement due à la formation du bois de compression (Alteyrac 2005). Après cela, elle 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 noire, constitue la première source de variation de la masse volumique du bois de l'épinette noire (Koubaa et al 2005). Par la suite, la masse volumique augmente progressivement dans le bois mature (Yang et Hazenburg, 1994). Le même patron de variation radial est observé pour la masse volumique du bois initial. Dans le cas du bois final, la masse volumique augmente d'une façon constante de la moelle jusqu'à un âge cambial de l'ordre de 20 ans pour se maintenir

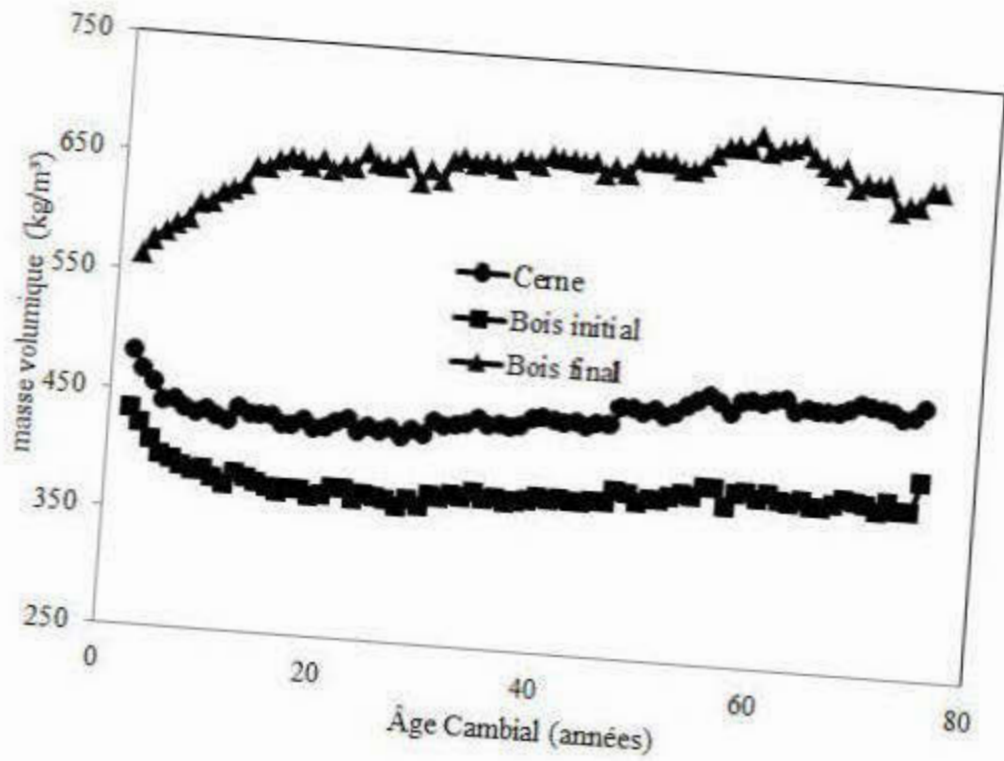


Figure 3.3 Variation de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge cambial à 1,3 m (DHP).

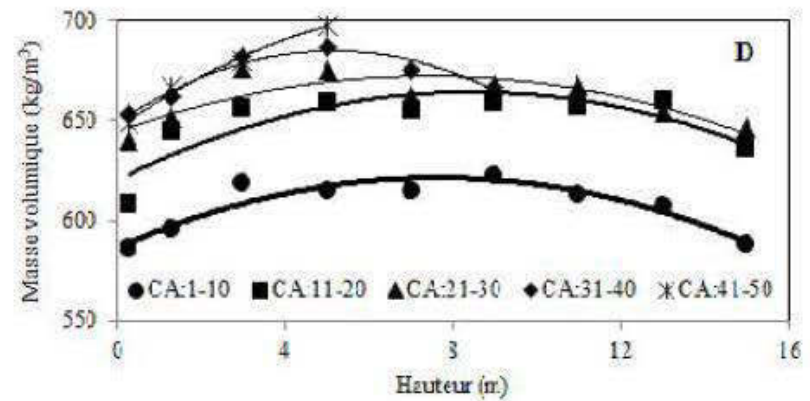
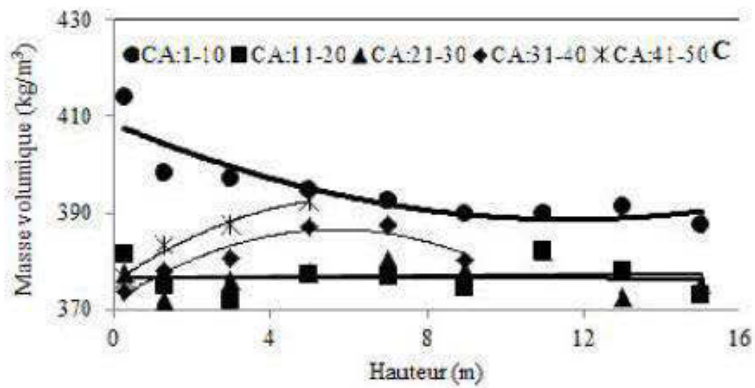
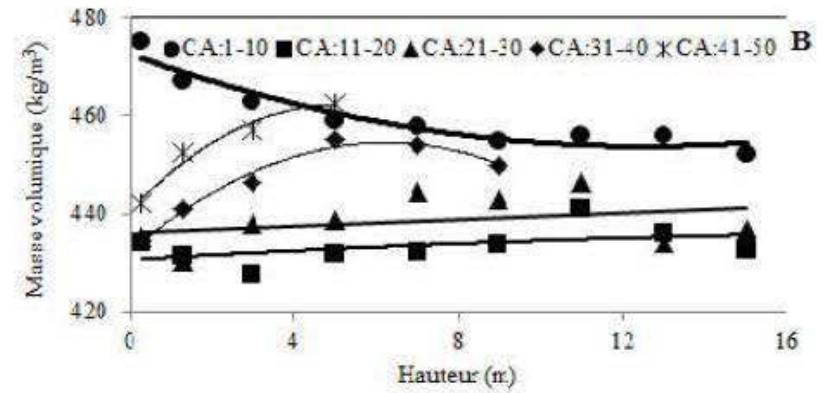
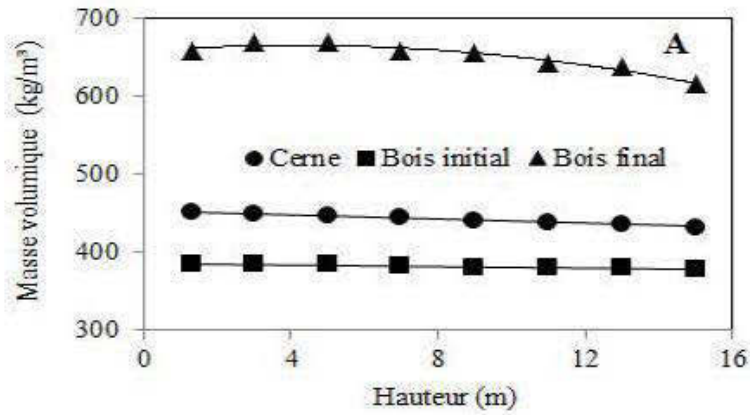


Figure 3.4 Variations longitudinales de la masse volumique : A. Masse volumique moyenne des cernes, du bois initial et du bois final; B. Masse volumique du cerne à différentes classes d'âges cambiaux; C. Masse volumique du bois initial à différentes classes d'âges cambiaux; D. Masse volumique du bois final à différentes classes d'âges cambiaux

3.2.3 Variations radiales et longitudinales de la morphologie des trachéides

À la figure 3.5, on observe les variations radiales (en fonction de l'âge cambial) de la longueur (Figure 3.5A) et du diamètre des trachéides (Figure 3.5B) au niveau du DHP. La longueur des trachéides est faible à proximité de la moelle, puis augmente graduellement pour atteindre un maximum dans le bois adulte, aux alentours de l'âge cambial de 25 ans. Le patron de variation radiale est le même quel que soit la hauteur dans l'arbre (Voir annexe). Des profils de variation radiale similaires ont été observés chez l'épinette noire (Antal et Micko, 1994), l'épinette de Norvège (Jaakkola et al 2005), le pin gris (Kasraoui 2011) et le peuplier hybride (Koubaa et al 1998).

La figure 3.5B illustre la variation radiale de la largeur moyenne des trachéides. Les trachéides sont étroites à proximité de la moelle, puis leur largeur augmente pour atteindre un palier entre les âges cambiaux de 10 et 20 ans suivi par une légère diminution suivi d'une constance dans le bois mature (Figure 3.5B). Kasraoui (2011) rapporte des patrons similaires pour le pin gris. Les mêmes tendances de variation radiale de la largeur des trachéides ont été observées à toutes les hauteurs (Voir Annexe). D'autre part, la variation radiale de la largeur des trachéides en fonction de l'âge cambial est relativement faible. L'étendue de variation se situe entre 25 et 33 μm . La même conclusion a été tirée pour le pin gris (Kasraoui 2011).

Le patron de variation radiale de la largeur des trachéides (Figure 3.5B) dans le bois juvénile (entre 1 et 20 ans) ressemble au patron de la variation radiale de la largeur des cernes pour la même période (Figure 3.1). Cela indique que le changement dans les dimensions des trachéides dans le bois juvénile explique en partie les changements dans la largeur des cernes. Dans le cas du bois mature, la largeur des cernes diminue d'une façon constante avec l'augmentation de l'âge cambial (Figure 3.1, alors que la largeur des trachéides est constante (Figure 3.5B). Il sera spéculatif d'expliquer la divergence des deux tendances. Cependant, l'accroissement de la circonférence dans l'arbre avec l'âge explique en partie la diminution de la largeur des cernes comparativement à la constance de la largeur des trachéides. Des études plus approfondies permettront de mieux expliquer ces divergences.

Les variations longitudinales de la longueur moyenne des trachéides et la largeur moyenne des trachéides pour les âges cambiaux, 2, 5, 11 et 20 sont illustrées aux figures

3.6A et 3.6B, respectivement. Ces illustrations indiquent qu'à un même âge cambial, la morphologie des trachéides varie très peu avec la hauteur malgré que certaines tendances se dégagent de ces illustrations.

