

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

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

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR

HADHEMI KASRAOUI

AVRIL 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de mémoire, le professeur Ahmed Koubaa pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement à finir un travail commencé il y a longtemps. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer le travail et l'améliorer au fil des discussions. Je tiens aussi à remercier la professeure Suzanne Brais pour ses précieux conseils et son aide à la rédaction de ce mémoire. Mes remerciements vont aussi à Marc Mazerolle pour sa patience et son aide pendant les analyses statistiques des résultats. Je remercie également Sylvie Alain pour les mesures de la morphologie des fibres et Joseph Samson-Morasse pour les mesures de densitométrie. J'exprime ma gratitude à Young In (David) Park pour ces précieux conseils et son amitié. Je tiens à souligner la contribution financière du FQRNT et du CRSNG au projet et à une bourse en milieu pratique, celle de FPInnovations pour la bourse et l'accueil en milieu pratique. Les remerciements vont aussi à toute l'équipe de la chaire de recherche du Canada en valorisation, caractérisation et transformation du bois spécialement à Hassine Bouafif, mais également Sébastien Migneault et Joël Soucy, les pionniers du laboratoire. La contribution de la Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier est grandement appréciée pour l'accès aux sites de l'étude et pour tout le support fourni dans le cadre de ce projet. *Last but not least*, j'exprime aussi ma gratitude à tous les membres de ma famille pour leurs soutiens et leurs encouragements. À mes enfants.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

RÉSUMÉ

INTRODUCTION

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1.1 LES TRAITEMENTS SYLVICOLES	3
1.1.1 La densité des peuplements	3
1.1.2 L'espace initial.....	4
1.1.3 Les éclaircies pré commerciales.....	4
1.1.4 Les éclaircies commerciales	4
1.1.5 La fertilisation.....	6
1.1.6 L'élagage	6
1.2 QUALITÉ DU BOIS	7
1.2.1 Masse volumique.....	8

1.2.2	Trachéides ou fibres de bois.....	8
1.2.3	Défilement de la tige.....	8
1.2.4	Bois juvénile et bois mature.....	9
1.2.5	Propriétés mécaniques du bois	9
1.3	VARIATION DES PROPRIÉTÉS DU BOIS	10
1.3.1	Variation génétique et environnementale.....	10
1.3.2	Variations intra-arbres des propriétés du bois.....	10
1.3.3	Variation de la densité du peuplement.....	12
1.4	EFFETS DES TRAITEMENTS SYLVICOLES SUR LA QUALITÉ DU BOIS	12
1.4.1	Impact des éclaircies sur les propriétés du bois	14
1.4.2	Impacts de la fertilisation sur la croissance et les propriétés du bois	16
1.4.3	Effets combinés de l'éclaircie et de la fertilisation sur la croissance, la masse volumique du bois et la morphologie des trachéides	17
1.5	IMPACT DE L'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE ET DE LA FERTILISATION SUR LA VALEUR DU PRODUIT	18
1.6	SYNTHÈSE.....	19
CHAPITRE II		
	ÉTABLISSEMENT DU PLAN DE RECHERCHE.....	21
2.1	OBJECTIFS DE RECHERCHE	21

2.2	HYPOTHÈSES DE TRAVAIL	21
2.3	MÉTHODOLOGIE.....	22
2.3.1	Les sites expérimentaux	22
2.3.2	Dispositif expérimental	22
2.3.3	Échantillonnage.....	25
2.3.4	Méthode de mesures de la masse volumique et de la croissance du bois.....	25
2.3.5	Mesures de la morphologie des fibres	26
2.3.6	Analyses statistiques des résultats	28
CHAPITRE III		
	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	33
3.1	STATISTIQUES DESCRIPTIVES.....	33
3.2	VARIATIONS RADIALES ET LONGITUDINALES DE LA CROISSANCE ET VARIATIONS DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET ANATOMIQUES DU BOIS	35
3.2.1	Variation de la largeur des cernes.....	35
3.2.2	Variation de la masse volumique	38
3.2.1	Variation de la morphologie des trachéides	41
3.3	EFFETS DE L'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE SUR LES PROPRIÉTÉS DU BOIS	43
3.3.1	Effet de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale	44
3.3.2	Effet de l'éclaircie commerciale sur la masse volumique du bois.....	48

3.3.3	Effet de l'éclaircie commerciale sur la morphologie des trachéides	51
3.4	EFFETS COMBINÉS DE L'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE ET DE LA FERTILISATION SUR LES PROPRIÉTÉS DU BOIS	54
3.4.1	Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance radiale	55
3.4.2	Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la masse volumique	56
3.4.3	Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la morphologie des trachéides	58

CONCLUSION

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Tableau	Synthèse de la revue de la littérature concernant les effets de l'éclaircie et de la fertilisation sur la qualité de la fibre et du bois d'essences américaines	20
2.1 Tableau	Caractéristiques générales des sites, des traitements sylvicoles et des arbres échantillonnés.....	24
3.1 Tableau	Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses) de la largeur et de la masse volumique des cernes annuels de du pin gris dans différents sites de la forêt boréale en Abitibi-Témiscamingue	34
3.2 Tableau	Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses) de la longueur et de la largeur des trachéides du bois mature du pin gris dans différents sites de la forêt boréale en Abitibi-Témiscamingue.....	35
3.3 Tableau	Synthèse des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de la hauteur, de l'éclaircie commerciale, du temps et de la densité du peuplement sur la largeur et la masse volumique des cernes et de leurs composants.....	45
3.4 Tableau	Synthèse des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de l'éclaircie commerciale, du temps et de la densité du peuplement sur la longueur et la largeur du bois initial et du bois final du pin gris.....	52
3.5 Tableau	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 du peuplement sur la largeur et la masse volumique des cernes et de leurs composants	60

3.6 Tableau	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 du pin gris à 1,3 m de hauteur.....	61
-------------	---	----

LISTE DES FIGURES

2.1 Figure	Aire de répartition de la zone d'étude.....	23
2.2 Figure	Schéma explicatif du dispositif d'expérimentation.....	23
3.1 Figure	Variation des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final du pin gris en fonction de l'âge cambial au niveau du DHP (hauteur = 1,3 m)	36
3.2 Figure	Variations longitudinales des composantes de la largeur des cernes : A. Largeurs moyennes des cernes; du bois initial et du bois final avec la hauteur de l'arbre; B. Largeur moyenne du cerne avec la hauteur à différents âges cambiaux; C. Largeur du bois initial avec la hauteur à différents âges cambiaux; D. Largeur du bois final avec la hauteur à différents âges cambiaux.....	37
3.3 Figure	Variation de la masse volumique du bois en fonction de l'âge cambial au niveau du DHP (Hauteur = 1,3)	39
3.4 Figure	Variation longitudinale des composantes de la masse volumique du bois du pin gris : A. Masse volumique moyenne du cerne, du bois initial et du bois final avec la hauteur; B. Masse volumique du cerne avec la hauteur à différents âges cambiaux; C. Masse volumique du bois initial avec la hauteur à différents âges cambiaux; D. Masse volumique du bois final avec la hauteur à différents âges cambiaux.....	40
3.5 Figure	Variation radiale de la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides du pin gris au DHP (Hauteur = 1,3 m).....	42
3.6 Figure	Variation longitudinale de la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides du pin gris	43
3.7 Figure	Variations de : A) la largeur des cernes; B) la largeur bois initial; et C)	

	la largeur du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale dans cinq sites	47
3.8 Figure	Variations de la masse volumique A) du cerne; B) du bois initial; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale dans cinq sites différents.	50
3.9 Figure	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 cinq sites différents.	53
3.10 Figure	Variations de : A) la largeur des cernes ; B) la largeur bois initiale ; et C) la largeur du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale de fertilisation dans trois sites.....	61
3.11 Figure	Variations de la masse volumique : A) du cerne ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale de fertilisation dans trois sites.....	62
3.12 Figure	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.	64

RÉSUMÉ

Dans un contexte de restriction d'accès à la matière ligneuse et une augmentation de la demande pour le bois et les fibres de bois, les pratiques d'intensification de l'aménagement forestier gagnent en popularité. Il est bien documenté que l'éclaircie commerciale et la fertilisation améliorent la croissance et la productivité des territoires forestiers. Cependant, les effets de ces traitements sur les attributs de la qualité du bois sont très peu documentés. Le but de ce travail de recherche est d'étudier les effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance radiale, la masse volumique du bois et la morphologie des trachéides du pin gris (*Pinus Banksiana* Lamb.) à l'échelle des arbres. Le matériel expérimental inclut 60 arbres échantillonnés dans cinq pinèdes grises pures (>80% de la surface terrière en pin gris) et matures de la région de l'Abitibi-Témiscamingue. Les pinèdes avaient été soumises à deux traitements d'éclaircie cinq ans auparavant (modérée forte et un témoin) et un traitement de fertilisations (le fertilisé avec un taux de 200kg/ha d'azote et le non fertilisé). Les effets de traitements ont été comparés à des témoins. Les propriétés du bois, à savoir la croissance radiale, la masse volumique du bois, la proportion du bois final, la longueur des trachéides et leurs diamètres ont été mesurés à différentes hauteurs sur la tige et pour plusieurs années avant et après l'application des traitements.

Comparativement aux témoins, les différents traitements d'éclaircie commerciale et la fertilisation ont amélioré la croissance radiale, diminué la masse volumique du bois, augmenté le diamètre des trachéides et diminué leurs longueurs. Toutefois, la variation des propriétés du bois aussi bien inter qu'intra site est très large.

Les résultats montrent que la diminution de la masse volumique du bois et le changement de la morphologie des trachéides sont faibles comparativement à l'augmentation de la croissance des arbres. Ces changements des propriétés physiques et anatomiques de l'arbre n'ont eu qu'un faible impact sur la qualité marchande du bois et n'ont pas d'implications pratiques.

« Mots clés : densité du bois, croissance, trachéides, éclaircie commerciale, fertilisation. »

INTRODUCTION

Le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) compte pour 16,2 % de l'inventaire résineux total du Canada, soit 12,7 % de l'inventaire forestier total (Gray, 1995). Dans la forêt boréale du Sud et plus précisément dans l'Est canadien, le pin gris est l'une des espèces les plus commercialisables et parmi les plus reboisées (Rudolph et Laidly, 1990; Farrar, 1998). En effet, le bois de cette espèce est réputé dans le bois d'œuvre, les produits composites, le bois de deuxième transformation ainsi que pour l'industrie de pâte à papier (Zhang et Koubaa 2009).

Le pin gris peut vivre 230 ans (lac Nipigon, en Ontario), mais généralement les peuplements de pin gris commencent à se désagréger au bout de 80 ans dans les meilleures stations et au bout de 60 ans dans les stations de moindre qualité (Zhang et Koubaa 2009). Étant une essence héliophile, les peuplements de pin gris atteignent rapidement une densité qui diminue leur croissance et qui engendre un taux sévère de mortalité (Day et Nanang 1997).

La sylviculture vise à assurer le renouvellement d'un territoire forestier et à en accroître le rendement pour faire face à la compétition internationale des marchés de l'industrie du bois, tant pour la quantité de bois produite que pour sa qualité. L'application de la sylviculture sur les peuplements de pin gris offre une des avenues les plus intéressantes pour prévenir un déficit forestier à moyen et long terme dû à la surexploitation actuelle des forêts et la hausse de la demande globale pour la matière.

Delà, il existe plusieurs programmes actifs d'amélioration du pin gris au Canada et au Québec. La plupart de ces programmes reposent sur la forme, la croissance, l'adaptation de l'arbre à la station et sa résistance aux insectes et aux maladies (Zhang et Koubaa, 2009). En effet, les recherches faites sur le pin gris ont révélé une forte réaction aux éclaircies commerciales (Zhang et al., 2005a). Au niveau de l'arbre, on a noté une croissance diamétrale accélérée de l'arbre et une augmentation du volume de la tige. Au niveau du peuplement, l'éclaircie commerciale réduisait la mortalité du peuplement, mais n'avait presque pas de répercussions sur le volume marchand (Zhang et Koubaa, 2009). L'étude des

conséquences de la fertilisation sur la croissance du pin gris a démontré que ce traitement peut améliorer la croissance radiale et le volume marchand de l'arbre (Bell et al. 1997).

Notre étude portera sur les effets d'éclaircie commerciale et de fertilisation ainsi que leurs interactions sur la croissance et les attributs de qualité du bois du pin gris dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue. Nous évaluerons alors la croissance intra-arbre du bois initial, du bois final et du cerne. La qualité du bois produite sera quantifiée par le biais de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final ainsi que les longueurs et les diamètres des trachéides du bois initial et du bois final.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Les traitements sylvicoles

Les traitements sylvicoles influencent les propriétés physiologiques de la tige des arbres, ce qui se traduit par des modifications des propriétés physiques et mécaniques du bois. Au cours de ce chapitre, on énumérera les traitements sylvicoles qui peuvent influencer la qualité du bois. Toutefois, notre travail de recherche se focalisera sur les effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation.

1.1.1 La densité des peuplements

La densité des peuplements est une mesure quantitative du couvert forestier sur une superficie donnée. Elle se réfère à une notion de compétition qui fait intervenir la distance de tronc à tronc, l'accès aux ressources telles que l'eau, les substances nutritives et la lumière, la largeur du houppier et sa hauteur. Ainsi, la totalité de l'espace dans lequel l'arbre pousse est un déterminant important du taux de croissance et, par conséquent, des caractéristiques du bois. Cependant, la notion de densité de peuplement est une notion dynamique. Elle est modifiée au cours des années par la mort naturelle de certains arbres ou artificiellement par l'action de l'homme (Alteyrac, 2005).

Le contrôle de la densité d'un peuplement est la méthode la plus efficace que les sylviculteurs peuvent utiliser afin de régulariser la production (Larson, 1969). Celle-ci peut être maîtrisée par trois méthodes les espacements initiaux et les éclaircies pré-commerciales ou commerciales.

1.1.2 L'espace initial

L'augmentation de l'espace initial a des répercussions importantes sur la croissance des arbres résiduels (Olivier et Larson, 1996). Leur houppier s'en verra élargi, les branches produites seront plus nombreuses avec des diamètres supérieurs et les tiges auront un plus fort défilement. L'espace initial exerce une influence sur les caractéristiques de l'arbre, telles que le poids spécifique, la masse volumique basale, et la conformation des fibres (Giordano, 1970). Par ailleurs, la variation dans les espaces initiaux engendre généralement les mêmes réactions. Ils accélèrent la croissance, augmentent le diamètre et le volume de croissance de chaque tige, diminuent la mortalité des arbres (Stiell et Berry, 1973; Bella et DeFrancheschi, 1974), l'âge de rotation (Morris et al, 1994) et généralement la masse volumique du bois (Janas et Brand, 1988 ; Zhang et al. 2002 ; Zhang et al. 2005; Tong et al. 2005; Cown, 1980) affectant ainsi la qualité du bois (Zhang et al. 2002).

1.1.3 Les éclaircies pré commerciales

L'éclaircie pré-commerciale est appliquée peu après la fermeture du couvert, au moment où les cimes se joignent quand les arbres sont âgés de 8 à 15 ans. Cette pratique vise à réduire la compétition et à favoriser l'accroissement en diamètre des tiges résiduelles (Ker, 1987; Pothier et Margolis, 1991; Morris et al. 1994; Zhang et al.1998; Jobidon, 2000; Pothier, 2002). Ainsi, les arbres conservés arrivent plus rapidement à un volume et à une dimension commercialisable avec un potentiel et une forme de tige plus rentable (Cown, 1973;Bella et De Franceschi, 1974; Morris et al. 1994; Chui et Zhang, 1997; Zhang et al. 2006). Cette structure du peuplement prépare aussi une éventuelle éclaircie commerciale future.

1.1.4 Les éclaircies commerciales

Le principal effet de l'éclaircie commerciale est d'augmenter l'accroissement en volume des tiges résiduelles en diminuant le degré de compétition entre elles (Zahner et Whitmore, 1960; Aussenac et al. 1984; Sheedy et Bertrand 1997). Ce phénomène s'explique par le fait que, en

réponse à l'éclaircie, on assiste à une augmentation de la disponibilité de la lumière, de l'eau et des nutriments dans les peuplements alors que ces ressources sont partagées entre un nombre moindre d'individus (Aussenac et al. 1995). L'élévation de la quantité de lumière induit une augmentation de la croissance des arbres (Mayor et Rodà, 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 (Aussenac et al. 1982).

Les résultats concernant les effets de l'éclaircie commerciale sur le rendement des peuplements sont contradictoires (Schneider 2007, Zeide, 2001) et la réponse d'une telle stratégie d'aménagement est mise en doute par certains aménagistes forestiers (Schneider, 2007). À titre d'exemple, Pretzsch (2005) a montré que l'optimisation du volume marchand par le contrôle de la densité du peuplement dépend de l'essence, du site et de l'âge du peuplement. À titre d'exemple, Mäkinen et Isomäki (2004a, b) rapportent que la réduction de la surface terrière pourrait même diminuer le volume marchand du peuplement. D'autres auteurs (Schneider, 2007; Allen, 2000; Curtis and Marshall, 2002) rapportent que l'éclaircie commerciale améliore la productivité des peuplements et la taille des tiges et l'âge de rotation et diminue les pertes dues à la mortalité et la susceptibilité aux insectes.

De plus, le diamètre de ces arbres étant plus gros et se trouvant dans des peuplements plus homogènes, les coûts d'exploitation et de transformation peuvent être réduits (Lundgren, 1981; Liechty et al. 1988). Ainsi, on augmentera la rentabilité économique des plantations et des peuplements. Toutefois, cette augmentation en de diamètre pourrait avoir une incidence sur la qualité du bois produit et sur sa valeur marchande. De plus, l'éclaircie commerciale possède des effets indésirables tels qu'un défilement plus accentué de la tige, observés au cours des premières années après une éclaircie et qui se corrigent généralement avec le temps (Berry, 1971; André et al. 1994). En conclusion, l'effet de l'éclaircie à maturité sur la masse volumique du bois ou sur la formation de bois de compression serait négligeable (André et al. 1994; Reader et Kurmes, 1996; Tasissa et Burkhart, 1998). Cependant, l'éclaircie commerciale est peu pratiquée dans l'est du Canada, en comparaison avec l'éclaircie pré-commerciale et le dégagement de plantation et ce pour plusieurs raisons dont le peu de connaissances des effets chez les espèces, les difficultés à augmenter la productivité du peuplement et les difficultés à rentabiliser la première éclaircie (CCSMAF, 2003).

1.1.5 La fertilisation

Le but d'un programme de fertilisation est d'augmenter la disponibilité des nutriments afin de maximiser le rendement des stations (Moorhead et Dickens, 2002). La fertilisation vise plusieurs objectifs : l'amélioration de la qualité de la station, l'amélioration du potentiel d'une station déjà productive et la correction des déficiences d'une station improductive de façon à accroître le développement de la cime. Les peuplements forestiers sont généralement fertilisés après la fermeture du couvert, habituellement à la densité finale des tiges. Généralement, on fertilise à l'urée dans les peuplements naturels et en plantation à cause de sa disponibilité et de son coût relativement abordable (Bernier et Camiré, 1981).

1.1.6 L'élagage

L'élagage peut se faire naturellement par la croissance en hauteur du peuplement. Les branches basses meurent par manque de lumière, se dégradent et finissent par tomber (Cyr, 2006). Toutefois, ce phénomène étant très rare dans la nature car même mortes, les branches persistent longtemps sur le tronc avant de tomber naturellement (Mäkinen, 1999). On reproche généralement au bois issu de plantations son fort défilement (Keller et Thiercelin, 1984), sa nodosité, la persistance des branches (Ballard et Long, 1988) et sa proportion de bois juvénile élevé comparativement au bois issu de forêts naturelles donc plus denses. L'élagage artificiel permet généralement d'atténuer, voire d'éliminer ces inconvénients (Cyr, 2002).

L'élagage peut augmenter la valeur de la bille d'un arbre et améliorer ses qualités (Ballard et Long, 1988; Neilsen et Pinkard, 2003) car un nombre élevé de nœuds, une faible masse volumique du bois et une forte proportion de bois juvénile constituent les principaux facteurs du déclassement du bois de placage lors de son classement mécanique (Zhang et al. 2004). Les caractéristiques des nœuds (grosseur, nombre et conditions (morts ou vivants)) – plus que toutes autres caractéristiques du bois influencent le degré d'acceptabilité des bois commerciaux et l'usage qui peut en être fait (Brazier, 1977). Dans certains cas, l'élagage précipite hâtivement la transition du bois juvénile en bois mature (Cown, 1973).

Néanmoins, au Québec, il se pratique très peu d'élagage, d'une part, à cause de l'absence de marché et d'autre part, à cause de l'absence d'orientation à court et moyen terme à l'égard d'une telle pratique. La quasi-totalité des études sur l'élagage provient de l'extérieur du Québec et très peu se rapportent aux espèces de la province (Cyr, 2006).

1.2 Qualité du bois

La qualité du bois est perçue différemment par les forestiers, les manufacturiers et les consommateurs (Zhang, 1997). Si plusieurs auteurs se sont penchés sur la définition de la qualité de bois, on retiendra celle de Briggs et Smith (1986) énoncée comme suit : «La qualité de bois est une mesure de son aptitude à satisfaire aux exigences liées à l'utilisation à laquelle il est destiné ». Ainsi, chaque caractéristique du bois contribue ou peut contribuer à sa qualité, en fonction de l'application qu'on peut lui associer. Dans un cas, les critères de qualité peuvent être la masse volumique, l'uniformité des cernes et le bois sans nœuds, alors que dans un autre cas, ils peuvent être la proportion de bois final, le rendement en cellulose et le rapport fibres — vaisseaux.

Bien qu'il soit parfois difficile de cerner le concept de qualité de bois, plusieurs critères définissent l'aptitude d'un bois à satisfaire les exigences d'une utilisation donnée (Alteyrac, 2005). Certains sont liés à la structure même du bois (anatomie, composition chimique), d'autres sont l'expression de facteurs intrinsèques (propriétés physiques et mécaniques). Cependant, de nombreuses caractéristiques du bois sont héréditaires, mais souvent contrôlées par les conditions de croissance (Dickson et Walker, 1997).

La masse volumique du bois et les propriétés des trachéides (fibres) sont considérées des indicateurs importants de qualité de bois (Law et Valade, 1997), compte tenu de leurs étroites relations avec les propriétés des produits à base de fibres, notamment le papier, le carton et les panneaux de fibres. Néanmoins, il existe d'autres facteurs qui influencent la qualité du bois.

1.2.1. Masse volumique

Il est admis que la qualité du bois est associée à sa masse volumique (la densité du bois) considérée comme l'expression de la structure anatomique du bois (Dinwoodie, 1965 ; Zobel et Van Buijtenen, 1989 ; Alteyrac, 2005). De plus, les propriétés mécaniques et physiques du bois sont étroitement liées à sa masse volumique (Panshin et de Zeeuw, 1980; Zhang, 1997).

1.2.2. Trachéides ou fibres de bois

Chez les résineux, les trachéides longitudinales représentent la presque totalité de la masse du bois. Ils servent à la fois à donner sa résistance au bois (tissus de soutien, bois d'été) et à conduire l'eau et les éléments nutritifs (tissus de conduction, bois de printemps) (Pichard, et al., 1997).