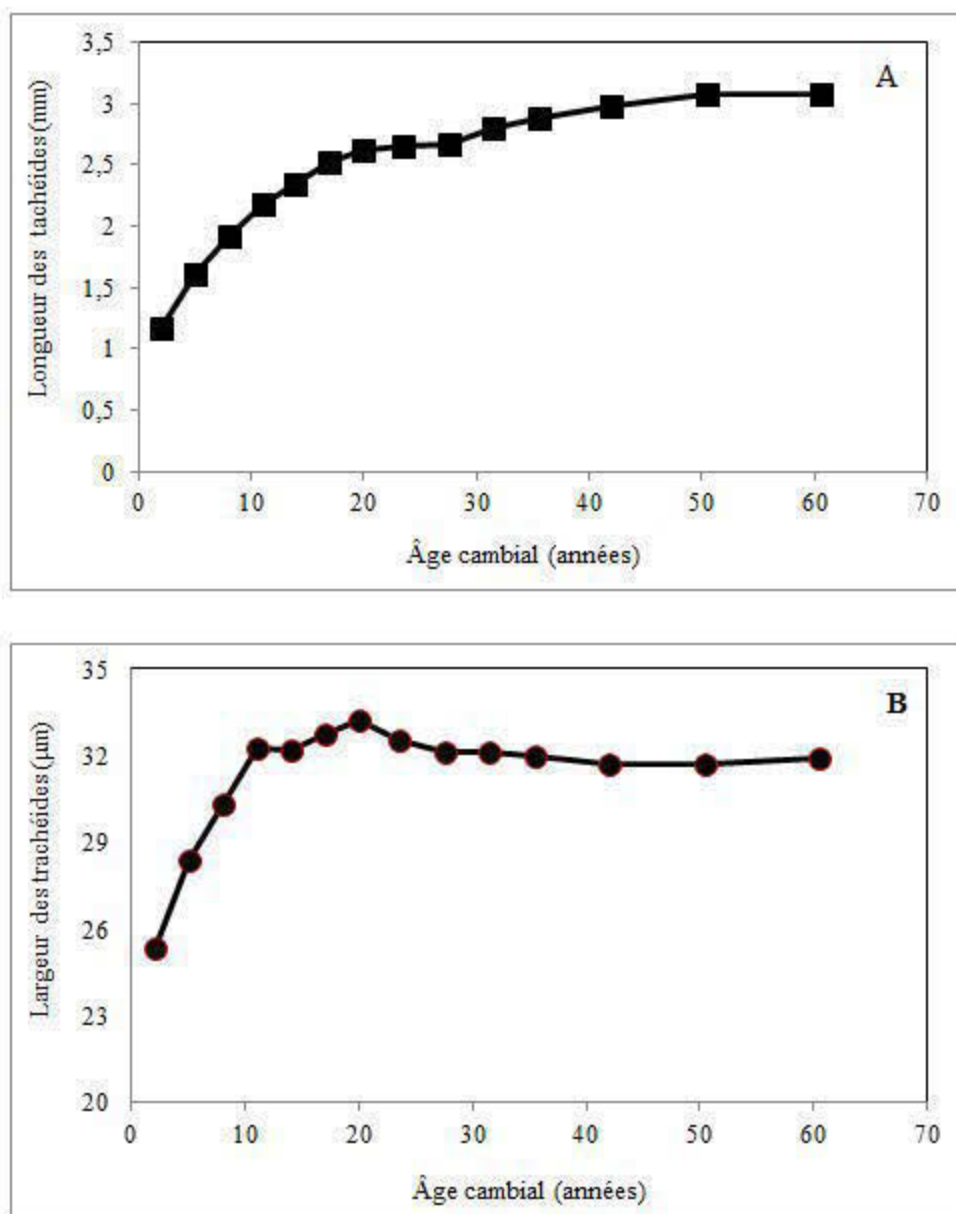


Figure 3.5 Profil de variation radiale de la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides du bois de l'épinette noire au niveau du DHP

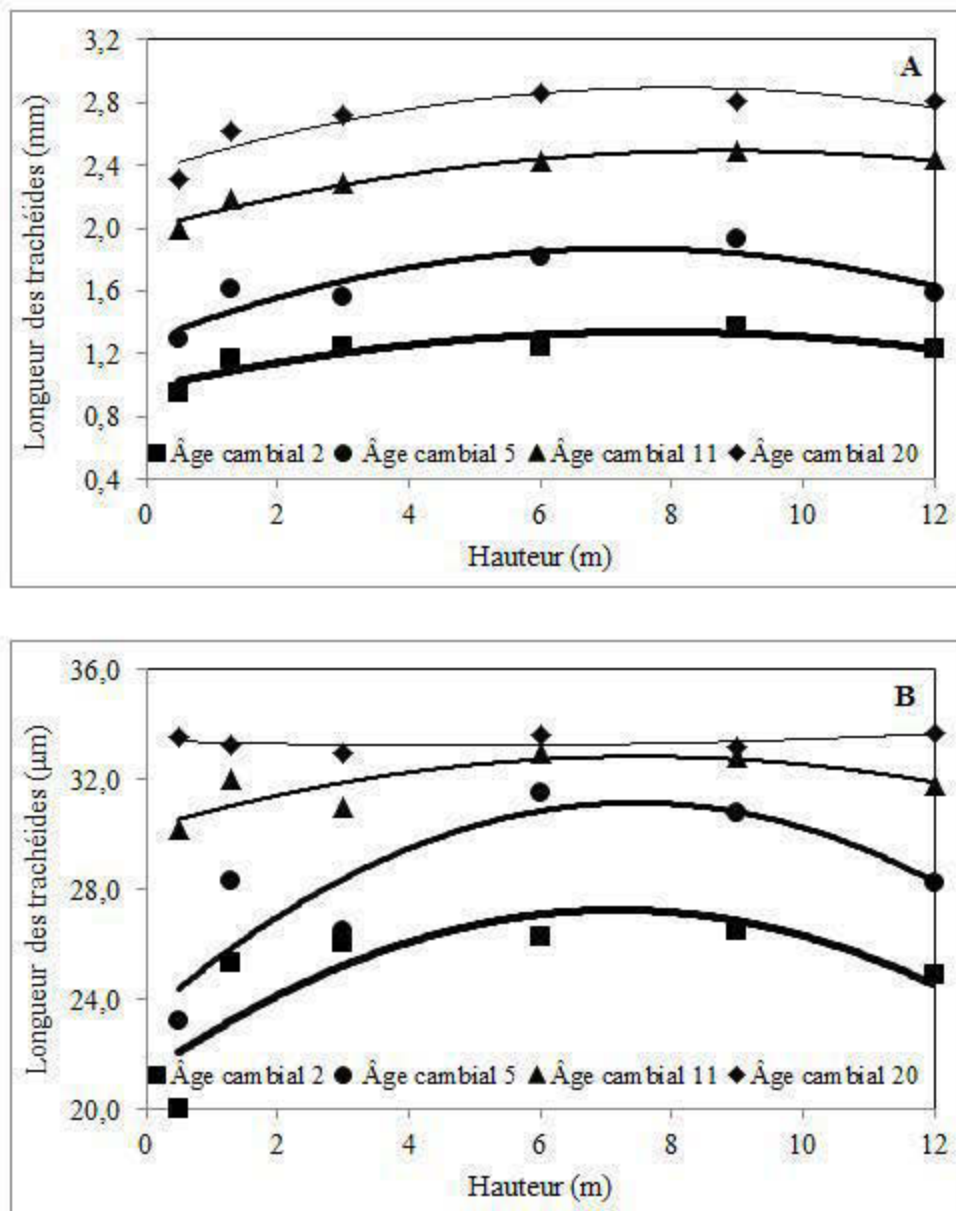


Figure 3.6 Profil de variation longitudinale de la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides du bois de l'épinette noire

À n'importe quel âge cambial, la longueur des trachéides augmente légèrement selon la hauteur dans l'arbre pour atteindre une valeur maximale vers la mi-hauteur de l'arbre (Figure 3.6A). La même tendance est observée pour la largeur des trachéides de la base de la

tige vers la mi-hauteur. De la mi-hauteur vers le sommet de l'arbre, on observe une légère tendance à la diminution de la largeur des trachéides (Figure 3.6B). Des patrons de variation longitudinale de la longueur et de la largeur des trachéides ont été rapportés par Kasraoui (2011) pour le pin gris. Les mêmes tendances ont été aussi observées chez l'épinette de Norvège (Molteberg et Hoibo 2006).

3.3. Effets de l'éclaircie commerciale sur les propriétés du bois

Dans cette section, nous présentons et discutons les résultats des analyses de variance concernant les effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale et sur la masse volumique du bois (Tableau 3.3) et sur les longueurs et les largeurs des trachéides du bois initial et du bois final (Tableau 3.4). L'étude de la variation intra-arbre a révélé des variations importantes des propriétés du bois à l'intérieur des arbres, particulièrement en termes de variation radiale. Les variations longitudinales sont en général moins importantes que les variations radiales quoique les tendances de variation soient claires pour la plupart des propriétés examinées. D'autre part, la plupart des propriétés varient peu dans le bois mature. Dans les trois peuplements étudiés, les traitements d'éclaircie sont appliqués à un âge avancé, donc dans le bois mature. Ce bois est caractérisé par de faibles variations intra-arbre ce qui permet de détecter facilement toute variation due aux pratiques sylvicoles dans les peuplements étudiés.

Les effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance (Figure 3.7), la masse volumique (Figure 3.8) et la morphologie des fibres (Figure 3.9) pour les sites étudiés au niveau de la hauteur de poitrine sont illustrés. On illustre les variations de la largeur des cernes (Figure 3.7A), du bois initial (Figure 3.7B) et du bois final (Figure 3.7C), de la masse volumique du cerne (Figure 3.8A), du bois initial (Figure 3.8B) et du bois final (Figure 3.8C). La figure 3.9 montre les variations de la longueur des trachéides du bois initial (Figure 3.9A), du bois final (Figure 3.9B) et de la largeur des trachéides du bois initial (Figure 3.9C) et du bois final (Figure 3.9D).

Tableau 3.3 Résultats des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de la hauteur, de l'éclaircie commerciale, du temps et de la surface terrière sur la largeur et la masse volumique des cerne et de leurs composants

Source de variation	Largeur du			Proportion du	Masse volumique du		
	cerne	bois initial	bois final	bois final	cerne	bois initial	bois final
Test des effets fixes (valeur de F)							
Constante	681,3**	569,4**	440,5**	591,4**	229,6**	158,5**	653,7**
Site(S)	0,3ns	0,5ns	0,3ns	0,7ns	1,8ns	1,1ns	0,5ns
Hauteur(H)	3,2**	2,6**	5,3**	2,4*	7,7**	6,3**	6,8**
Temps (T)	12,2**	11,1**	4,7**	5,4**	33,0**	25,8**	7,3**
Éclaircie (E)	0,07ns	0,7ns	0,1ns	0,9ns	2,8ns	1,1ns	2,3ns
Surface terrière (ST)	5,3**	5,5**	0,9ns	3,0**	0,3ns	0,0ns	1,6ns
S*H	2,3**	2,1**	1,7*	2,4**	2,9**	3,3**	6,0**
S*E	0,9ns	0,9ns	0,9ns	0,3ns	1,0ns	0,9ns	1,6ns
T*E	3,3**	3,5**	0,6ns	2,9**	1,9*	1,2ns	0,5ns
H*E	3,1**	3,2**	3,4**	2,6**	1,8*	1,9*	2,0**
Estimations des paramètres de covariance (Valeur Z de Wald)							
Résidu	29,6**	27,9**	28,1**	28,0**	29,6**	28,0**	27,9**
Arbre	0,9ns	0,9ns	0,0ns	0,5ns	0,6ns	0,7ns	1,0ns

Tableau 3.4 Résultats des analyses de variance des effets du site, de l'éclaircie commerciale, du temps et de la surface terrière sur la longueur et la largeur des trachéides du bois initial et du bois final de l'épinette noire.

Source de variation	Longueur des trachéides du		Largeur des trachéides du	
	bois initial	bois final	bois initial	bois final
Tests des effets fixes (Valeur de F)				
Constante	37,4**	99,2**	18,9**	30,2**
Temps (T)	7,5**	5,3**	0,7ns	1,1ns
Site (S)	1,4ns	2,1ns	0,4ns	1,3ns
Éclaircie (E)	1,1ns	2,3ns	1,7ns	0,4ns
Surface terrière (ST)	1,0ns	1,7ns	0,4ns	2,6ns
E*T	1,5ns	0,6ns	0,6ns	0,9ns
S*E	0,4ns	1,6ns	0,8ns	2,0ns
Estimation des paramètres de covariance (Valeur Z de Wald)				
Résidu	10,6**	10,3	10,7**	10,4**
Arbre	0,3 n.s.	0,9n.s.	0,1n.s.	0,6n.s.

3.3.1 Effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale

L'analyse de variance (Tableau 3.3) révèle que l'effet du site sur la croissance radiale n'est pas significatif. Ce résultat s'explique par les similitudes des conditions de croissance dans les sites de l'étude et l'âge des peuplements. L'âge des peuplements d'épinette noire à l'étude était entre 93 et 95 ans, l'indice du site entre 15,4 et 17,0 m et la surface terrière initiale variait de 34,8 à 41,8 m² ha⁻¹ (Tableau 2.1). Cependant, ce résultat devra être interprété avec prudence compte tenu du nombre limité d'arbres à l'étude. L'effet aléatoire de l'arbre sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final n'est pas significatif. Ce résultat pourra s'expliquer en partie par la similitude des conditions de croissance à l'intérieur et entre les sites à l'étude.

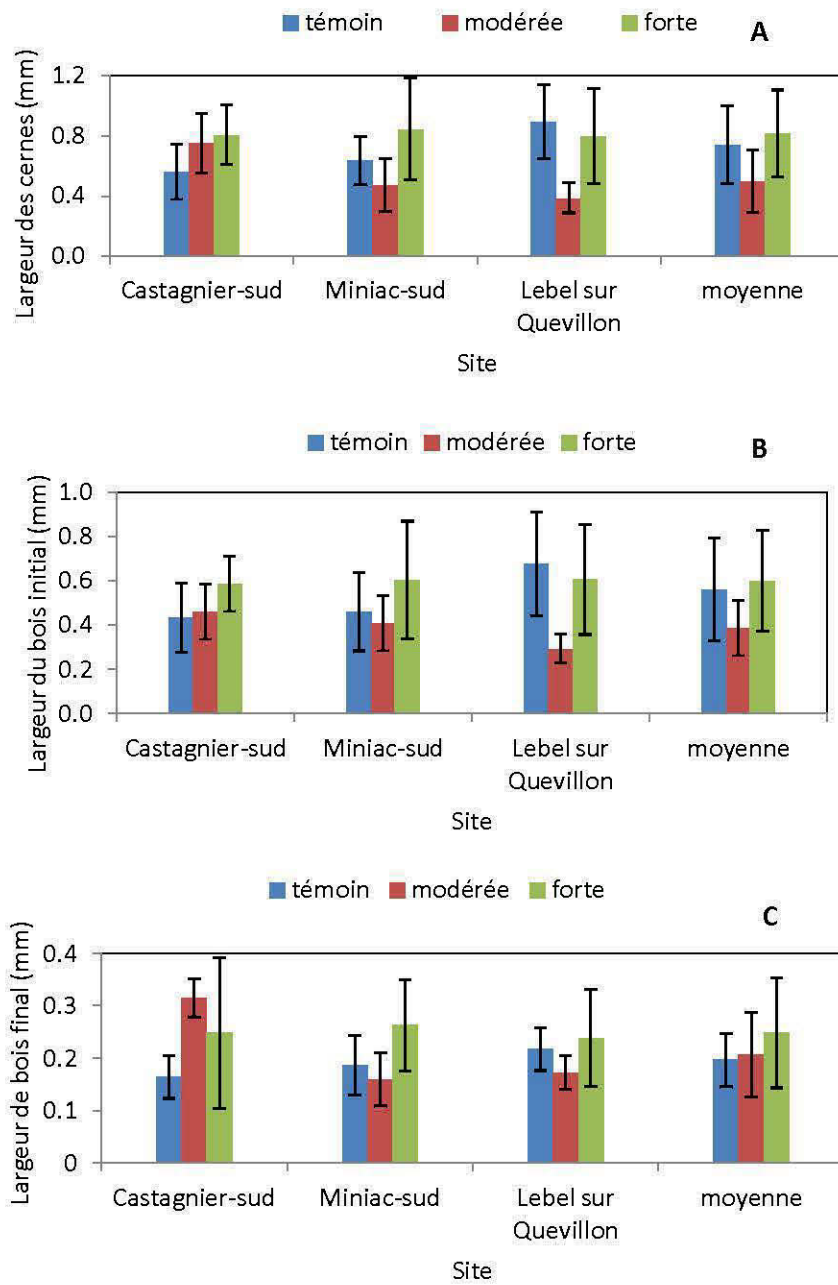


Figure 3.7 Variations de la largeur : A) des cernes ; B) du bois initial et C) du bois final chez l'épinette noire avec les traitements d'éclaircie commerciale dans trois sites en Abitibi.

La hauteur quant à elle, a un effet hautement significatif sur la largeur du cerne, du bois initial et du bois final (Tableau 3.3). Ce résultat est attendu tel que le montrent les variations de la largeur du cerne, du bois initial et du bois final avec la hauteur (Figure 3.2). Ce résultat concorde avec celui de Jaakkola et al (2007) qui ont constaté un effet hautement significatif de la hauteur sur la largeur des cernes de l'épinette de Norvège et leurs composants. De plus, on retient de l'étude d'Alteyrac (2005) sur les tiges d'épinette noire, que la hauteur dans l'arbre a un effet important sur les caractéristiques du bois d'épinette noire.

L'effet du temps sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final est hautement significatif. Cet effet s'explique par les variations dues aux conditions environnementales (précipitations, températures) et physiologiques (âge cambial). Dang et Lieffers (1989) rapportent que la largeur des cernes dépend fortement des conditions climatiques chez l'épinette noire. Des résultats similaires ont été rapportés pour le pin gris de plantation (Savva et al 2007, 2008) ou les variations des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final avec les années de croissance ont été expliquées par les variations climatiques.

L'effet de l'éclaircie en facteur principal (E) sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final est non significatif (Tableau 3.3). Cependant, certaines interactions entre ce facteur et d'autres facteurs à l'étude sont significatives, indiquant une non constance de la réponse de la croissance aux traitements d'éclaircie. L'effet de la surface terrière, utilisée comme co-variable dans le modèle, est significatif sur les largeurs du cerne et du bois initial. Par contre, l'effet de cette co-variable sur le bois final est non significatif.

L'interaction site-éclaircie n'est pas significative. Ainsi, l'effet de l'éclaircie est le même dans les trois sites. Les illustrations à la figure 3.7 indiquent que pour les trois sites, il existe des tendances à l'augmentation des largeurs des cernes suite aux traitements d'éclaircie. Par contre, cette tendance n'est pas constante selon l'intensité, ce qui pourrait

expliquer en partie la non signification du facteur principal éclaircie (E) sur la largeur des cerne.

L'effet de l'interaction temps x éclaircie (T×E) sur les largeurs du cerne et du bois initial est hautement significatif (Tableau 3.3). Cet effet s'explique par le fait que l'effet de l'éclaircie varie d'une année à l'autre après le traitement. Ce résultat concorde avec celui de Vincent (2010) pour l'épinette noire et de Jaakkola et al (2007) pour l'épinette de Norvège. De la même façon, l'interaction éclaircie x hauteur (E×H) est significative pour la largeur des cerne, du bois initial et du bois final. Cette interaction indique que l'effet de l'éclaircie sur la croissance varie d'une hauteur à une autre. Ce résultat pourra s'expliquer par le fait que l'effet de l'éclaircie n'est pas le même dans le bois mature ou dans le bois juvénile.

3.3.2 Effets de l'éclaircie commerciale sur la masse volumique

Les résultats de l'analyse de variance sur les effets des facteurs étudiés sur la masse volumique du cerne et ses composants sont résumés dans le Tableau 3.3. Ces résultats indiquent des effets hautement significatifs du temps, de la hauteur, ainsi que de l'interaction entre le site et la hauteur. L'effet de l'arbre n'est pas significatif sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final.

L'analyse de variance montre que l'effet du site sur la masse volumique n'est pas significatif (Tableau 3.3). Ce résultat s'explique par les similitudes des conditions de croissance dans les sites de l'étude et l'âge des peuplements.

L'effet de la hauteur sur les masses volumiques du cerne et du bois initial et final est hautement significatif. Ce résultat concorde avec celui de Jaakkola et al (2006) qui ont souligné que la hauteur a un effet significatif sur la masse volumique du cerne et ces composants.

La masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final varie fortement avec le temps. Ceci est dû aux variations environnementales (précipitations, températures) et physiologiques (âge cambial). Des résultats similaires ont été rapportés par Savva et al (2010) chez le pin gris. Ils ont constaté que les variations de la masse volumique du cerne et ces composants sont liées aux variations des conditions climatiques.

D'autre part, l'effet de l'éclaircie sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final n'est pas significatif. Les illustrations à la figure 3.8 montrent que la masse volumique des arbres issus du site Castagnier sud et Lebel sur Quévillon ne montrent aucune différence suite à l'éclaircie. Pour Miniac sud, on remarque que la masse volumique diminue légèrement avec l'éclaircie mais cette diminution est non significative. Ce résultat est en accord avec les résultats observés par Jaakkola et al (2005a) qui n'ont constaté aucun effet significatif négatif de l'éclaircie sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final du bois de l'épinette de Norvège dans deux sites en Finlande.

Ces résultats montrent que l'éclaircie n'entraîne pas de variations significatives sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final. Par conséquent, nous considérons que l'effet de l'éclaircie n'a pas d'implications pratiques sur la masse volumique du bois de l'épinette noire, le principal indicateur de la qualité du bois.

La surface terrière, utilisée comme co-variable dans le modèle, n'a pas montré d'effets significatifs sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final (Tableau 3.3). Parmi les explications plausibles à ce résultat, il y a la similitude des surfaces terrières entre les trois sites de l'étude. En effet, la surface terrière initiale variait de 34,8 à 38,9 m²/ha (Tableau 2.1).

L'effet de l'interaction « site x éclaircie » (S×E) sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final n'est pas significatif. Ce résultat s'explique par le fait que dans les trois sites à l'étude, l'effet de l'éclaircie n'est pas statistiquement significatif.

L'effet de l'interaction « site x temps » (S×T) sur la masse volumique du cerne est significatif. Par contre, l'effet de cette interaction sur les masses volumiques du cerne et du

bois initial n'est pas significatif. Finalement, l'effet de l'interaction « hauteur-éclaircie » (HxE) sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final est significatif. Cette interaction indique que l'effet de l'éclaircie varie d'une hauteur à une autre. Ce résultat pourra s'expliquer par le fait que l'effet de l'éclaircie n'est pas le même qu'on soit dans le bois mature (bas de l'arbre) ou dans le bois juvénile (haut de l'arbre).

3.3.3 Effets de l'éclaircie commerciale sur la morphologie des trachéides :

Les analyses de variance (Tableau 3.4) montrent que le seul effet statistiquement significatif est celui du temps sur la longueur des trachéides. Ce résultat montre que la longueur des fibres varie avec la variation des conditions climatiques. Pour les autres facteurs à savoir le site, l'éclaircie et les leurs interactions, aucune variation significative sur la longueur et la largeur des trachéides du bois de l'épinette noire de cette étude n'a été rapportée. Pourtant, les conditions relatives au milieu et les traitements sylvicoles sont reconnus pour modifier ces propriétés et influencer la production du bois final.

Ces résultats permettent de faire un parallèle avec les résultats rapportés dans la littérature. En effet, Jaakkola et al (2005b) ont conclu que les éclaircies commerciales pratiquées en Finlande ont un effet faible ou négligeable sur les dimensions des trachéides de l'épinette de Norvège issus de peuplements âgés de 86 ans. Jyske et al (2008) mentionnent que les traitements d'éclaircie n'ont aucun impact sur les propriétés de la fibre du bois d'épinette de Norvège. Les mêmes tendances ont été rapportées par Kasraoui (2011) chez le pin gris. Par contre, Yang et Hazenberg (1994), qui ont traité l'effet de l'espacement initial sur la longueur des trachéides de l'épinette noire issues de plantation en Ontario, montrent que les trachéides étaient plus courtes dans les espacements larges. Ils ont constaté aussi que la longueur des trachéides en plantation est inférieure à celles des tiges issues de peuplements naturels. De plus, les illustrations à la figure 3.9 indiquent très peu de différences entre la longueur et la largeur des trachéides du bois de l'épinette noire. Cela peut nous permet d'affirmer que l'effet de l'éclaircie n'a pas d'implications pratiques sur la morphologie des trachéides du bois d'épinette noire.