Les dimensions des fibres (longueur et diamètre) ont été étudiées par plusieurs auteurs qui définissent un accroissement rapide durant les premières années de la croissance radiale, puis une croissance graduelle dans le bois mature jusqu'à atteindre une taille maximale (Panshin et De Zeeuw, 1980; Zobel et Van Buijtenen, 1989). Ce patron de variation est contrôlé par les facteurs génétiques (Zobel et Van Buijtenen, 1989) et environnementaux (Philipson et Butterfield, 1967). Cette différence d'accroissement représente généralement la transition entre le bois juvénile et le bois mature (Bisset et Dadswell, 1949; Dadswell et Wardrop, 1960; Panshin et De Zeeuw, 1980).

1.2.3. Défilement de la tige

Plus un peuplement est dense, plus la tige présente une forme cylindrique (Farrar, 1961; Janas et Brand, 1988; Morris et al. 1994). Les fortes éclaircies peuvent alors causer une détérioration de la forme de la tige par augmentation du défilement. La forme des tiges obtenue est alors conique (Hilt, 1979). Or, les usines de sciage recherchent des billes de bois résineux d'un fort diamètre qui présentent un faible défilement, c.-à-d. ayant une forme plus

cylindrique que conique (Jozsa et Middleton, 1997). Un défilement peu prononcé de la tige est avantageux pour les opérations de débitage puisque la proportion du volume inutilisable est moindre (Keller et Thiercelin, 1984; Fight et al., 1991).

1.2.4. Bois juvénile et bois mature

Le bois juvénile est la proportion du xylème autour de la moelle contenant des cellules immatures (Briggs et Smith, 1986; Yang et Wong, 1986). Généralement, les peuplements denses ont une proportion de bois juvénile plus faible, à cause du taux de récession des cimes. Par conséquent, lorsque l'arbre est isolé ou lorsque la croissance est rapide, il se forme une plus grande proportion de bois juvénile due au développement de la cime vivante (Zobel et Kellison, 1984). Ce bois juvénile possède des caractères non désirables pour l'industrie du papier et de production de bois solide, car ses trachéides sont plus courtes et ses parois cellulaires sont plus épaisses (Bendtsen, 1978). Alors, pour réduire la formation de bois juvénile, le sylviculteur peut retarder l'éclaircie de quelques années et diminuer l'espacement initial au moment de la plantation (Larson, 1967).

1.2.5. Propriétés mécaniques du bois

La densité de peuplement affecte les propriétés mécaniques du bois. Chez le pin à encens, Clark et al. (1994) ont trouvé que les peuplements peu espacés (1,8m x 1,8 m, soit 3000 arbres/ha) ont une meilleure qualité du bois de dimension. Dans ce cas particulier, l'effet combiné de l'espacement initial et de l'éclaircie montre que les densités de peuplement élevées donnent un bois de plus grande résistance mécanique.

1.3 Variation des propriétés du bois

Zhang et Koubaa (2009) ont publié une révision exhaustive de la littérature sur les variations génétiques, environnementales, intra-arbres et avec les traitements sylvicoles des propriétés du bois du pin gris. Les sections suivantes présentent une synthèse de cette révision.

1.3.1. Variation génétique et environnementale

La masse volumique du bois du pin gris est influencée par la génétique de façon modérée à forte. Zhang et Chui (1996) ont suggéré une sélection selon le poids de la fibre sèche pour maximiser les gains génétiques. Par ailleurs, Morris et Parker (1992) ont également observé que les caractéristiques des tiges du pin gris varient avec la station où le pin gris croît. Le défilement et le gauchissement ont tendance à être plus marqués sur les arbres poussant dans de mauvaises stations. Par contre, aucun effet significatif de la station sur la masse volumique du bois n'a été observé par certains auteurs (Grigal et Sucoff, 1966; Roddy, 1983).

La plus importante source de variation de la masse volumique du bois du pin gris se situe entre les arbres individuels de chaque station (Grigal et Sucoff, 1966; Roddy, 1983; Magnussen et Keith, 1990). Des résultats semblables pour la hauteur, le diamètre, le volume, la proportion de bois de cœur et le défilement des tiges des arbres ont été rapportés (Magnussen et Keith, 1990).

1.3.2. Variations intra-arbres des propriétés du bois

Variations intra-cernes

Le bois du pin gris n'est pas homogène comparativement à d'autres essences, dont le thuya occidental et le cyprès jaune, mais il est plus homogène que certaines essences telles que le mélèze laricin et le Douglas taxifolié (Jozsa et Middleton, 1997). Dans le bois initial, la masse volumique est d'abord faible, puis elle augmente légèrement. Près de la zone de bois

final, la masse volumique augmente considérablement jusqu'à une valeur maximale avant de diminuer brusquement à la fin du cerne (Zhang et Koubaa, 2009). Bien qu'aucun renseignement ne soit disponible sur la variation intra-cerne dans la longueur des trachéides du pin gris, elle devrait être semblable à celle du pin de Monterey. Chez celui-ci, la longueur des trachéides augmente de façon régulière et continue depuis le bois initial jusqu'au bois final (Panshin et de Zeeuw, 1980).

Variations radiales

La variation radiale de la masse volumique du bois du pin gris est typique de celle des essences de pin et se caractérise par une augmentation initiale depuis la moelle vers l'extérieur pour finir par atteindre un plateau (Keith, 1986; Barbour et al., 1994). La variation de la masse volumique du bois initial est similaire à celle de la masse volumique du cerne. Par contre, la masse volumique du bois final est presque constante avec l'âge et caractérisée par une légère augmentation de la moelle vers l'écorce (Zhang et Koubaa, 2009).

La largeur des cernes est caractérisée par une diminution importante de l'âge 4 à 7 jusqu'à 20 ans approximativement. Par la suite, la largeur du cerne continue à diminuer, mais à un rythme constant, mais beaucoup moins important que la diminution initiale. Ce patron de variation de la largeur du cerne chez le pin gris a été également rapporté par Savva et al. (2007). La variation de la largeur du bois initial est similaire à celle de la largeur du cerne. La variation de la largeur du bois final est aussi caractérisée par une diminution constante à partir de l'âge de 5-7 ans vers l'écorce, mais à un rythme beaucoup moins important que celui des largeurs du cerne et du bois initial (Zhang et Koubaa, 2009).

Chez le pin gris, la longueur des trachéides est courte à proximité de la moelle, puis augmente peu à peu pour atteindre un sommet dans le bois adulte (Pothier et al., 1989 b). La qualité de la station peut influencer sur la structure de la variation du pin gris, et on a trouvé des structures de variation semblables concernant la perméabilité de l'aubier (Pothier et al., 1989a, 1989 b). En ce qui concerne la composition chimique du bois du pin gris, la teneur en lignine, en extractibles à l'alcool-benzène et en produits d'extraction à l'eau de cette essence diminue de la moelle vers l'extérieur, puis tend à se stabiliser (Keith, 1986).

Variations longitudinales

Les résultats concernant la variation des propriétés du bois selon la hauteur de la tige sont quelque peu contradictoires chez le pin gris. Singh (1984) conclut que la masse volumique du bois est élevée à la base de l'arbre, diminue pour atteindre une valeur minimale à mi-hauteur, puis augmente jusqu'à la cime. Par contre, Roddy (1983) et Pronin (1971) ont rapporté une diminution de la masse volumique du bois de la base de l'arbre jusqu'à sa cime.

1.3.3. Variation de la densité du peuplement

Chez l'épinette noire, on a démontré que les arbres provenant d'un peuplement peu dense auraient du bois de dimension dont le module de rupture (MOR), qu'on définit comme la mesure de la capacité maximale de charge supportable par la pièce, est plus faible que pour les arbres récoltés dans des peuplements plus denses (Zhang et Chauret, 2001). Enfin, il a été démontré que la densité de peuplement chez le pin jaune avait un effet significatif sur le module d'élasticité (MOE), qu'on définit comme étant l'aptitude d'une pièce à résister à la déformation sous l'effet d'une charge, mais n'avait pas d'influence sur le module de rupture (MOR) (Biblis et al. 1997). Cependant, pour le pin gris, il semblerait que le MOE et le MOR ne soient pas influencés par l'intensité des éclaircies (Schneider et al. 2005);

1.4 Effets des traitements sylvicoles sur la qualité du bois

L'accélération de la croissance individuelle des arbres dans un cycle de rotation plus court peut affecter la qualité du bois (Kellison et al. 1983; Cregg et al. 1988; Barbour, 1994; Zhang, 1997). Cependant, les informations disponibles sur la relation entre le taux de croissance et les propriétés du bois du pin gris sont contradictoires. À titre d'exemple, Barbour et al. (1994) suggèrent que l'amélioration du taux de croissance par des éclaircies et la modification de l'espacement des arbres peut réduire la masse volumique du bois. Par contre, Larson (1962) indique que l'accélération de la croissance résultant d'un plus grand espacement n'a que peu d'effets sur la masse volumique du bois du pin gris. Certains auteurs

suggèrent que malgré la possibilité d'existence de corrélation négative entre le taux de croissance et la masse volumique du bois, mais il n'y a pas de relation de cause à effet (Larocque et Marshall 1995). L'existence de corrélation négative est due aux changements de la cime (Larson, 1967).

L'ouverture du couvert arborescent par l'éclaircie commerciale implique de grandes modifications des conditions environnementales, agissant ainsi sur le fonctionnement écophysologique des arbres résiduels (Aussenac et Granier, 1982) par une modification de la masse volumique et de la distribution des épaisseurs des cernes (Zahner et Whitmore, 1960; Aussenac et al. 1984; Sheedy et Bertrand, 1997).

Les travaux sur le sapin Douglas en Colombie-Britannique (Thomson et Barclay, 1984), sur le sapin baumier au Bas-Saint-Laurent au Québec (Krause et al. 2002), sur le pin sylvestre en Suède (Valinger, 1992) et sur le pin gris au Québec, ont conclu que, suite à une augmentation de l'intensité des éclaircies on observe une accélération significative de la croissance des tiges en diamètre (Sonderman et Rast, 1988; Viens, 2001 ; Drapeau, 2005) avec une augmentation du défilement des arbres (Newnham, 1965; Schneider et al. 2005) sans affecter sa hauteur (Bella et De Franceschi, 1974) ce qui conduit généralement, à long terme, à des peuplements plus stables (Burton, 1981) et moins sujets aux dommages causés par le vent, le verglas ou la neige. Ces constats laissent entendre que l'éclaircie commerciale est une opération sylvicole positive pour la production de bois puisqu'elle peut induire une importante hausse de l'accroissement en diamètre dans les tiges traitées (Allen 2000; Wenger 1984). Cependant, selon Schneider et al. (2005) l'augmentation de la croissance des tiges individuelles du pin gris ne permet pas de combler la perte des tiges par la récolte. Le volume marchand cumulé (volume récolté au moment de l'éclaircie + volume résiduel sur pied) est donc réduit suite à une éclaircie commerciale. En outre, l'éclaircie commerciale n'affecte pas le diamètre des branches. Les tiges de même hauteur et de même diamètre auront des branches de même taille, quelle que soit l'intensité de l'éclaircie.

1.4.1. Impact des éclaircies sur les propriétés du bois

Il est bien connu que la densité d'un peuplement affecte les propriétés physiques du bois, en particulier sa masse volumique (Bues, 1985; Yang et Hazenberg, 1994; Zhang et Chauret, 2001). Il s'agit d'un problème important pour les forestiers, car il s'incorpore dans la stratégie à adopter pour produire du bois dans un temps minimal (densité de peuplement et traitements sylvicoles) tout en préservant sa qualité (masse volumique).

Plusieurs études ont examiné l'impact des éclaircies sur la masse volumique relative du bois. Les travaux de Yang et Hazenberg (1994) et de Yang (1994) sur les éclaircies pré-commerciales chez l'épinette noire, de Chui et Zhang (1997) et de Zhang et Koubaa (1998) chez le sapin baumier ont démontré que la masse volumique relative du bois diminuait avec l'augmentation de l'espacement entre les tiges.