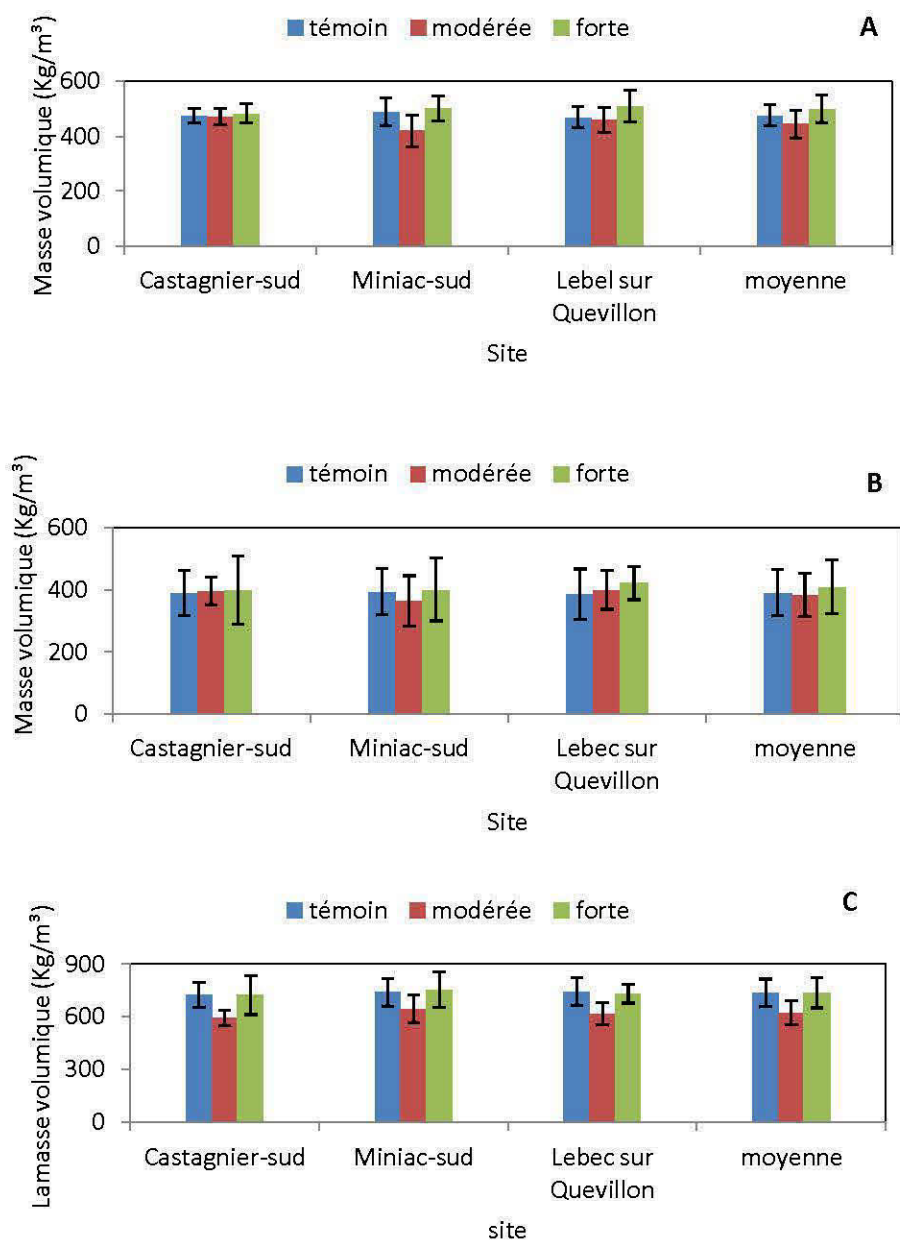


Figure 3.8 Variations de : A) la masse volumique des cernes ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciales dans trois sites en Abitibi.

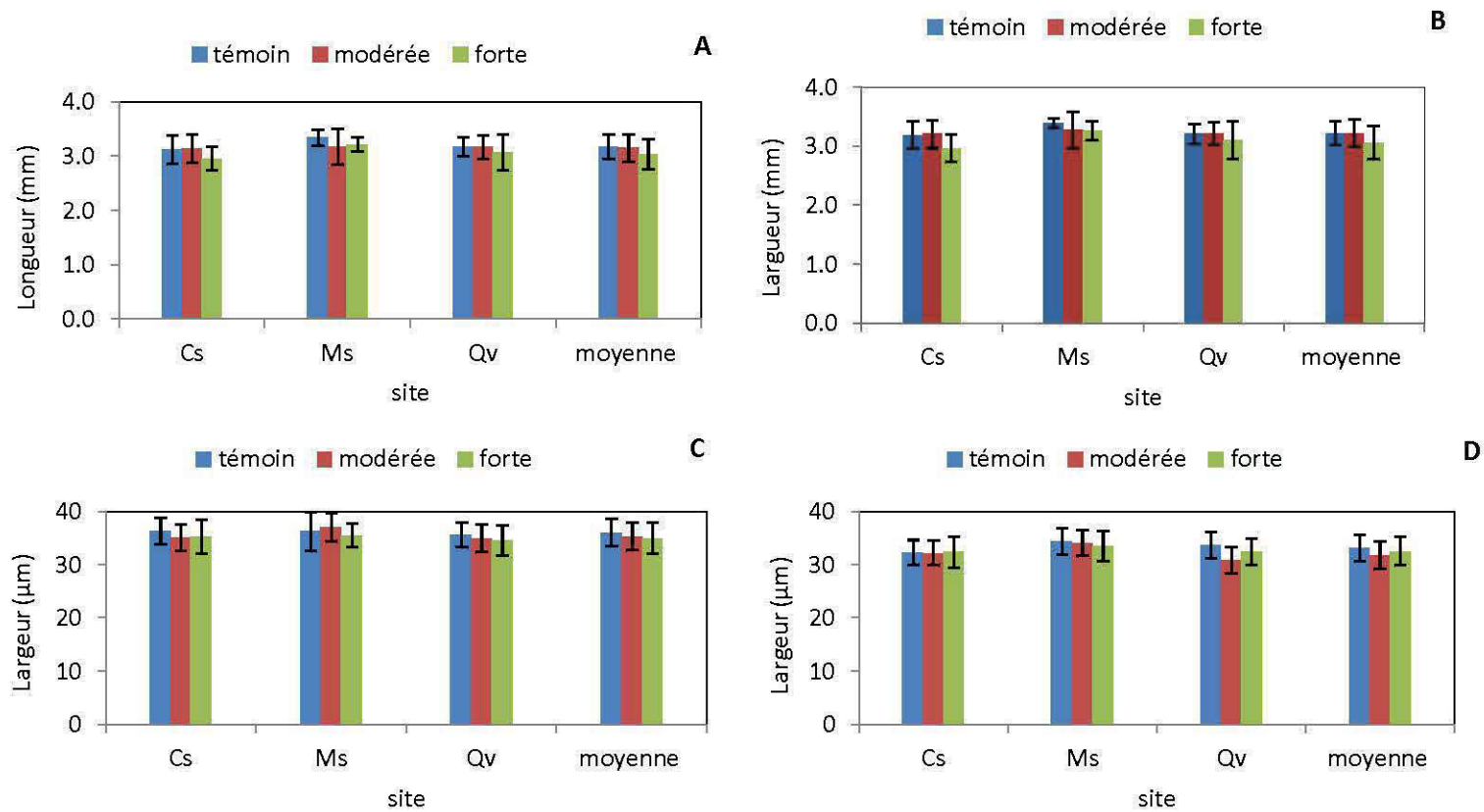


Figure 3.9 Variations de la longueur (A, B) et du diamètre (C, D) du bois initial et du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale dans trois sites en Abitibi (Cs : Castagnier-sud; Ms : Miniac-sud et Qv : Lebel sur Quévllion).

3.4 Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur les propriétés du bois

Les résultats de l'analyse de variance sur les effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance radiale, sur la masse volumique du bois et sur les longueurs et les largeurs des trachéides du bois initial et du bois final sont résumés respectivement aux tableaux 3.5 et 3.6. De la même façon, les effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance radiale, les masses volumiques et la morphologie des trachéides sont illustrés respectivement dans les figures 3.10, 3.11 et 3.12. On illustre les variations de la largeur des cernes, du bois initial et final (Figure 3.10), de la masse volumique du cerne, du bois initial et final (Figure 3.11) ainsi que la longueur et la largeur des trachéides du bois initial et du bois final (Figure 3.12).

3.4.1. Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance radiale

Les résultats des analyses de variance (Tableau 3.5) indiquent des effets hautement significatifs des facteurs hauteur, du temps par rapport à l'année d'application du traitement, de la surface terrière (ST) en co-variable, ainsi que les interactions « site hauteur » (SxH), temps éclaircie (TxE), site éclaircie fertilisation (SxE), « hauteur x fertilisation » et l'interaction triple « site x éclaircie x fertilisation » (SxExF).

Les effets hautement significatifs de la hauteur et du temps sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final confirment les résultats décrits dans la section (3.3.1). De la même façon, l'effet significatif des interactions TxE et HxE supportent les résultats discutés dans la section précédente. Cependant, aucun effet de l'interaction de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation n'est ressorti de l'analyse de variance des deux traitements combinés sur la largeur moyenne des cernes, largeur du bois initial et largeur du bois final (Tableau 3.5).

Tableau 3.5 Synthèse des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de la hauteur, de l'éclaircie commerciale, de la fertilisation, du temps et de la densité initiale du peuplement sur la largeur et la masse volumique des cernes et de leurs composants

Source	Largeur du		Proportion		Masse volumique du		
	Cerne	Bois initial	Bois final	bois final	cerne	bois initial	bois final
Test des effets fixes (valeur de F)							
Constante	1098,5**	1126,1**	881,4**	1316,6**	429,7**	316,3**	1102,6**
Site	0,2ns	0,2ns	0,2ns	0,05ns	1,2ns	1,7ns	1,2ns
Hauteur (H)	11,1**	12,1**	4,9**	6,9**	42,7**	36,6**	11,0**
Temps (T)	6,1**	3,9**	7,8**	3,0**	10,1**	6,7**	6,8**
Éclaircie(E)	0,5ns	0,3ns	0,5ns	0,3ns	1,6ns	2,9ns	1,0ns
Fertilisation (F)	2,0ns	1,9ns	0,0ns	0,4ns	18,0**	19,4**	9,6**
Surface terrière (ST)	7,2**	12,7**	0,8ns	3,1ns	0,1ns	0,1ns	2,5ns
S*H	2,0*	2,1**	2,6**	2,7**	1,3ns	1,8*	5,7**
S*F	1,4ns	0,6ns	3,2*	3,1*	0,2ns	0,7ns	1,5ns
S*E	0,6ns	0,7ns	0,2ns	7,1**	0,1ns	0,2ns	0,7ns
T*E	4,4**	4,6**	1,6ns	2,9**	2,8**	2,7**	0,5ns
H*E	3,1**	3,7**	2,4**	4,0**	2,6**	2,1**	3,7**
H*F	2,7*	3,6**	1,0ns	3,4**	0,9ns	1,3ns	3,8**
E*F	0,1ns	0,1ns	0,9ns	0,5ns	4,6*	5,4**	1,4ns
S*E*F	8,7**	7,9**	4,7**	3,9**	4,6**	2,0ns	5,0**
Estimations des paramètres de covariance (Valeur Z de Wald)							
Résidu	14**	14,1**	13,9**	13,9**	14**	14,1**	13,9**
Arbre	1,1ns	0,9ns	1,2ns	1,2ns	0,9ns	0,8ns	1,2ns