Un autre travail de recherche portant sur les effets de l'intensité de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la masse volumique du bois d'épinette de Norvège dans le sud-est de la Finlande confirme les études nord-américaines à savoir que les éclaircies n'entraînent que de faibles diminutions de la masse volumique du bois (Jaakkola et al. 2005).

Toutefois, dans le cas des éclaircies commerciales sur le pin gris, les travaux de Barbour et al. (1994) et de Schneider et al. (2005) ont appuyé la thèse que les arbres en provenance des milieux éclaircis ont produit du bois de plus faible masse volumique que les arbres du milieu naturel pendant les quelques années suivant le traitement et en fonction de l'intensité des espacements. Cette tendance se maintient plus longtemps que celle rapportée pour d'autres pins et pourrait affecter négativement la production de pâte à papier ou les propriétés mécaniques du bois (Barbour et al. 1994).

Concernant l'impact de l'espacement entre les arbres sur les caractéristiques du bois, l'étude de l'épinette noire a mis en évidence qu'en dessous de 1400 arbres/ha, la masse volumique du bois diminue significativement lorsque la densité de la plantation diminue. Par contre, pour des densités de peuplements plus fortes, il n'y a pas de différence de masse volumique du bois (Zhang et Chauret, 2001).

D'autres études menées sur le pin à encens au sud des États-Unis (Tasissa et Burkhart, 1998) n'ont relevé aucun effet de l'espacement sur la masse volumique relative du bois et aucune différence significative entre les peuplements éclaircis et ceux non éclaircis. Enfin, chez certaines essences du Sud, certains cas rapportés ont même démontré que la masse volumique relative du bois pouvait augmenter avec l'espacement entre les tiges (Paul, 1957).

La longueur des cellules augmente rapidement à partir de la moelle durant la phase juvénile. Après cette augmentation précoce, les cellules les plus longues se retrouvent dans les cernes les plus éloignés de la moelle. Les résultats disponibles concernant la relation entre la longueur des cellules du bois juvénile et celles du bois mature sont contradictoires. Une relation inverse entre la longueur des cellules et l'épaisseur des cernes a été observée chez plusieurs conifères, à savoir le pin gris, le sapin baumier, l'épinette noire et d'autres essences (Chalk, 1930; Bisset et al. 1951; Bannan 1960; 1967; 1970; Ahmad, 1970; Dutilleul et al. 1998). Une relation positive entre la longueur des cellules et l'épaisseur des cernes a été aussi rapportée chez d'autres conifères (Echols, 1958). Cependant, Echols (1955) et Marton et al. (1968) ont rapporté qu'il n'y a pas de relations entre la longueur des cellules et l'épaisseur des cernes.

Les résultats des études sur la longueur des trachéides en fonction des éclaircies sont aussi contradictoires. En effet, Greyer et Gilmore (1965) ont montré que les trachéides dans le bois juvénile et le bois mature deviennent plus longues avec l'augmentation des espacements. Néanmoins, les études de Youngberg et al. (1963) sur le *Pinus elliottii*, de Posey (1965) sur le *Pinus taeda* et de Klem (1968) sur l'épinette noire ont toutes convergé vers l'obtention de fibres plus courtes avec l'élargissement de la croissance des cernes et que les trachéides les plus courtes appartenaient au peuplement le plus espacé (3,6 m x 3,6 m, environ 770 arbres/ha), c'est-à-dire à croissance plus rapide (Yang et Hazenberg, 1994). Selon Fleming (2005), les peuplements naturels semblent donner des trachéides plus longues et de meilleure qualité que les peuplements aménagés. Par contre, l'étude de Grigal et Sucoff (1966) sur le pin sylvestre et celle de Ward et Gardiner (1976) sur l'épinette de Sitka n'ont remarqué aucune différence significative de la longueur des trachéides par rapport à l'augmentation de l'intensité des éclaircies.

Les études sur l'épinette de Norvège ont conclu que les intensités d'éclaircies utilisées dans les pratiques sylvicoles de la Finlande avaient une très faible incidence sur les dimensions des fibres avec une faible diminution de la longueur des trachéides dans le cas des fortes éclaircies par rapport à celles plus faibles (Jaakkola et al., 2005). Cependant, la relation entre la masse volumique du bois et les propriétés des fibres reste peu étudiée (Dutilleul et al., 1998; Herman et al., 1998a).

1.4.2. Impacts de la fertilisation sur la croissance et les propriétés du bois

L'application d'engrais azoté en forêt boréale se traduit par une réponse en accroissement du peuplement traité. Dans l'est du Canada, des travaux réalisés sur le pin gris révèlent une réponse très significative de cette espèce à la fertilisation azotée (Weetman et Algar, 1974; Morrison et al., 1977; Bernier et Camiré, 1981). Cette réponse se manifeste par une augmentation de la croissance radiale due à une augmentation de l'épaisseur du bois initial (Klem 1972, 1974; Saikku, 1975a, b; Kukkola et Saramäki, 1983; Kenk et Fisher, 1988; Lindström, 1996; Mäkinen et al. 2002 a; b). Une étude faite en Estonie sur le pin sylvestre a révélé que l'augmentation de la croissance radiale par les fertilisants augmenterait la croissance de l'aubier et diminuerait la proportion du bois final sans avoir d'effet sur le bois du cœur (Pikk, 2006). Une autre étude sur l'épinette de Norvège âgée de 110 ans dans une forêt au sud-ouest germanique a révélé qu'après une fertilisation azotée datant de 42 ans, le volume des tiges prélevées est supérieur aux parcelles témoins (Kladtke, 2003).

À cause de son implication économique, l'effet de la fertilisation sur la masse volumique du bois des conifères a été traité par plusieurs chercheurs : Zobel et al. (1961), Posey (1965) et Yang et al. (1988) sur *Pinus taeda*, Weetman (1971) sur *Picea mariana*, Siddiqui et al. (1972) et Parker et al. (1976) sur *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.), Gooding et Smith (1972) sur *Pinus ellioti* et Schmidling (1973) sur les pins du sud. Toutes les études ont conclu que la masse volumique du bois des conifères diminue de 10 à 20 % après les premières années de fertilisation, mais avec un retour à la normale après. Certains auteurs affirment que l'utilisation des fertilisants provoquerait une diminution plus ou moins importante de la masse volumique, mais elle a pour effet d'accroître l'uniformité intra-cerne, ce qui est

considéré comme l'un des avantages dans l'application d'engrais (Zobel et Talbert, 1984). Par contre, les études de Moorhead (1997) et de Valinger et al. (2000) affirment que la masse volumique du bois n'est pas affectée par la fertilisation.

Plusieurs recherches ont révélé que la fertilisation engendre un épaissement de la paroi cellulaire des trachéides de bois final (Megraw et Nearn, 1972 ; Isebrands et Hunt, 1975) et une accélération de la croissance qui provoquerait un élargissement de la zone de transition entre le bois final et le bois initial. Cette réponse a pour effet de réduire la proportion de bois final (Stairs et al. 1966; Larson, 1973; Olesen, 1977; Saranpää, 1985).

Des études faites sur l'épinette de Norvège (Stairs et al. 1966; Herman et al. 1998a et Mäkinen et al., 2002 a, b), sur l'épinette noire (Yang et Hazenberg, 1994) et sur le cèdre de l'est (Bannan, 1960), ont révélé qu'il existe une corrélation négative entre l'épaisseur des cernes et la longueur des fibres. En effet, la fertilisation réduirait la longueur des trachéides du bois mature (Posey, 1965; Erickson et Harrison, 1974; Yang et al, 1988), mais pas du bois juvénile (Schmidtling, 1973). Les arbres fertilisés ont des cernes, des diamètres de fibres et de lumen plus larges et des parois cellulaires plus minces que les arbres-témoins (Ollinmaa, 1959; Denne, 1973; Mäkinen et al., 2002a).

1.4.3. Effets combinés de l'éclaircie et de la fertilisation sur la croissance, la masse volumique du bois et la morphologie des trachéides

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

En effet, d'après Brix et Mitchell (1980) l'application des deux traitements augmente le taux de production et/ou le diamètre radial des trachéides engendré par l'augmentation de la

masse foliaire — due à la diminution de la compétitivité entre les arbres, à l'augmentation de l'activité photosynthétique et à l'ajout de nutriments qui fournit plus de polysaccharides et d'hormones au cambium.

D'après Zahner et Olivier (1962), les traitements tendent à retarder le délai de transition entre le bois initial et le bois final de quelques jours, alors que l'application de chaque traitement seul prolonge le délai de 1 à 2 semaines en fertilisant le sapin douglas (Brix, 1972) et environ 2 semaines pour l'éclaircie du pin gris et du pin rouge.

Une des rares études retrouvées sur l'effet des deux traitements sur la qualité du bois (Nyakuengama et al. 2001) sur le pin radiata indique que l'application des fertilisants au milieu de la rotation augmenterait la masse volumique du bois et la longueur des fibres et diminuerait le défilement de la tige, mais ces critères peuvent varier en fonction des sites (eau et sol). Les travaux de Morling (2001) sur le pin sylvestre au Suède ont révélé que l'application des deux traitements conduirait à une corrélation négative entre la largeur des cernes et leur masse volumique, qui n'est pas très différente de l'application de chaque traitement tout seul.

1.5 Impact de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la valeur du produit

À ce jour, les études faites sur l'impact de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la valeur du produit sont rares. Selon Weiskittel et al. (2006), les changements dus à la fertilisation et à l'éclaircie commerciale ne sont pas très significatifs pour pouvoir prédire leurs effets sur la qualité et la production de la grume. Toutefois, Sonne et al. (2004) révèlent que les grumes issues des traitements d'éclaircie commerciale, de fertilisation, ou les deux traitements ensemble, offrent un meilleur gain financier que les grumes non traitées.

Dans le peu de littérature traitant des valeurs de produits du pin gris après les éclaircies commerciales, on a conclu que la réduction des propriétés physiques du bois peut avoir un impact positif sur la valeur du produit (Schneider, 2007). En effet, les études financières sur le pin gris montrent qu'une régulation de la masse volumique du bois à un jeune âge a

certaines avantages économiques (Tong et al., 2005) : l'éclaircie génère des troncs plus larges, ce qui tend à diminuer les coûts de coupes et de transformations du bois. Cependant, selon Schneider (2007) la grume issue d'un peuplement éclairci a toujours une valeur moindre que celle issue d'un peuplement non éclairci.

1.6 Synthèse

À la lumière de cette revue de la littérature, nous présentons une synthèse des résultats disponibles sur les effets de l'éclaircie et de la fertilisation sur divers indicateurs de croissance et de qualité du bois (Tableau 1.1). Cette synthèse tient compte des études faites sur plusieurs essences nord-américaines.

Dans ce sens, notre projet permettra de combler une partie du manque d'information sur les effets combinés d'éclaircie commerciale et de fertilisation et d'approfondir les résultats de l'application de chaque traitement sylvicole séparément dans des peuplements naturels. Il permettrait également d'approfondir les connaissances fondamentales en ce qui a trait aux phénomènes de croissances des arbres.

Tableau 1.1 Synthèse de la revue de la littérature concernant les effets de l'éclaircie et de la fertilisation sur la qualité de la fibre et du bois d'essences Nord-Américaines.