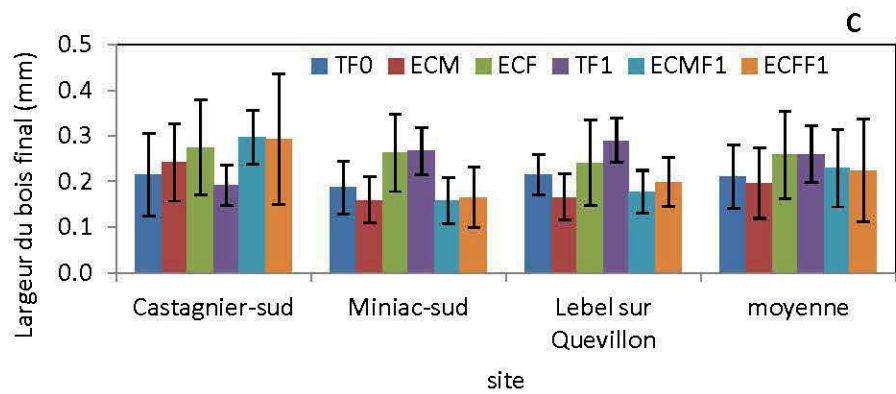
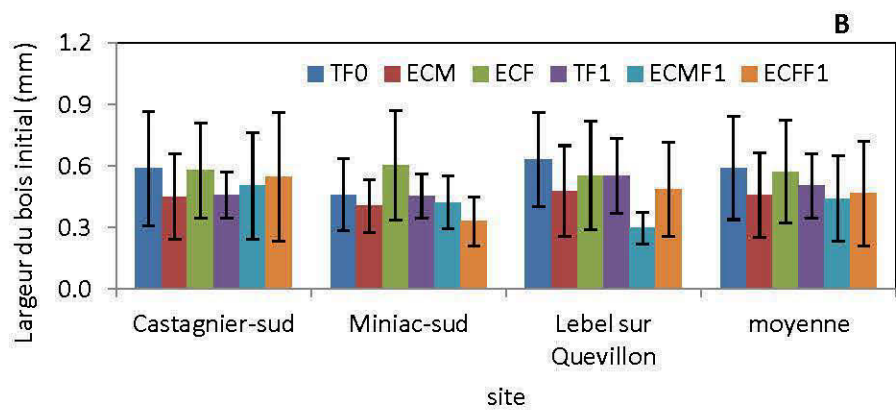
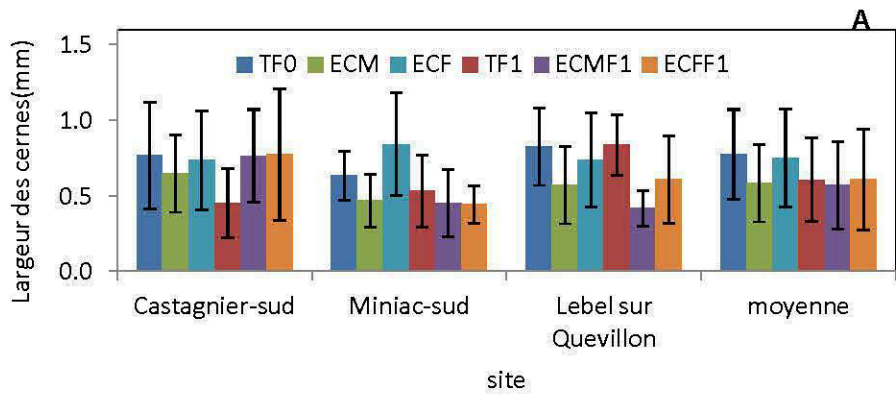


Figure 3.10 Variations de la largeur A) du cerne ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie de fertilisation dans trois sites en Abitibi.⁴

3.4.2. Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la masse volumique

Les résultats des analyses de variance des effets combinés de l'éclaircie et de la fertilisation sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final sont présentés au (Tableau 3.5). On constate que ces propriétés varient significativement en fonction de la hauteur dans l'arbre, le temps par rapport à l'année des traitements et de la fertilisation. Les effets hautement significatifs de la hauteur et du temps sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final concordent avec les résultats dans la section (3.3.2). Le site et l'éclaircie commerciale n'ont pas d'impact sur ces propriétés.

L'effet du temps sur la masse volumique de cerne et ces composants est hautement significatif. Cet effet s'explique par les variations dues aux conditions environnementales (précipitations, températures) et physiologiques (âge cambial). Savva et al. 2010 constatent que les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final dépendent fortement des conditions climatiques chez le pin gris de plantation.

L'effet de l'éclaircie commerciale sur les masses volumiques du cerne et du bois initial n'est pas significatif (Tableau 3.5). Ainsi, l'effet de l'éclaircie est le même dans les trois sites de l'étude. Les illustrations à la figure 3.11 indiquent très peu de différences entre les masses volumiques.

L'analyse de variance a révélé un effet significatif de la fertilisation sur la masse volumique du cerne (Tableau 3.5). Ces résultats permettent de faire un parallèle avec les résultats rapportés dans la littérature. Jaakkula et al (2006), ont remarqué que la masse volumique moyenne des cernes a diminué suite à l'application de la fertilisation. Aussi,

⁴ Légende : (TF0 : Témoin non fertilisé; TF1 : Témoin fertilisé; ECM : Éclaircie commerciale modérée; ECF : Éclaircie commerciale forte; ECMF1 : Éclaircie commerciale modérée et fertilisation; Éclaircie commerciale forte et fertilisation).

Mäkinen et al. (2002a) ont rapporté une réduction de la masse volumique du bois dans un jeune peuplement (24 ans) d'épinette de Norvège (Lundgren 2004). De plus, la fertilisation a un effet significatif sur la masse volumique du bois initial et du bois final (Tableau 3.5) tandis que l'interaction site x fertilisation est non significative. Ainsi, l'effet de la fertilisation est le même dans les 3 sites. (Figure 3.11B, C).

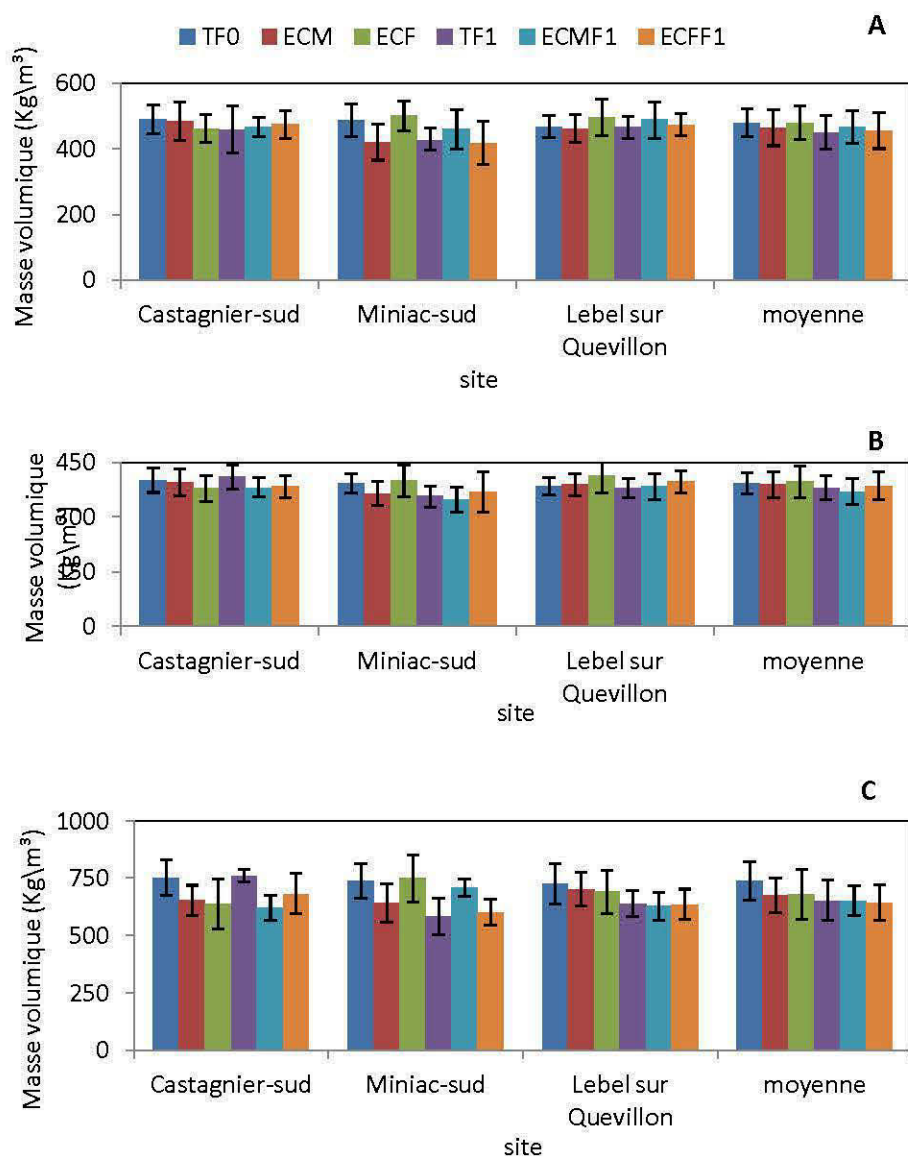


Figure 3.11 Variations de la masse volumique: A) du cerne ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale et de fertilisation dans trois sites.⁵

Les effets de la surface terrière initiale et de l'arbre (effet aléatoire) sur la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final ne sont pas significatifs (Tableau 3.5). Ces résultats concordent avec les résultats présentés au Tableau 3.5.

3.4.3. Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la morphologie des trachéides

Les résultats des analyses de variance des effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la longueur et la largeur des trachéides sont résumés dans le (Tableau 3.6). Ces résultats indiquent que le temps est le seul facteur montrant un effet significatif sur la longueur des trachéides. Aucune différence significative n'est ressortie des autres facteurs principaux sur la morphologie des trachéides.

L'interaction éclaircie fertilisation pour la longueur des trachéides du bois initial est significative. Ce résultat suggère que l'effet du traitement de fertilisation varie d'une intensité d'éclaircie à une autre. En effet, un examen attentif de la figure 3.12A indique que dans les trois sites, la longueur moyenne des trachéides suite à l'éclaircie modérée est plus faible que celle suite à l'éclaircie forte. Par ailleurs, l'interaction triple SxExF pour la longueur des trachéides du bois final est significative. Ce résultat suggère que l'effet du traitement de fertilisation varie selon le site et l'intensité d'éclaircie. Un examen attentif de la figure 3.12B indique que l'effet des traitements dans le site Miniac-Sud diffère légèrement des autres sites.

⁵ Légende : TF0 : Témoin non fertilisé; TF1 : Témoin fertilisé; ECM : Éclaircie commerciale modérée; ECF : Éclaircie commerciale forte; ECMF1 : Éclaircie commerciale modérée et fertilisation; Éclaircie commerciale forte et fertilisation.

Les faibles variations de la longueur des trachéides avec les traitements d'éclaircie et de fertilisation concordent avec les résultats rapportés pour Jyske (2008) chez l'épinette de Norvège. Ce dernier rapporte que les différences de la longueur des trachéides après l'application à long terme des traitements d'éclaircie commerciale et de la fertilisation sont très faibles et statistiquement non significatives.

L'analyse de variance n'indique aucun effet significatif des traitements sur la largeur des trachéides. L'examen des illustrations à la figure 3.12 C et D ne montre pas de variations notables dans la largeur des trachéides.