	Éclaircie (E)	Fertilisation (F)	E+F
Effets sur la croissance	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Croissance diamétrale plus rapide Cernes plus larges 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation de la croissance radiale ✓ Augmentation de l'épaisseur du bois initial 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Meilleure croissance que chaque traitement seul
Effets sur la qualité de la fibre	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fibres plus courtes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Diminution de la longueur des fibres du bois mature ✓ Diamètre des fibres plus large ✓ Augmentation de la zone de transition bois initial-bois final 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmente le diamètre radial des fibres
Effets sur la masse volumique du bois	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Diminution temporaire de la masse volumique 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Diminution temporaire de la masse volumique du bois 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Résultats contradictoires
Effets sur la qualité du bois	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Moindre qualité que les peuplements denses ✓ Influence négativement les propriétés physiques du bois (masse volumique) ✓ Influence négativement les propriétés mécaniques du bois ✓ Plus de nœuds donc moindre qualité 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Résultats contradictoires 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ À déterminer

CHAPITRE II

ÉTABLISSEMENT DU PLAN DE RECHERCHE

2.1. Objectifs de recherche

Le but du projet est d'étudier l'effet de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation azotée sur la croissance et les indicateurs de la qualité du bois du pin gris à l'échelle des arbres issus de peuplements naturels. Plus spécifiquement, ce projet vise à évaluer les effets de deux intensités d'éclaircie commerciale (modérée et forte) et d'un traitement de fertilisation d'une part et d'autre part la combinaison de ces différents traitements sur :

- Les largeurs des cernes, la largeur du bois initial et du bois final à différentes hauteurs dans les arbres et à un intervalle d'années déterminé.
- Les masses volumiques des cernes, du bois initial et du bois final à différentes hauteurs dans l'arbre et dans un intervalle d'années déterminé.
- Les longueurs et le diamètre des trachéides du bois initial et du bois final à hauteur de poitrine et dans un intervalle d'années déterminé.
- La variation intra-arbres des propriétés du bois étudiées

2.2. Hypothèses de travail

En se basant sur les études antérieures, on peut émettre les hypothèses suivantes :

- *H1 : Les éclaircies commerciales augmentent la croissance radiale des tiges et le diamètre des trachéides, mais diminuent la masse volumique du bois et la longueur des trachéides.*

- *H2 : La fertilisation augmente la croissance radiale des tiges et le diamètre des trachéides, mais diminue la masse volumique du bois et la longueur des trachéides.*
- *H3 : La combinaison des éclaircies commerciales et de la fertilisation a un effet additif sur la croissance radiale des tiges. Toutefois, ils diminuent la masse volumique du bois et la longueur des trachéides, mais augmentent les diamètres des trachéides;*

2.3. Méthodologie

2.3.1. Les sites expérimentaux

Ce projet a été réalisé dans le réseau des éclaircies commerciales de l'Abitibi Témiscamingue mis en place entre 1998 et 2003 (Figure 2.1). Nous avons retenu cinq peuplements de pin gris sur sol à texture grossière, qui ont subi les traitements d'éclaircies commerciales au cours de l'hiver 1998-1999 et dont 3 sites (Castagnier-nord; Duprat-est et Cléricy) ont subi les traitements de fertilisations azotées à l'urée (200 kg N/hectare) au cours de l'automne 2001. Les informations concernant les sites sont présentées au Tableau 2.1.

2.3.2. Dispositif expérimental

Le dispositif original est un dispositif en tiroir en blocs complets comprenant deux traitements d'éclaircie établis dans les parcelles principales de 4 hectares (modéré et forte; Tableau 2.1) et un témoin et un traitement de fertilisation (0, 200 kg ha⁻¹ sous forme d'urée) en parcelles secondaires (400 m²) à l'intérieur des parcelles éclaircies. Les traitements d'éclaircie ont été répétés dans cinq peuplements différents (blocs) alors que les traitements d'éclaircie et de fertilisation combinés ont été répétés dans trois peuplements. À l'intérieur des parcelles expérimentales, deux à quatre placettes d'échantillonnage permanent (200 m²) ont été localisées et inventoriées (Figure 2.2) En 2003, à l'intérieur de chaque sous-parcelle expérimentale, deux arbres dominants (n = 60) ont été prélevés à proximité des placettes d'échantillonnages pour les analyses de la qualité du bois.

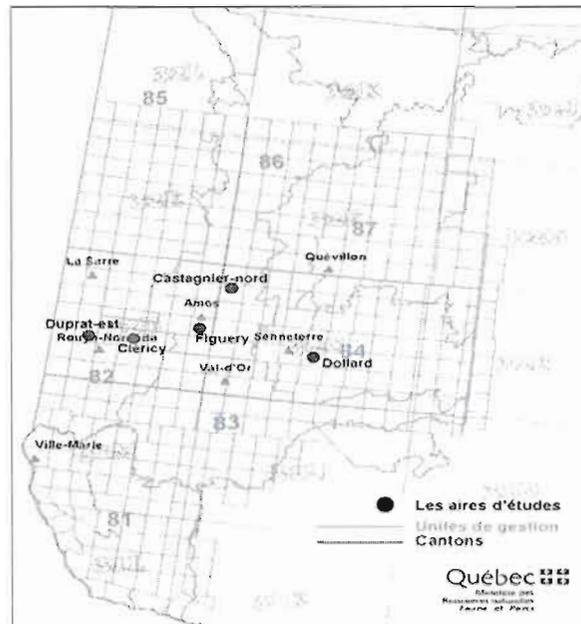


Figure 2.1. Aire de répartition de la zone d'étude (Grenier, 2004)

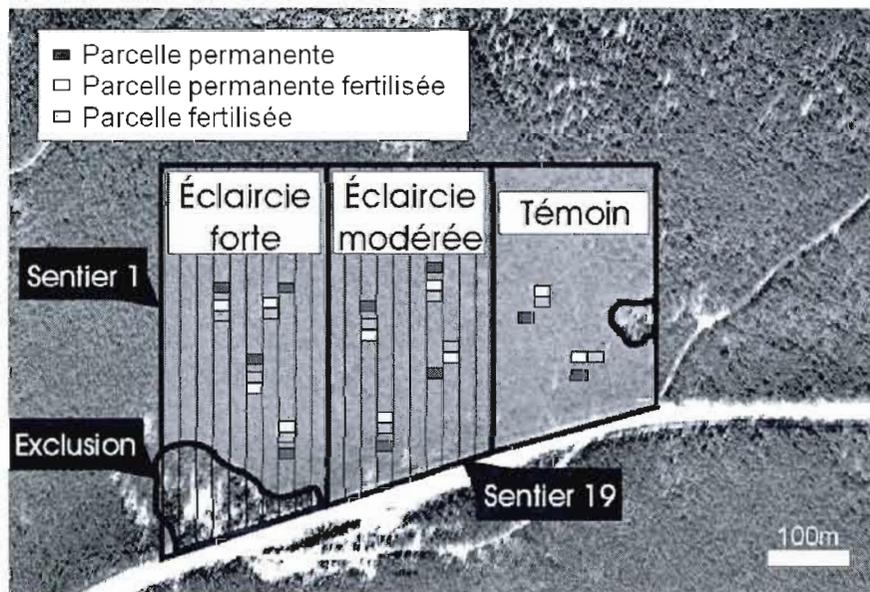


Figure 2.2 Schéma explicatif du dispositif d'expérimentation

Tableau 2.1 Caractéristiques générales des sites, des traitements sylvicoles et des arbres échantillonnés

	Castagnier-nord	Duprat-est	Dollard	Clérycy	Figury
	Caractéristiques des sites				
Latitude (north)	48° 48'	48° 23'	48° 20'	48° 18'	48 ° 26'
Longitude (west)	77° 55'	79° 07'	77° 03'	78° 39'	78° 12'
Altitude (m.a.s.l.)	346	352	362	324	366
Age du peuplement	41 (40-41) ²	47 (46-48)	47 (44-49)	64 (61-65)	75 (71-76)
Indice de la qualité de la station à 50 ans ¹	17,3	16	15,9	15,6	15,1
	Traitements sylvicoles				
Année de l'éclaircie	1998	1998	1998	1998	1998
Densité du peuplement avant éclaircie (Tiges / hectare)	2000	3000	3000	3000	1300
Densité du peuplement après éclaircie modérée	1300	1000	1300	900	900
Densité du peuplement après éclaircie forte	900	900	1000	600	600
Année de la fertilisation	2001	2001	-	2001	-
Fertilisation	Oui	Oui	Non	Oui	Non
	Caractéristiques des arbres échantillonnés				
Nombre d'arbres échantillonnés	12	12	11	12	12
Hauteur (m)	16 (14,5-17,0)	16 (15,2-17,2)	16 (12,4-17,3)	18 (14,7-21,6)	19 (17,0-21,5)
Diamètre au DHP (cm)	18 (14,3-21,1)	18 (14,1-21,2)	17 (13,5-19,2)	20 (16,3-24,4)	22 (18,9-25,4)
Ratio du houppier (%) ³	41 (36,2-49,3)	44 (31,4-50,7)	45 (35,2-63,8)	38 (30,8-44,3)	37 (30,7-46,8)

1. Hauteur des arbres dominants à l'âge de 50 ans

2. Étendu entre parenthèses

3. La longueur du houppier est la différence entre le sommet de l'arbre et la partie inférieure du houppier avec au moins une branche vivante.

2.3.3. Échantillonnage

Il s'agit d'un échantillonnage destructif qui consiste à couper 12 arbres par site, donc un total de 60 arbres. Sur chacun des arbres, des rondelles à des hauteurs systématiques de 1,3 m (DHP), 3 m, 5 m, 9 m, 11 m ont été extraits. Sur chaque rondelle, une barrette de 2 cm de largeur et de 5 cm de hauteur a été extraite (écorce à écorce en passant par la moelle). Ces échantillons ont servi pour l'analyse de la croissance radiale, de la masse volumique du bois et de la morphologie des fibres.

2.3.4. Méthode de mesures de la masse volumique et de la croissance du bois.

Le densitomètre à rayon X de Quintek Measurements System, Inc. (QMS), menu d'un logiciel de traitement des données, « Tree Ring Analyzer », a permis de mesurer, avec une résolution linéaire de 0,02 mm, les propriétés de croissance et de masse volumique des cernes annuels. Cette technique est basée sur l'atténuation d'un rayon-X traversant un échantillon.

Les informations intra-cernes révélées par le densitomètre nous renseignent sur la formation du bois initial et du bois final. De plus, l'anatomie des cernes annuels dévoile l'environnement passé de l'arbre, les interventions et les perturbations naturelles et humaines qu'il a subi au cours de sa croissance.

Par ailleurs, les profils intra-cernes établis par le densitomètre à rayon X sont aussi utilisés pour déterminer l'épaisseur des cernes soit l'épaisseur du bois initial, l'épaisseur du bois final, la proportion du bois final et les masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final. Le point de transition du bois initial au bois final correspond au point d'inflexion de la courbe représentative de la variation intra-cerne de la masse volumique du bois (Koubaa et al. 2002).

Le QMS est conçu pour analyser des planchettes minces de bois. Les échantillons doivent se positionner correctement dans le chariot et mesurer entre 1,57 mm à 2 mm d'épaisseur. Les échantillons issus de chaque arbre échantillonné sont sciés selon ces spécifications, pour pouvoir être analysés, procurant alors un rapport d'analyse individuel des données.

2.3.5. Mesures de la morphologie des fibres

Dans le présent projet 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. Plus précisément, pour chaque arbre répertorié, 15 cernes ont été prélevés dans le bois mature (avant et après traitement) de chaque année de croissance sur une période de 7 ans. Cette intervention a été réalisée pour les 60 arbres échantillonnés. Au total, nous avons analysé 900 cernes. Ce mode d'échantillonnage permettrait de cerner l'effet des traitements sur les propriétés de la fibre.

Les échantillons extraits pour la mesure des propriétés des fibres ont été macérés selon la procédure décrite par Cloutier (2005) avec divers ajustements. La macération des fibres s'est faite selon les étapes suivantes:

- Saturer les éclisses d'eau bouillante pour les ramollir.
- Une fois ramollis, les échantillons sont « essorés » afin d'éviter la réflexion par la lumière de l'excès d'eau dans la binoculaire.
- On extrait le bois initial et le bois final de chaque cerne 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° dans un bain-marie pendant quatre à 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 du mélange oxydant.
- L'échantillon est par la suite mis dans un mélangeur « blinder » pour obtenir une suspension en fibres prête à passer dans le FQA pour analyse.

Par la suite, chaque échantillon a été analysé pour mesurer les propriétés des fibres à l'aide de

l'analyseur de la qualité des fibres d'OPTITEST Canada, cet appareil mesure automatiquement et avec précision la qualité de la fibre cellulosique à savoir la longueur qui varie de 0,200 mm à 10 mm, la largeur comprise entre 10 μm et 75 μm , la masse linéique des fibres en mg/m qui exprime la masse de fibres rapportée à la longueur, 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 est exprimée selon trois variables, la moyenne arithmétique (L_N), déterminée selon l'équation 2.1, la moyenne pondérée selon la longueur (L_W) déterminée selon l'équation 2.2 et la moyenne pondérée selon le poids (L_{WW}) déterminée selon l'équation 2.3.

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

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

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

Les fibres sont regroupées selon différentes classes de longueur. Sachant que n_i est le nombre de fibres dans la classe de longueur L_i . La valeur L_{WW} est la valeur la plus utilisée puisqu'elle met plus de poids sur les fibres et réduit l'effet des fines et des parenchymes sur la détermination de la longueur moyenne des fibres.

Les variations radiales et longitudinales des fibres furent étudiées séparément. Les variations radiales des fibres furent étudiées au DHP de tous les arbres en échantillonnant le bois initial et le bois final des cernes annuels, 3, 6, 9, 15, 18, 21, 39 et 60 à partir de la moelle.

La variation longitudinale fut étudiée sur deux arbres seulement ou les cernes annuels 5, 10, 15, 20, 25 et 30 furent échantillonnés aux hauteurs : 0,6 m, 1,3 m, 3 m, 6 m, 9 m et 12 m. Pour cette partie, seules la longueur moyenne et la largeur moyenne des fibres furent étudiées.

2.3.6. Analyses statistiques des résultats

Toutes les données ont été soumises à une analyse de variance en utilisant la procédure MIXED (modèle linéaire général mixte) du logiciel SAS (SAS Institute Inc 2002-2003). Le choix du modèle mixte plusieurs raisons expliquent, dont la présence de données non équilibrées et dans certains cas, 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. Des mesures répétées ont été introduites en se référant à de multiples réponses prises sur des années et des hauteurs successives dans chaque unité expérimentale.

Delà, l'estimation de la méthode restrictive du maximum likelihood (REML) a été appliquée pour presque toutes les analyses exceptées la variation de la largeur du bois final où on a appliqué la méthode du minimum en variance et l'estimation quadratique non biaisée quadratique (mivque0) et pour la proportion du bois final ou on a appliqué la méthode d'estimation quadratique (ML). Aucune transformation des données n'a été appliquée. Le niveau de signification pour tous les résultats est référé au seuil de signification statistique $\alpha=0,05$.

Les critères de convergence (l'historique d'itération) et les statistiques d'ajustement (AIC) nous ont menés à utiliser la structure de covariance : UN(1), ne suggérant aucune hypothèse d'égalité de variance ou de corrélation, et ceci, pour la plupart des analyses sauf pour la variation de la largeur des cernes du bois final, la proportion du bois final et la morphologie des trachéides. Dans ces cas, la structure « CS » a été utilisée suggérant l'hypothèse que toutes les mesures prises tous les temps ont la même variance et toutes les paires de mesures sur le même échantillon ont la même corrélation. Des contrastes ont été utilisés pour séparer l'effet des traitements en degrés simples de liberté. Tandis que l'homogénéité de la variance a été vérifiée à l'aide de l'illustration graphique des résidus.

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

Tel que spécifié l'effet de l'éclaircie commerciale a été étudié selon un dispositif factoriel où les facteurs étudiés sont le site (5 peuplements), l'éclaircie (3 niveaux : Témoin; éclaircie

modérée; éclaircie forte), l'arbre (4 arbres par parcelle, 12 arbres par site), la hauteur dans l'arbre (0,5 m, 1,3 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m, 11 m et 13 m); le temps (-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5; ou 0 correspond à l'année de l'éclaircie. La densité initiale du peuplement 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.

Il faut noter que le nombre d'interactions inclus dans le modèle est limité par la taille de l'échantillon. Ainsi les interactions triples, quadruple, et quintuple ne peuvent pas être incluses dans le modèle. De plus, seules les interactions qui ont une signification pratique ont été incluses dans les modèles. Les interactions non significatives pour toutes les propriétés et celles sans signification pratique n'ont pas été considérées dans le modèle.

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

Où :

M_{ijklmn} est la moyenne de la propriété dans le site i , dont la densité 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 densité initiale du peuplement;

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.

Effets de l'éclaircie commerciale sur la morphologie de la fibre

L'effet de l'éclaircie commerciale sur la morphologie des fibres a été étudié à hauteur de DHP selon un dispositif factoriel ou les facteurs sont le site (3 sites), la parcelle (3 parcelles : témoin, éclaircie modérée, éclaircie forte), l'arbre (4 arbres par parcelle, 12 arbres par site); le temps (-2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5; ou 0 correspond à l'année de l'éclaircie) et la densité du

peuplement. L'équation 2.5 montre le modèle utilisé pour étudier l'effet de l'éclaircie commerciale sur les propriétés morphologiques des fibres.

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

Où :

M_{ijklm} est la moyenne de la propriété dans le site i , dont la densité 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 densité initiale du peuplement;

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

δ est l'effet dû à l'arbre;

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

ε_{ijklm} est le terme d'erreur

Il faut noter que l'effet de la hauteur n'a pas été étudié pour les propriétés morphologiques des fibres.

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

Les effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation ont été étudiés selon un dispositif factoriel où les facteurs étudiés sont le site (3 sites), la parcelle (3 parcelles : Témoin; éclaircie modérée; éclaircie forte), l'arbre (4 arbres par parcelle, 12 arbres par site) la hauteur dans l'arbre (0,5 m, 1,3 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m, 11 m et 13 m); le temps (-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5; où 0 correspond à l'année de l'éclaircie), la densité du peuplement et la fertilisation (fertilisé ou non). 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.

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

Où :

$M_{ijklmnp}$ est la moyenne de la propriété dans le site i , dont la densité 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 densité initiale du peuplement;

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

δ est l'effet dû à la fertilisation;

ϕ est l'effet du à l'arbre

γ est l'effet du à la hauteur dans l'arbre

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

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

Effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la morphologie de la fibre

Les effets combinés de l'éclaircie commerciale sur la morphologie des fibres ont été étudiés à hauteur de DHP selon un dispositif factoriel ou les facteurs sont le site (3 sites), la parcelle (3 parcelles : témoin, éclaircie modérée, éclaircie forte), l'arbre (4 arbres par parcelle, 12 arbres par site); le temps (-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5; ou 0 correspond à l'année de l'éclaircie), la densité du peuplement et la fertilisation (fertilisé ou non). 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 fibres.

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

Où :

$M_{ijklmnp}$ est la moyenne de la propriété dans le site i , dont la densité 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 dû à la fertilisation;

ϕ est l'effet dû à 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 DISCUSSION

3.1 Statistiques descriptives

On présente au tableau 3.1 les valeurs moyennes des largeurs et des masses volumiques des cernes annuels ainsi que ceux de leurs composants (bois initial et bois final) pour toute la durée de vie des arbres avant traitements. Les propriétés des trachéides figurent dans le Tableau 3.2. On y présente les moyennes de la longueur des fibres du cerne, du bois initial et du bois final dans le bois mature.

On constate une importante variation entre les sites de la largeur des cernes. La largeur moyenne du cerne varie de 1,86 mm à 2,16 mm ce qui correspond à une variation de 13,9 %. La variation de la largeur des cernes se situe principalement au niveau du bois initial qui varie de 1,43 mm à 1,69 mm. Par contre, la largeur moyenne du bois final varie de 0,42 mm à 0,47 mm (Tableau 3.1). De plus, les résultats du tableau 3.1 suggèrent que les moyennes de masse volumique du bois du pin gris sont uniformes dans les sites de la forêt boréale que nous avons étudiés.

La masse volumique moyenne varie de 465 à 478 kg/m³ ce qui correspond à une variation inférieure à 3 %. Cette moyenne correspond généralement aux moyennes rapportées pour le pin gris dans l'est du Canada (Zhang et Koubaa 2009; Park et al. 2009). Par contre, cette moyenne est supérieure à celles rapportées pour le pin gris de plantation dans l'Est du Canada. En fait, Zhang et Koubaa (2009) rapportent une masse volumique moyenne qui varie de 313 à 449 kg/m³ pour le pin gris de plantation.

Par ailleurs, la largeur moyenne des cernes trouvée dans cette étude (1,96 mm) est inférieure à celle rapportée par Zhang et Koubaa (2009) (2,15 mm) pour des peuplements de même âge (environ 50 ans d'âge). La différence s'explique par plusieurs facteurs à savoir les conditions de croissance, l'âge et la densité des peuplements. De plus, les données rapportées par Zhang

et Koubaa (2009) sont issues d'une plantation, ou la croissance est généralement meilleure.

Tableau 3.1 Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses) de la largeur et de la masse volumique des cernes annuels du pin gris dans différents sites de la forêt boréale en Abitibi-Témiscamingue

Sites	Composants des cernes annuels		
	Largeur (mm)		
	Cerne	Bois initial	Bois final
Castanier-nord	2,16 (53)	1,69 (59)	0,47 (45)
Dupart-est	1,89 (44)	1,45 (49)	0,45 (40)
Dollard	2,01 (45)	1,57 (51)	0,44 (38)
Cléricy	1,87 (46)	1,45 (53)	0,42 (35)
Figury	1,86 (46)	1,43 (52)	0,43 (40)
Moyenne de tous les sites	1,96 (48)	1,51 (54)	0,44 (40)
	Masse volumique (kg/m ³)		
	Cerne	Bois initial	Bois final
Castanier-nord	470 (14)	379 (12)	768 (13)
Dupart-est	478 (13)	381 (11)	781 (14)
Dollard	465 (12)	377 (11)	761 (13)
Cléricy	465 (14)	374 (12)	754 (14)
Figury	465 (14)	377 (11)	743 (15)
Moyenne de tous les sites	469 (13)	378 (11)	761 (14)

Les résultats du tableau 3.2 montrent que la longueur moyenne des fibres varie très peu entre les sites. La longueur moyenne du bois mature variait de 2,72 à 2,82 mm. Ces valeurs correspondent à ceux rapportés dans la littérature chez le pin gris (Pothier et al. 1998a) et chez les résineux en général (Zhang et Koubaa, 2009). La longueur moyenne du bois final est toujours légèrement supérieure à celle du bois initial ce qui est conforme aux résultats de Panshin et de Zeuw (1980). Par ailleurs, la largeur moyenne des trachéides a également montré très peu de variation entre les sites en se situant entre 34,4 μm à 35,4 μm . La largeur moyenne des trachéides du bois initial est légèrement supérieure à celle du bois final.

Tableau 3.2 Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses) de la longueur et de la largeur des trachéides du bois mature du pin gris dans différents sites de la forêt boréale en Abitibi-Témiscamingue.