Tableau 3.6 Synthèse des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de l'éclaircie commerciale, de la fertilisation, du temps et de la densité du peuplement sur la longueur et la largeur du bois initial et du bois final des trachéides de l'épinette noire à hauteur de poitrine (1,30m)

Source	Longueur		Largeur	
	Bois initial	Bois final	Bois initial	Bois final
Test des effets fixes (valeur de F)				
Constante	150,6**	265,7**	26,5**	56,6**
Site (S)	4,2ns	1,5ns	1,9 ^{ns}	2,6 ^{ns}
Temps	6,2**	3,9**	1,2 ^{ns}	0,5 ^{ns}
Éclaircie (E)	0,4 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1,7 ^{ns}	0,6 ^{ns}
Fertilisation (F)	0,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}
Surface terrière	4,2*	3,7**	0,2 ^{ns}	6,6**
SxE	2,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,4 ^{ns}
SxF	0,8 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,1 ^{ns}
ExF	3,9*	2,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,5 ^{ns}
SxExF	1,0 ^{ns}	2,7**	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}
Estimations des paramètres de covariance (Valeur Z de Wald)				
	4,8**	4,9**	4,9**	4,8**
	1,2ns	1,0ns	1,0ns	1,2ns

En résumé, les résultats trouvés dans cette étude suggèrent que les traitements d'éclaircie et de fertilisation sont sans implications pratiques sur les propriétés morphologiques des trachéides comparativement aux variations radiales et longitudinales de ces propriétés. En effet, les illustrations de la figure 3.12 montrent des variations très faibles de l'ordre du dixième de millimètre pour la longueur et de microns pour la largeur contrairement aux variations radiales (Figure 3.5) et longitudinales (Figure 3.6).

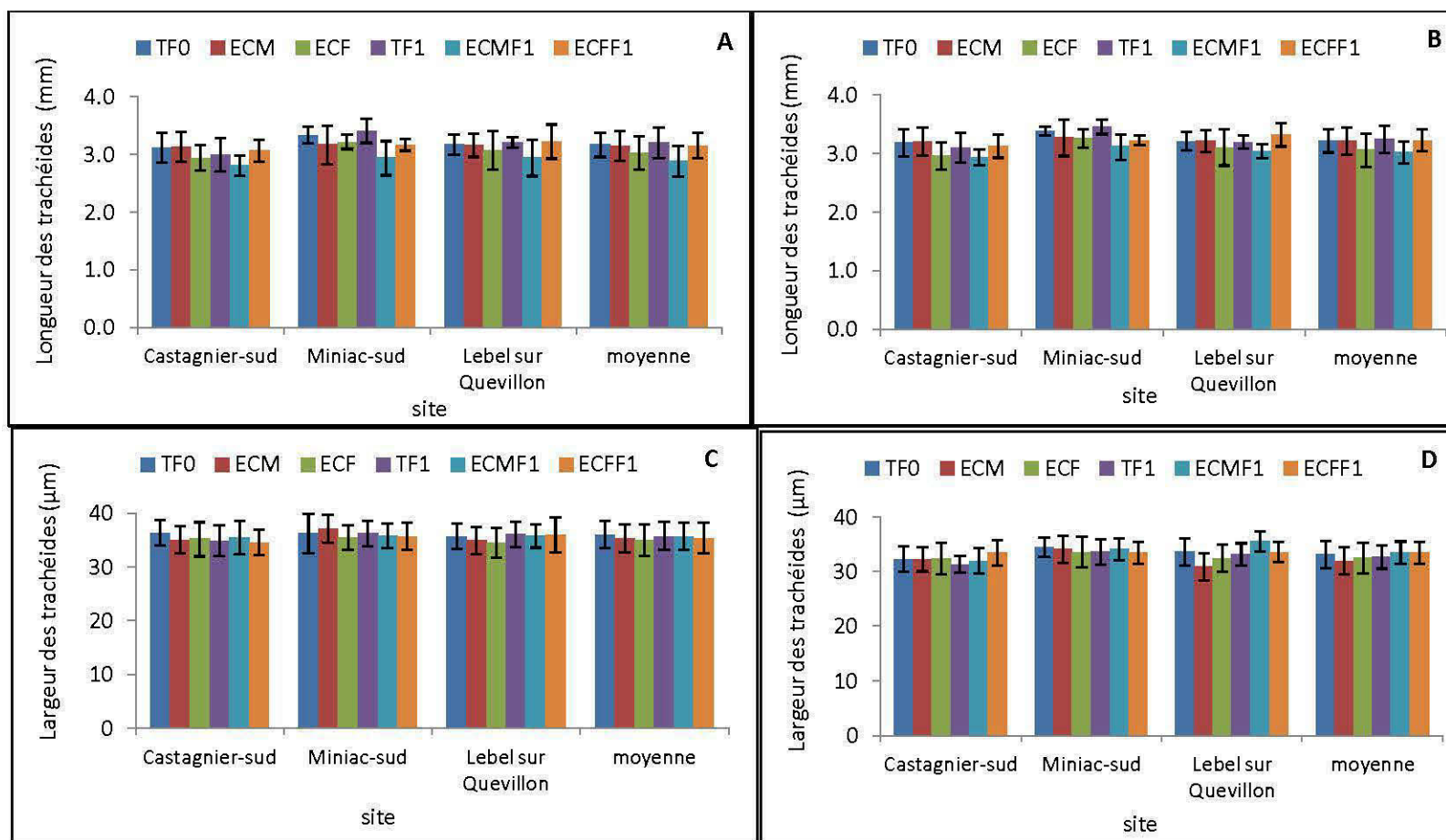


Figure 3.12 Variations de la longueur (A, B) et de la largeur des trachéides (C, D) du bois initial et du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale et de fertilisation dans trois sites.⁶

⁶ Légende : TF0 : Témoin non fertilisé; TF1 : Témoin fertilisé; ECM : Éclaircie commerciale modérée; ECF : Éclaircie commerciale forte; ECMF1 : Éclaircie commerciale modérée et fertilisation; ECFF1 : Éclaircie commerciale forte et fertilisation.

CONCLUSION

Ce travail avait comme objectif d'étudier la variabilité intra-arbres et intra-cernes des composantes de la largeur des cernes, de la masse volumique et de la longueur des trachéides chez l'épinette noire et d'évaluer l'effet des pratiques sylvicoles à savoir l'éclaircie commerciale et la fertilisation sur ces propriétés chez l'épinette noire. Ainsi, un échantillonnage de 59 arbres d'épinette noire issus de trois sites en Abitibi, nous a permis d'atteindre cet objectif.

L'étude a permis de vérifier l'hypothèse qui stipule que les variations intra-arbres sont plus importantes dans le bois juvénile que dans le bois mature. L'analyse des patrons de variation des attributs de la qualité du bois chez l'épinette noire a permis de tirer les conclusions suivantes:

- Pour la croissance radiale, on constate une diminution importante de la largeur moyenne du cerne dans les premières années de croissance, ce qui caractérise la phase juvénile jusqu'à la zone de transition bois juvénile bois mature. Dans le bois mature, on note une diminution moins accentuée pour atteindre un plateau vers l'écorce. Le profil radial de la largeur du bois initial est similaire à celui de la largeur moyenne des cernes. Pour le bois final, le patron de variation radiale est caractérisé par une faible diminution de la moelle vers l'écorce.
- À un même âge cambial, les largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final tendent à diminuer avec l'augmentation de la hauteur dans l'arbre. La largeur du bois final est presque constante tout au long de la hauteur dans l'arbre.
- La variation radiale de la masse volumique du cerne et du bois initial chez l'épinette noire est typique de celle rapportée dans la littérature et se caractérise par une augmentation constante du bois juvénile vers le bois mature. Pour le bois final, la variation de la masse volumique est caractérisée par une augmentation dans le bois juvénile pour atteindre un plateau dans le bois mature.

- Les variations longitudinales des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont relativement faibles comparativement aux variations radiales tout en suivant un patron général de décroissance de la base vers l'apex. Des tendances opposées sont observées dans le bois juvénile et dans le bois mature. Dans le bois juvénile, les masses volumiques du cerne et du bois initial ont tendance à augmenter avec la hauteur de l'arbre. Par contre, dans le bois mature, elles tendent à diminuer avec la hauteur de l'arbre. Pour le bois final, la même tendance a été obtenue soit une augmentation initiale jusqu'à un maximum à la mi-hauteur suivi par une diminution avec une augmentation de la hauteur de l'arbre.
- La longueur des trachéides est courte dans la zone du bois juvénile, ensuite augmente graduellement pour atteindre un maximum dans le bois mature. Les trachéides sont étroites à proximité de la moelle, puis leur largeur augmente pour atteindre un palier entre les âges cambiaux de 10 et 20 ans suivi par une légère diminution suivi d'une constance dans le bois mature.
- À n'importe quel âge cambial, une légère augmentation de la longueur des trachéides a été observée selon la hauteur de l'arbre pour atteindre une valeur maximale vers la mi-hauteur de l'arbre. La même tendance est observée pour la largeur des trachéides de la base de la tige vers la mi-hauteur. De la mi-hauteur vers le sommet de l'arbre, on observe une légère tendance à la diminution de la largeur des trachéides.

Par ailleurs, seulement une partie de l'hypothèse qui stipule que l'éclaircie commerciale et la fertilisation augmentent la croissance radiale des tiges et le diamètre des trachéides, mais diminue la masse volumique du bois et la longueur des trachéides a pu être validée :

- L'effet de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale des cernes est significatif. Cependant, cet effet varie d'une année à l'autre après le traitement et entre les hauteurs dans l'arbre. De la même façon, l'effet de l'éclaircie sur la masse

volumique et ses composants varie selon l'année après le traitement et selon la hauteur dans l'arbre.

- Aucun effet significatif de l'éclaircie commerciale sur la longueur et la largeur des trachéides du bois initial et du bois final de l'épinette noire n'est apparu.
- L'effet de la fertilisation sur la croissance radiale des tiges est également significatif mais variable selon le temps après les traitements, la hauteur de l'arbre et l'intensité de l'éclaircie comme le montrent les interactions hautement significatives.
- La fertilisation montre aussi un effet significatif sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final. De la même façon, l'effet de la fertilisation varie selon l'année après les traitements et la hauteur des arbres.
- La fertilisation montre un effet significatif sur la longueur des trachéides du bois initial et du bois final de l'épinette noire. Cet effet varie selon le traitement d'éclaircie. Par contre, la fertilisation ne montre aucun effet sur la largeur des trachéides.

Finalement, l'hypothèse qui stipule que les variations intra-arbres de la largeur des cernes et propriétés du bois sont beaucoup plus importantes que celles dues aux traitements d'éclaircie et de fertilisation a été validée. Nous avons constaté que les variations radiales et longitudinales de la croissance et des propriétés du bois de l'épinette noire sont plus importantes que celles dues aux traitements d'éclaircie et de fertilisation appliquée à un âge avancé (bois mature). Ces variations sont beaucoup plus importantes dans la zone du bois juvénile que celle du bois mature.