Sites	Longueur des trachéides (mm)		
	Cerne	bois initial	bois final
Castanier-nord	2,72 (0,24)	2,52 (0,20)	2,82 (0,26)
Dupart-est	2,82 (0,21)	2,67 (0,20)	2,98 (0,22)
Dollard	2,80 (0,20)	2,73 (0,19)	2,96 (0,23)
Cléricy	2,74 (0,25)	2,57 (0,20)	2,88 (0,28)
Figury	2,73 (0,26)	2,50 (0,22)	2,90 (0,23)
Moyenne de tous les sites	2,79 (0,26)	2,62 (0,21)	2,91 (0,25)

	Largeur des trachéides (μm)		
	Cerne	Bois initial	Bois final
Castanier-nord	34,8 (3,8)	37,5 (2,7)	31,9 (2,4)
Dupart-est	35,4 (3,9)	38,2 (2,9)	32,3 (1,8)
Dollard	35,1 (4,4)	38,9 (2,2)	31,7 (2,0)
Cléricy	34,4 (3,7)	37,1 (3,0)	31,5 (1,7)
Figury	35,4 (3,5)	38,5 (2,5)	32,8 (2,2)
Moyenne de tous les sites	35,0 (3,9)	38,1 (2,7)	31,9 (2,1)

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

3.2.1. Variation de la largeur des cerne

Dans la forêt boréale et dans le cas des conifères, la croissance des arbres est tributaire de plusieurs facteurs, dont la quantité d'eau, l'âge cambial (Hofgaard et al. 1999; Deslauriers et al. 2003) et la densité des peuplements

La variation radiale de la largeur du cerne (Figure 3.1) est typique de celle connue pour les résineux (Zhang et Koubaa, 2009) et caractérisée par une diminution initiale rapide dans les premières années de croissance de l'arbre (Figure 3.1). À un âge plus mature, la largeur du cerne est caractérisée par une diminution moins accentuée. La variation de la largeur du bois

initial est similaire à celle de la largeur du cerne. Celle de la largeur du bois final est caractérisée par une diminution constante dans les premiers cernes annuels, mais elle est beaucoup moins accentuée que celles de la largeur du cerne et du bois initial. À un âge plus avancé, la largeur moyenne du bois final devient presque constante (Figure 3.1). Les variations radiales des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final sont similaires à celles rapportées ultérieurement pour le pin gris (Zhang et Koubaa, 2009, Park et al. 2009, Savva et al. 2007, 2008).

On illustre à la figure 3.2 les variations longitudinales des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final. Les largeurs moyennes du cerne et du bois initial augmentent linéairement avec la hauteur de l'arbre de (Figure 3.2A). Cette augmentation s'explique par la diminution du nombre de cernes annuels et par conséquent, le nombre de cernes étroits (Figure 3). Par contre, la largeur du bois final reste constante tout le long de la hauteur de l'arbre. Ce résultat s'explique par la faible variation de la largeur du bois final avec l'âge cambial.

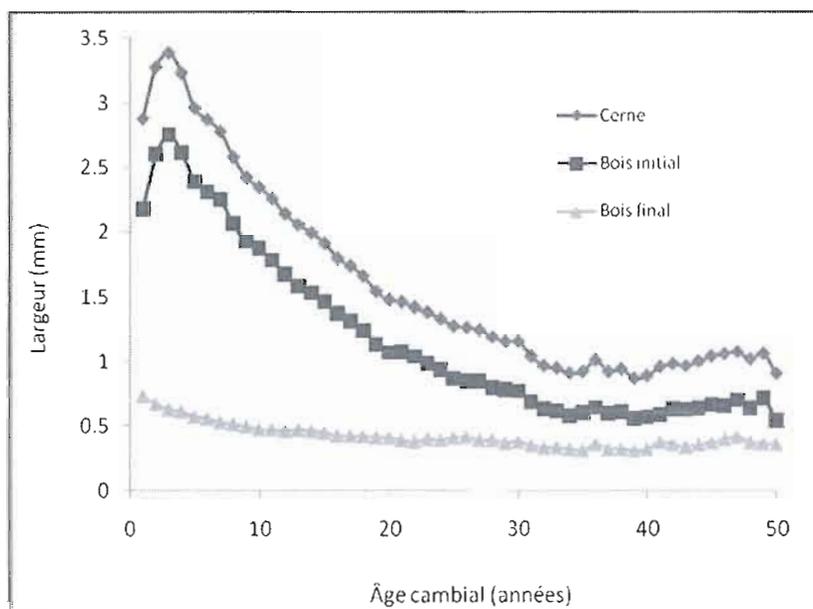


Figure 3.1 Variation des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final du pin gris en fonction de l'âge cambial au niveau du DHP (hauteur = 1,3 m).

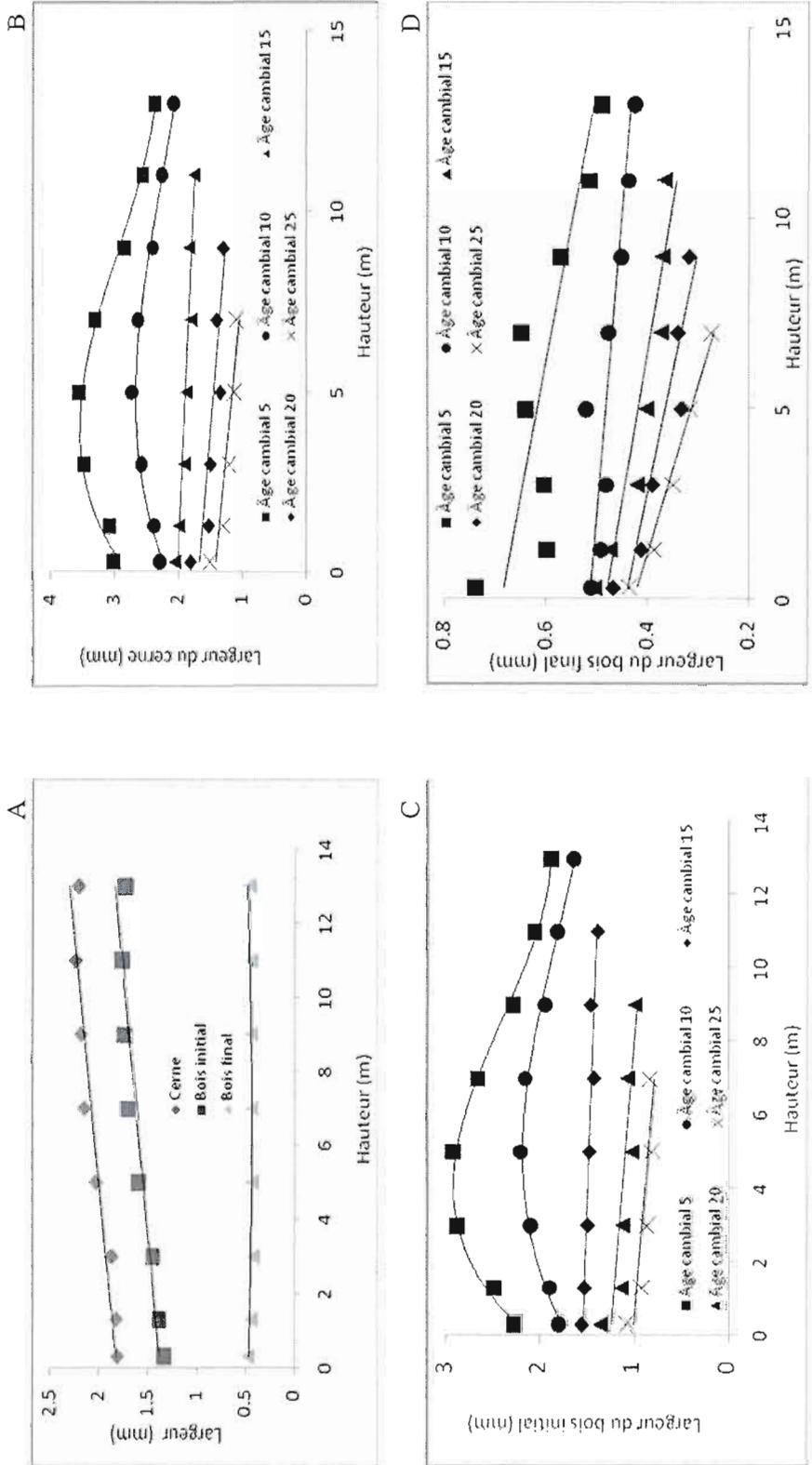


Figure 3.2 Variations longitudinales des composantes de la largeur des cernes¹ : A. Largeurs moyennes des cernes; du bois initial et du bois final avec la hauteur de l'arbre; B. Largeur moyenne du cerne avec la hauteur à différents âges cambiaux; C. Largeur du bois initial avec la hauteur à différents âges cambiaux; D. Largeur du bois final avec la hauteur à différents âges cambiaux

¹ Les courbes tracées dans ce graphique sont des tendances de variation et ne représentent pas nécessairement des relations mathématiques.

Les variations longitudinales des largeurs du cerne (Figure 3.2B) et du bois initial (Figure 3.2C) et du bois final (Figure 3.2D) se caractérisent par une diminution constante avec l'augmentation de la hauteur à quelques exceptions près. En fait, quel que soit l'âge cambial, la largeur du bois final montre une tendance à la diminution avec l'augmentation de la hauteur dans l'arbre. La même tendance est observée à des âges cambiaux supérieurs à 10 pour la largeur des cernes et du bois initial. Pour les âges cambiaux inférieurs ou égaux à 10, la largeur des cernes et du bois initial montrent une augmentation initiale jusqu'à la mi-hauteur. Par la suite, ces deux propriétés diminuent avec l'augmentation de la hauteur dans l'arbre. Ces résultats contredisent ce qui a été rapporté dans la littérature. En fait, la variation longitudinale de la largeur des cernes est considérée par plusieurs comme marginale (Kellison, 1981) et sans effet significatif (Duff et Nolan, 1953, Olesen, 1982, Mäkinen et al. 2007) pour les résineux. Dans le cas du pin gris, Shea et Armson (1972) suggèrent que l'effet de la hauteur sur la largeur moyenne des cernes n'est pas significatif.

3.2.2. Variation de la masse volumique

La figure 3.3 illustre la structure de la variation radiale de la masse volumique du bois du pin gris. Cette variation est typique de celle des essences de pin. La masse volumique du bois tend à augmenter en fonction de l'âge cambial passant de 400 kg/m^3 dans le bois juvénile à 530 kg/m^3 environ dans le bois mature (Figure 3.3). La masse volumique du bois initial suit le même patron de variation de celle du cerne (Figure 3.3). Par contre, la masse volumique du bois final suit un patron opposé. Elle augmente au cours des premiers cernes pour atteindre un plateau vers l'âge cambial 10. Ces patrons concordent avec ceux rapportés ultérieurement pour le pin gris (Keith, 1986; Barbour et al., 1994, Park et al. 2009, Zhang et Koubaa, 2009).

Les variations longitudinales des masses volumiques moyennes (Figure 3.4A) du cerne, du bois initial et du bois final sont relativement faibles comparativement aux variations radiales (Figure 3.3) tout en suivant un patron général de décroissance de la base vers l'apex. Ce

résultat est en accord avec celui de Roddy (1983) et Pronin (1971) pour le pin gris et de Zhang et Morgenstern (1995) pour l'épinette noire. Les résultats concernant la variation des propriétés du bois selon la hauteur sur la tige sont quelque peu contradictoires chez le pin gris. Par contre, Singh (1984) conclut que la masse volumique du bois du pin gris est élevée à la base de l'arbre, diminue pour atteindre une valeur minimale à mi-hauteur, puis augmente jusqu'à la cime. .

À un même âge cambial, les variations de la masse volumique du cerne (Figure 3.4B) et celle du bois initial (Figure 3.4C) montrent des tendances opposées pour le bois juvénile et pour le bois mature. Pour les âges cambiaux 5 et 10 (bois juvénile), les masses volumiques du cerne et du bois initial augmentent linéairement avec la hauteur de l'arbre. Par contre, pour les cernes 20 et 25 (bois mature), elles diminuent linéairement avec la hauteur de l'arbre. Dans le cas de la masse volumique du bois final, quel que soit l'âge une 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 (Figure 3.4D).