Les faibles variations des attributs de la qualité du bois suites aux traitements d'éclaircie et de fertilisation suggèrent que dans des peuplements d'épinette noire matures, ces interventions n'ont pas d'implications pratiques sur la qualité du bois de cette essence.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albaugh, T.J., Allen, H.L., Dougherty, P.M. et Johnsen, K.H. 2004. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource. *For. Ecol. Man* 192: 3-19.
- Alteyrac, J. 2005. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Thèse de doctorat en sciences du bois. Université Laval. 108p.
- Alteyrac, J., Cloutier, A. et Zhang, S.Y. 2006. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights. *Wood Sci. Technol.* 40: 124-138.
- Antal, M. et Micko, M.M. 1994. Variation and field estimation of wood quality parameters for black spruce. *Holzforsch. Holzverw.* 4: 70-72.
- Aussenac, G., et Granier, A. 1982. Influence d'une éclaircie sur la croissance et le bilan hydrique d'un jeune peuplement de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) France). *Can. J. For. Res* 12:222-231.
- Aussenac, G., Granier, A. et Breda, N. 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Rev. For.* 1:54-62.
- Barbour, R..J., Marshall, D.D. et Lowell, E.C. 2003. Managing for wood quality. In: Monserud, et al eds. *Compatible For. Man.* 299-336.
- Barbour, R.J., Bailey, R.E. et Cook, J.A. 1992. Evaluation of relative density, diameter growth, and stem form in a red spruce (*Picea rubens*) stand 15 years after precommercial thinning. *Can. J. For. Res.* 22: 229-238.

- Barbour, R.J., Fayle, D.C.F., Chauret, G., Cook, J., Karsh, M.B. et Shikun, R. 1994. Breast-height density and radial growth in mature jack pine (*Pinus banksiana*) for 38 years after thinning. *Can. J. For. Res.* 24: 2439-2447.
- Barbour, R.J., Johnson, J. et Amundson, C. 1996. Modeling intraring x-ray density profiles. Proceedings, second workshop: Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, Berg-en-Dal, Kruger National Park, South Africa, August 26-31, 1996. 123-130; Workshop 1996 IUFRO S5.01-04- Topic 3.
- Blair, R. et Olson, J. 1984. Impact of forest management practices on wood quality. P. 261-269 in Proc. Symposium on utilization of the changing wood resource in the South. June 12-14, Sch. For. Res. North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Blanche, C.A., Lorio, P.L., Sommers, R.A., Hodges, J.D. et Nebeker, T.E. 1992. Seasonal cambial growth and development of loblolly pine: xylem formation, inner bark chemistry, resin ducts, and resin flow. *For. Ecol. Manage.* 49: 151-165.
- Blevins, D.P., Prescott, C.E., Allen, H.L. et Newsome, T.A. 2005. The effects of nutrition and density on growth, foliage biomass, and growth efficiency of high-density fire-origin lodgepole pine in central British Columbia.: *Can. J. For. Res.* 35: 2851-2859
- Bouriaud, O., Leban, J.-M., Bert, D. et Deleuze, C. 2005. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Phys.* 25(6): 651-660.
- Briggs, D.G. et Smith W.R. 1986. Effect of silvicultural practices on wood properties of conifers. A review. In Douglas fir: stand management for the future. Olivier, et al Eds. University of Washington Press. Seattle. pp 108-117.
- Brix, H. et Mitchell, A.K. 1980. Effects of thinning and nitrogen fertilization on xylem development in Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 10:121-128.
- Brockley, R.P. 2005. Effects of post-thinning density and repeated fertilization on the growth and development of young lodgepole pine. *Can. J. For. Res.* 35: 1952-1964.

- Brockley, R.P. 2007. Effects of 12 years of repeated fertilization on the foliar nutrition and growth of young lodgepole pine in the central interior of British Columbia. *Can. J. For. Res.* 37: 2115-2129.
- Burns, R.M. et Honkala, B.H. 1990. *Silvics of North America, Volume 1, Conifers*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook 654, Washington, DC.
- CEGFPQ. 2004. Rapport sur l'état de la situation de la gestion des forêts publiques du Québec. Rapport présenté au ministre des ressources naturelles, de la Faune et des parcs du Québec, Québec (QC). 307p
- Cloutier, A. 2005. Laboratoire d'anatomie du bois avancée SBO-66409. Documents de laboratoire, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Hiver 2005.
- Colombo, S.J., Parker, W., Luckai, N., Dang, Q. et Cai, T. 2005. The effect of forest management on carbon storagenin ontario's forests. Ontario Ministry of Natural Resources, Applied Research and Development. 126pp.
- Core, H.A., Cote, W.A. et Day, A.C. 1979. *Wood structure and identification*, Syracuse University Press, 182 p.
- Cown, D.J. 1973. Effect of severe thinning and pruning treatments on the intrinsic wood properties of young Radiata pine. *New Zealand J. For. Sci.* 3:379-389.
- Dang, Q., et Lieffers, V. 1989. Climate and annual ring growth of black spruce in some Alberta peatlands. *Can. J. Bot.* 67: 1885- 1889.
- Day, R.J. et Nanang, D.M. 1997. Principles of thinning for improved growth, yield and economic profitability of lodgepole and jack pine. pages. 1-12 in *Proceedings, Commercial Thinning Workshop*, Whitecourt, AB. 17-18, Oct. 1996.

- DeBell, D.S., Singleton, C., Harrington, C.A. et Gartner, B.L. 2002. Wood density and fiber length in young populus stems: Relation to clone, age, growth rate, and pruning. *Wood Fiber Sci.* 34: 529-539.
- DeBell, D.S., Singleton, R., Gartner, B.L. et Marshall, D.D. 2004. Wood density of young-growth western hemlock: relation to ring age, radial growth, stand density, and site quality. *Can. J. For. Res.* 34: 2433-2442.
- Denne, M.P. 1973. Tracheid dimensions in relation to shoot vigour in *Picea*. *Forestry*, 46: 117-124.
- Dickson, R.L. et Walker, J.C.F. 1997. Selecting wood quality characteristics for pines. CTIA/IUFRO workshop. Timber management toward wood quality and end-product value. Pages IV.45-IV.50. August 18- 22, 1997, Québec City, QC, Canada.
- Erickson, H.D. et Harrison, A.T. 1974. Douglas-fir wood quality studies. Effects of age and stimulated growth on wood density and anatomy. *Wood Sci. Technol.* 8: 207-226.
- Foster, N.W., et Morrison, I.K. 2002. Carbon sequestration by a jack pine stand following urea application. *For. Ecol. Man.* 169: 45-52.
- Gagnon, R. et Morin, H. 2001. Les forêts d'épinette noire du Québec : dynamique, perturbations et biodiversité. *Le Naturaliste canadien*, 125 : 26-35.
- Gagnon, R., Potvin J. et Gagné, É. 1998. Les bases écologiques de fonctionnement des forêts commerciales d'épinette noire du Saguenay-Lac-Saint-Jean - Chibougamau-Chapais (Québec): vers un aménagement forestier durable. Université du Québec à Chicoutimi, Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale. 27 p.
- Godbout, C. 2002. Le problème de l'éclaircie commerciale des bétulaies blanches de 60 ans et plus. *Revue de littérature. Note de recherche forestière n° 115.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. 12 p.

- Haygreen, J.G. et Bowyer, J.L. 1989. Forest products and wood science an introduction. 2nd ed. 491pp.
- Hébert, B. 2004. Études sur le *Thuja occidentalis* dans des cédrières de la Gaspésie: Mesure de la réaction du thuya à l'éclaircie commerciale et suivi après 2 ans d'essais d'plantation et d'ensemencement. Rapport PMVRMF 2004
- Islam, M.A. et Macdonald, S.E. 2005. Effects of variable nitrogen fertilization on growth, gas exchange, and biomass partitioning in black spruce and tamarack seedlings. *Can. J. Bot.* 83:1574-1580
- Jaakkola, T., Mäkinen H., Sarén M.-P. et Saranpää P. 2005b. Does thinning intensity affect the tracheid dimensions of Norway spruce? *Can. J. For. Res.* 35: 2685–2697
- Jaakkola, T., Mäkinen, H. et Saranpää, P. 2005a. Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. *Can. J. For. Res.* 35: 1767-1778.
- Jaakkola, T., Mäkinen, H. et Saranpa, P. 2006. Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation. *For. Ecol. Man.* 237: 513-521.
- Jaakkola, T., Mäkinen, H. et Saranpää, P. 2007. Effects of thinning and fertilisation on tracheid dimensions and lignin content of Norway spruce. *Holzforschung* 61(3): 301–310.
- Jacobson, S. et Pettersson, F. 2001. Growth responses following nitrogen and N-P-K-Mg additions to previously N-fertilized Scots pine and Norway spruce stands on mineral soils in Sweden. *Can. J. For. Res.* 31: 899-909.
- Johnson, D.W. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air, et Soil Pollution.* 64:83-120.
- Jozsa, L.A. et Middleton, G.R. 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: nature et conséquences pratiques. Forintek Canada Corp. Pub. spéciale SP-34F. 42 p.

- Jozsa, L.A. et Brix, H. 1989. The effects of fertilization and thinning on wood quality of a 24-year-old Douglas-fir stand. *Can. J. For. Res.* 19: 1137-1145.
- Jyske, T. 2008. The effects of thinning and fertilisation on wood and tracheid properties of Norway spruce (*Picea abies*) – the results of long-term experiments. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management.
- Jyske, T., Mäkinen, H. et Saranpää, P. 2008. Wood density within Norway spruce stems. *Silva Fennica* 42(3): 439–455.
- Kasraoui, H. 2011. Effets de l'éclaircie commerciale de de la fertilisation sur la masse volumique du bois et sur la morphologie des trachéides du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Mémoire de maîtrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 98 pp.
- Koga S. et Zhang S.Y. 2004. Inter-tree and intra-tree variations in ring width and wood density components in balsam fir (*Abies balsamea*). *Wood Sci. Technol.* 38: 149–162.
- Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S.Y., Beaulieu, J. et Bousquet, J. 2005. Transition from juvenile to mature wood in *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. *Wood Fiber Sci.* 37: 445-455.
- Koubaa, A., Hernandez, R., Beaudoin, M. et J. Poliquin. 1998. Interclonal, intraclonal, and withintree variation in fiber length of poplar hybrid clones. *Wood Fiber Sci.* 30: 40–47.
- Koubaa, A., Zhang, S.Y. et Makni, S. 2002. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry *Ann. For. Sci.* 59:511-518
- Koubaa, A., Zhang, S.Y., Isabel, N., Beaulieu, J., et Bousquet J. 2000. Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce. *Wood Fiber Sci.*:32(1): 61-71.

- Larson, P.R. 1969. Wood formation and the concept of wood quality. School of forestry. New Haven. Yale University. Bulletin N° 74.54 pages.
- Law, K.N. et Valade, J.L. 1997. Effect of Wood quality on thermomechanical pulping: a case study on Black Spruce and Jack Pine. CTIA/IUFRO international wood quality workshop. Quebec city, Canada. Timber management toward wood quality and end-product value. pp: VII 3-VII7.
- LeFort, P., Gauthier, S. et Bergeron, Y. 2003. The influence of fire weather and land use on the fire activity of the lake Abitibi area, Eastern Canada. For. Sci. 49: 509-521.
- Lindgren, P.M.F., Sullivan, T.P., Sullivan, D.S., Brockley, R.P. et Winter, R. 2007. Growth response of young lodgepole pine to thinning and repeated fertilization treatments: 10-year results. Forestry, 25p.
- Liu, C., Zhang, S.Y. et Jiang, Z.H. 2007. Models for predicting lumber grade yield using tree characteristics in black spruce. For. Prod. J. 57(1/2): 60-66.
- Lundgren, C. 2004. Cell wall thickness and tangential and radial cell diameter of fertilized and irrigated Norway spruce. Silva Fenn.38 :95–106.
- MacDonald, E. et Hubert, J. 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. Forestry 75:107 – 138.
- Mahendrappa, M.K. et Saloni, P.O. 1982. Nutrient Dynamics and Growth Response in a Fertilized Black Spruce Stand Soil. Sci. Soc. Am. J. 46:127-133
- Mäkinen, H., Jyske, T. et Saranpää, P. 2008. Variation of tracheid length within annual rings of Scots pine and Norway spruce. Holzforschung 62:123-128.
- Mäkinen, H., Saranpää, P. et Linder, S. 2002. A wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. Can. J. For. Res. 32: 185-194.
- Mäkinen, H., Saranpää, P. et Linder, S. 2005. Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Holzforschung. 56: 449-460.

- Mäkinen, H., Jaakkola, T., Piispanen, R. et Saranpää, P. 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *For. Ecol. Manag.* 241:175-188.
- Marguerie, D., Begin, Y. et Cournoyer, L. 2000. Distinction anatomique du bois de mélèze (*Larix laricina* [Du Roi] Koch.), de l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss.), et de l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), en vue de l'analyse des macrorestes. *Géogr. Phys. Quat.* 54: 317-325.
- Mayor, X., et Rodà, F. 1993. Growth response of holm oak (*Quercus ilex* L) to commercial thinning in the Montseny mountains (NE Spain). *Ann. Sci. For.* 50: 247-256.
- Meziane, D. et Shipley, B. 2001. Direct and indirect relationships between specific leaf area, leaf nitrogen and leaf gas exchange : effects of irradiance and nutrient supply. *The Annals of Botany* 88 : 915-927.
- Molteberg, D. et Hoibo, O. 2006. Development and variation of wood density, kraft pulp yield and fibre dimensions in young Norway spruce (*Picea abies*). *Wood Sci. Technol.* 40: 173–189.
- Mörling, T. 2001. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. *Ann. For. Sci.* 59: 29-40.
- Mullins, E.J. et Mcknight, T.S. 1981. Canadian woods: their properties and uses. University of Toronto Press. Toronto; Canada (Ed. 3), 389 pp.
- Newton, P.F. et Amponsah, I.G. 2006. Systematic review of short-term growth responses of semi-mature black spruce and jack pine stands to nitrogen-based fertilization treatments. *For. Eco. Manag.* 237: 1-14.
- Nyakuengama, J.G., Downes, G.M. et Ng, J. 2002. Growth and wood density responses to later-age fertilizer application in *Pinus radiata*. *Iawa J.* 23 : 431-448.
- Nyakuengama, J.G., Downes, G.M. et Ng, J. 2003. Changes caused by mid-rotation fertilizer application to the fibre anatomy of *Pinus radiata*. *IAWA J.*, 24:397– 409

- Ostrander, M.D. 1974. Eastern spruce: An American wood. USDA Forest Service, FS-263. Washington, DC. 10 p.
- Pamerleau-Couture, E. 2011. Impact de trois interventions sylvicoles sur la Croissance et la qualite du bois de l'épinette noire en Forêt boréale. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 98 p.
- Panshin, A.J. et de Zeeuw C. 1980. Textbook of wood technology. Co, McGraw-Hill Book. New York City. 772 p.
- Park, Y.I., Koubaa, A., Brais, B. et Mazerolle, J.M. 2009, Effects of Cambial Age and Stem Height on Wood Density and Growth of Jack Pine Grown in Boreal Stands. Wood Fiber Sci. 41:346-358.
- Parker, M.L., Hunt K., Warren W.G. et Kennedy R.W. 1976. Effect of thinning and fertilization on intra-ring characteristics and kraft pulp yield of Douglas-fir. App. Polym. Symp. 28: 1075-1086.
- Pothier, D. 2002. Twenty-years results of precommercial thinning in a balsam fir stand. For. Ecol. Manag. 168 : 177-186.
- Pothier, D. et Savard, F. 1998. Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec. Direction des inventaires forestiers, ministère des Ressources Naturelles du Québec, Québec.
- Reid, E.B., Young, S., Tong, Q. Zhang, S Y. et Morris, D M. 2009. Lumber grade yield, and value of plantation-grown black spruce from 3 stands in northwestern Ontario. For Chron, 85: 609-617,
- Ritchie, J.C. 1987. Postglacial Vegetation of Canada: Cambridge: Cambridge University Press, 178 p.
- Rowe, J.S. 1972. Forest regions of Canada. Environment Canada, For. Service. Publication 1300, 172p.

- Ruel, J.-C. 1995. Understanding windthrow : Silvicultural implications. *For. Chron.* 71: 434-445.
- SAS Institute Inc. 2004. Version 9.1.3 SAS Service Pack 4. SAS institute Inc., Ed, Cary, NC, USA
- Savva, Y., Bergeron, Y., Denneler, B., Koubaa, A. et Tremblay, F. 2008. Effect of inter-annual climate variations on radial growth of jack pine provenances in Petawawa, Ontario, Canada. *Can. J. For. Res.* 38: 619-630.
- Savva, Y., Denneler, B., Koubaa, A., Tremblay, F.; Bergeron, Y. et Tjoelker, M. 2007. Seed transfer and climate change effects on radial growth of jack pine populations in a common garden in Petawawa, Ontario, Canada. *For. Ecol. Manag.* 242: 636–647.
- Savva, Y., Koubaa, A., Bergeron, Y. et Tremblay, F. 2010. Effects of radial growth, tree age, climate, and seed origin on wood density of diverse jack pine populations. *Trees* 24:53-65.
- Schneider, R. 2007. Effet de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la qualité du bois du pin gris. Thèse de doctorat en sciences forestières. Université Laval. Québec.
- Scott, S.L., Barker, J.E., Morrison, I.K., et Foster, N.W. 1982. Basic Density of Jack Pine Wood Influenced by Fertilization and Thinning. *For. Chron.* 58: 44-46.
- Shannon, M.B., Robert, P.B., Jeff, P.B., Shannon, H. et Brian, H. 2006. Impacts of repeated fertilization on components of the soil biota under a young lodgepole pine stand in the interior of British Columbia. *Can. J. For. Res.* 36: 1415–1426.
- Sheedy, G. et Bertrand, V. 1997. Résultats de 10 ans concernant les éclaircies en ligne réalisées dans les plantations de la forêt de Drummondville. Ministère des Ressources naturelles. Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 77. 20 p.

- Siddiqui, K.M., Gladstone, W.T. et Marton. R. 1972. Influence of fertilization on wood and pulp properties of Douglas fir. Proceedings of Symposium on the Effect of Growth Acceleration on the Properties of Wood, Madison, WI, November 10-11, 1971. USDA For. Ser. For. Prod. Lab. pp. BI-13.
- Sjolte-Jorgenstern, J. 1967. The influence of spacing on the growth and development of coniferous plantations. *Inter. Rev. For. Res.* 2: 43-93.
- Soucy, M. 2003. Éclaircie et fertilisation d'un peuplement d'épinette noire: effets à long terme sur la croissance des tiges, la production et le dynamique du peuplement. mémoire de maîtrise. Université de Moncton, Nouveau Brunswick
- Tasissa, G. et Burkhart, H.E. 1998. An application of mixed effects analysis to modeling thinning effects on stem profile of loblolly pine. *For. Ecol. Manag.* 103, 87-101.
- Tasissa, G., Burkhart, H.E. et Amateis, R.L. 1997. Volume and taper equations for thinned and unthinned loblolly pine trees in cutover, site-prepared plantations. *S. J. of Appl.-For.* 21, 146-152.
- Tong, Q.J., Zhang, S.Y. et Thompson, M. 2005. Evaluation of growth response, stand value and financial return for pre-commercially thinned jack pine stands in Northwestern Ontario. *For. Ecol. Manag.* 20: 225-235.
- Vahey, D. W., Zhu, J.Y. et Scott., C. T.2007. Wood density and anatomical properties in suppressed-growth trees: Comparison of two methods. *Wood Fiber Sci.* 39(3):462–471.
- Viereck, L.A. et Johnston, W. F. 1990. *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Black spruce. Dans: *Silvics of North American trees. Vol. 1, Conifers.* USDA Forest Service pages 227-237.
- Vincent, M. 2011. Impact des éclaircies commerciales sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire (*Picea mariana* (mill.) BSP) en forêt boréale. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi

- Vincent, M., Krause, C., et Zhang, S. Y. 2009. Radial growth response of black spruce roots and stems to commercial thinning in Boreal forest. *Forestry* 82: 557-571.
- Weetman, G.F. et Algar., D. 1974. Jack pine nitrogen fertilization and nutrition studies: three year results. *Can. J. For. Res.* 4: 381-398.
- Weetman, G.F. 1975. Ten-year growth response of black spruce to thinning and fertilization treatments. *Can. J. For. Res.* 5: 302-309.
- Weetman, G.F., Dallaire, L.C. et Fournier, R. 1995. Long-term effects of repeated N fertilization and straw application in a jack pine forest. 1. Twenty-two-year growth response. *Can. J. For. Res.* 25: 1978-1983.
- Williams, J. W., Shuman, B.N., Webb T., Bartlein, P.J. et Leduc, P.L. 2004. Late quaternary vegetation dynamics in northamerica: scaling from taxa to biomes. *Ecological Monographs* 74: 309–334.
- Yang, K.C. et Hazenberg, G. 1994. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana*. *Can. J. For. Res.* 24: 996-1007.
- Yang, R.C. 1998. Foliage and stand growth responses of semimature lodgepole pine to thinning and fertilization. *Can. J. For. Res.* 28: 1794-1804.
- Yang, R.C., Wang E.I.C. et Micko M. M. 1988. Effets of fertilization on wood density and tracheid length of 70-year-old lodgepole pine in west-central Alberta. *Can. J. For. Res.* 18: 954-956.
- Yang, R.C., Wang, E.I.C. et Micko, M.M., 1988. Effects of fertilization on wood density and tracheid length of 70-year-old lodgepole pine in west-central Alberta. *Can. J. For. Res.* 18, 954-956.

- Young, S.M. 2008. Lumber recovery, a model to predict leaf area, and water use in response to thinning in plantation grown black spruce (*Picea mariana* [Mills] B.S.P.). MS thesis, MR47132 Lakehead University, 108 pp.
- Zahner, R. et Whitmore, F.W. 1960. Early growth of radically thinned loblolly pine. J. For. 58: 628-634.
- Zhang, J.W., Oliver, W.W. et Powers, R.F. 2005. Long-term effects of thinning and fertilization on growth of red fir in northeastern California. Can. J. For. Res. 35: 1285-1293.
- Zhang, S.Y. 2006. L'élagage et la qualité du bois. Forintek Canada Corp. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/elagage/documents/zhang.pdf>
- Zhang, S.Y. et Chauret, G. 2001. Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (*Picea mariana*). Canadian Forest Service Report. Vol 35. Forintek Canada Corp. 47pp.
- Zhang, S.Y. et Koubaa, A. 2009. Les résineux de l'Est du Canada : Écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. Publication spéciale, FPIinnovations; SP-526F, 377 p.
- Zhang, S.Y., Chauret, G., Ren, H.Q. et Desjardins, R. 2002. Impact of plantation black spruce initial spacing on lumber grade yield, bending properties and MSR yield. Wood FiberSci 34:460–475.
- Zhang, S.Y., Chauret, G., Swift, D.E. et Duchesne, I. 2006. Effects of pre-commercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. Can. J. For. Res. 36 : 945-952.
- Zhang, S.Y. 1997. Wood quality: its definition, impact, and implications for value-added timber management and end uses. CITA/IUFRO, Quebec City. Timber management toward wood quality and end-product value, August 18-22. pp I.17-I.39.

- Zhu, J.Y., Scott, C.T., Scallon, K.L. et Myers, G.C. 2007. Effects of plantation density on wood density and anatomical properties of red pine (*Pinus resinosa* ait.). *Wood Fiber Sci*, 39:502 – 512.
- Zobel, B.J. et Van Buijtenen, J.P. 1989. *Wood variation: its causes and control*. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag. New York. 363 p.
- Zobel, B.J., et Jett, J.B. 1995. *Genetics of wood production*. Springer-Verlag, Berlin, 337p.