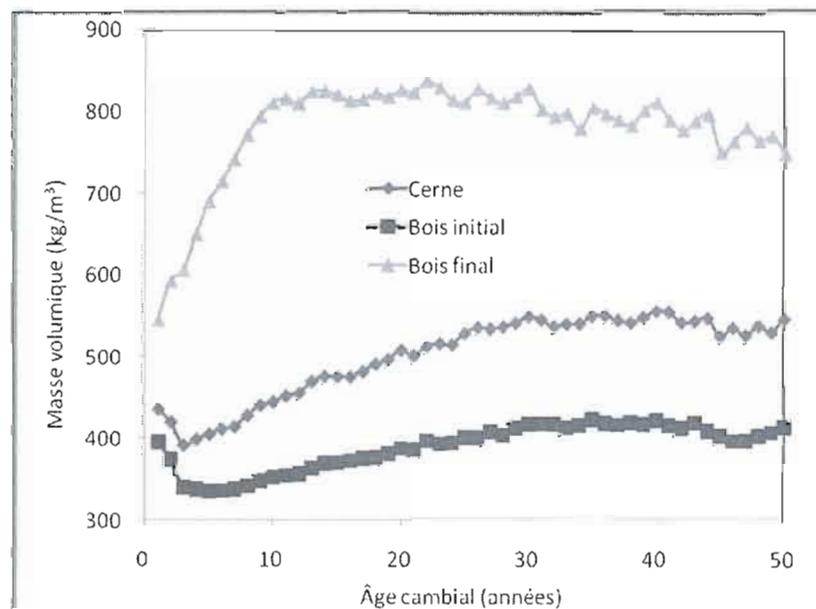


Figure 3.3 Variation de la masse volumique du bois en fonction de l'âge cambial au niveau du DHP (Hauteur = 1,3 m)

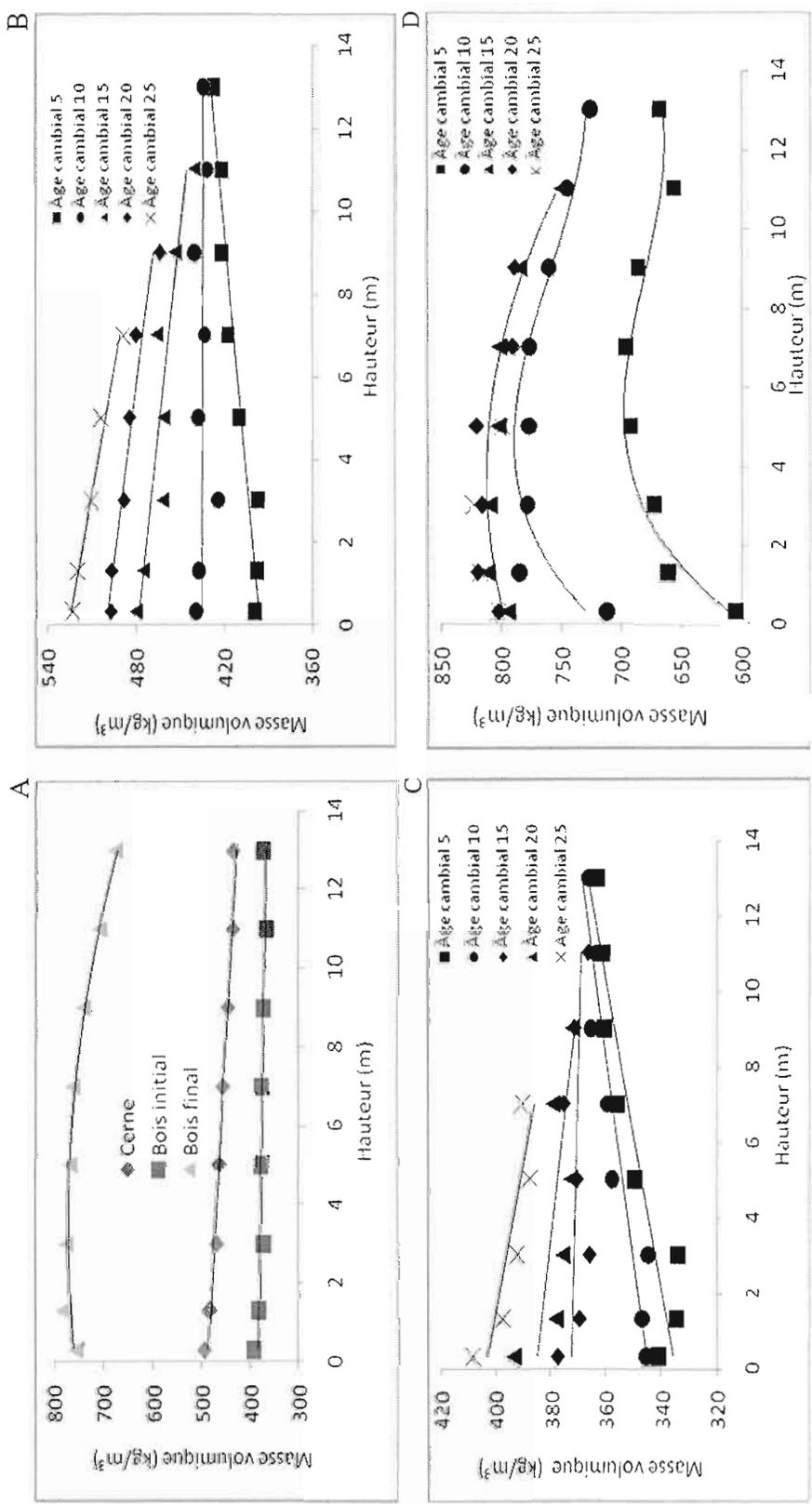


Figure 3.4 Variation longitudinale des composantes de la masse volumique du bois du pin gris² : A. Masse volumique moyenne du cerne, du bois initial et du bois final avec la hauteur; B. Masse volumique du cerne avec la hauteur à différents âges cambiaux; C. Masse volumique du bois initial avec la hauteur à différents âges cambiaux; D. Masse volumique du bois final avec la hauteur à différents âges cambiaux.

² Les courbes tracées dans ce graphique sont des tendances de variation et ne représentent pas nécessairement des relations mathématiques

3.2.1. Variation de la morphologie des trachéides

La longueur des trachéides, leur diamètre de lumen et l'épaisseur de la paroi cellulaire sont d'importance primordiale pour l'industrie des produits du bois à base de fibres, dont les pâtes à papier (Stairs et al. 1966; Tyrväinen, 1995; Mäkinen et al. 2002a), les panneaux de fibres (Maloney, 1995) et les composites bois-polymère (Migneault et al. 2008). La figure 3.5A illustre la variation radiale de la longueur moyenne des trachéides, du bois initial et du bois final. La longueur des trachéides est courte à proximité de la moelle, puis augmente peu à peu pour atteindre un maximum dans le bois adulte. Les variations radiales des longueurs des trachéides du bois initial et celles du bois final suivent le même patron de variation que celui de la longueur moyenne des trachéides du cerne. Ce patron de variation a été constaté par plusieurs auteurs (Erickson et Harrison 1974; Panshin et de Zeeuw, 1980; Pothier et al. 1989 b; Abdel-Gadir, 1993; Miranda et al. 2001, 2003) concluant que la variation de la longueur des trachéides est dépendante de la maturation cambiale c.-à-d. que chez les conifères, le bois mature est composé de trachéides plus longues que le bois juvénile.

La figure 3.5B illustre la variation de la largeur moyenne des trachéides des cernes, du bois initial et du bois final. Le patron de variation de la largeur des trachéides est similaire à celui de la largeur des cernes annuels (Figure 3.1). Les trachéides sont étroites à proximité de la moelle, puis leur largeur augmente pour atteindre un palier entre les âges cambiaux de 10 et 18 ans suivi par une diminution constante pour atteindre un plateau dans le bois mature (Figure 3.5B). La variation radiale de la largeur des trachéides en fonction de l'âge cambial est relativement faible. En effet, la plus importante variation est observée dans le bois initial dont l'étendue de variation se situe entre 35 et 44 μm . Dans le cas du bois final, l'étendue de variation de la largeur des trachéides se situe entre 30 et 32 μm . La largeur moyenne des trachéides varie de 32 à 36 μm . Ces résultats rejoignent ceux de Quilhó et al. (2006).

L'examen des illustrations de la moyenne de l'ensemble des arbres quant aux variations longitudinales de la longueur moyenne des trachéides (Figure 3.6A) et la largeur moyenne des cernes (Figure 6.8B) pour les âges cambiaux, 5, 10, 15, ainsi que pour la moyenne du bois mature (moyennes des âges 18, 25 et 31) indique qu'à un même âge cambial, la morphologie des trachéides varie très peu quoique des tendances se dégagent pour les variations longitudinales de la longueur et la largeur des trachéides. À n'importe quel âge

cambial, la longueur des trachéides augmente légèrement selon la hauteur de l'arbre pour atteindre une valeur maximale vers la mi-hauteur de l'arbre (Figure 6.A). 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 tendance à la diminution de la largeur des trachéides quel que soit l'âge cambial (Figure 3.6B).

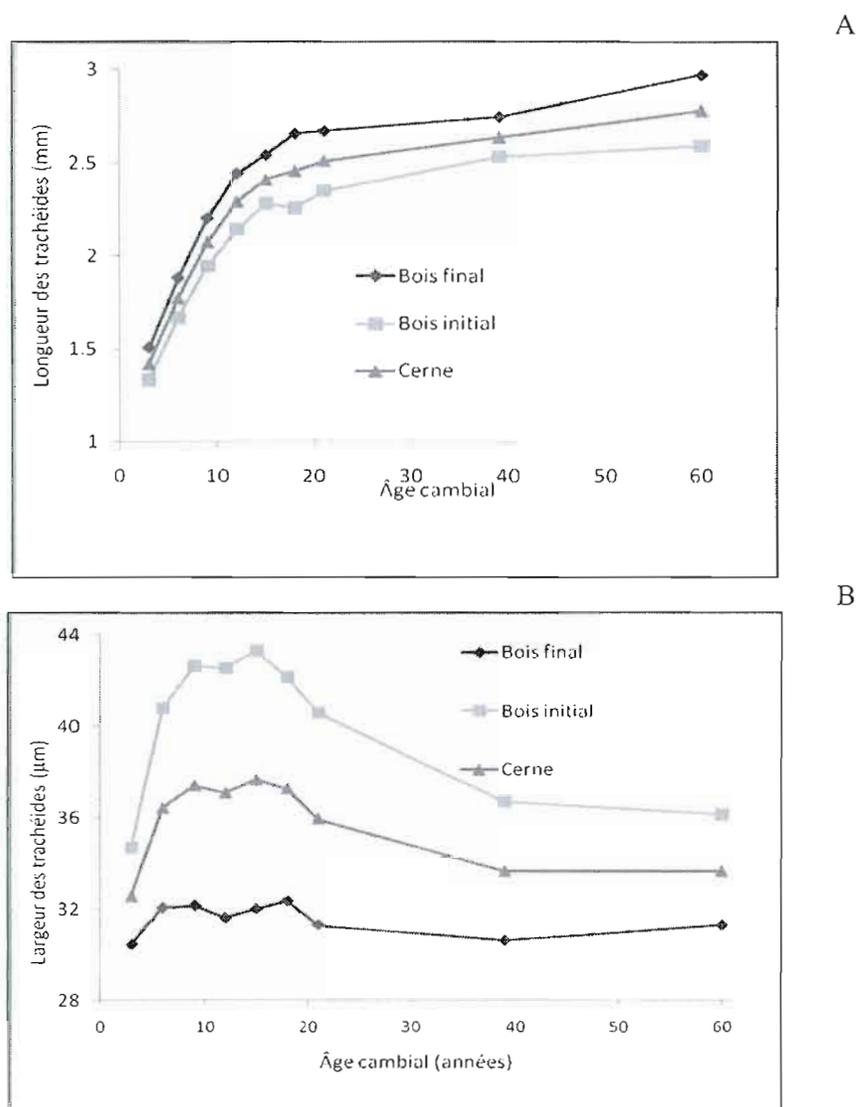


Figure 3.5 Variation radiale de la longueur (A) et de la largeur (B) des trachéides du pin gris au DHP (Hauteur = 1,3 m)

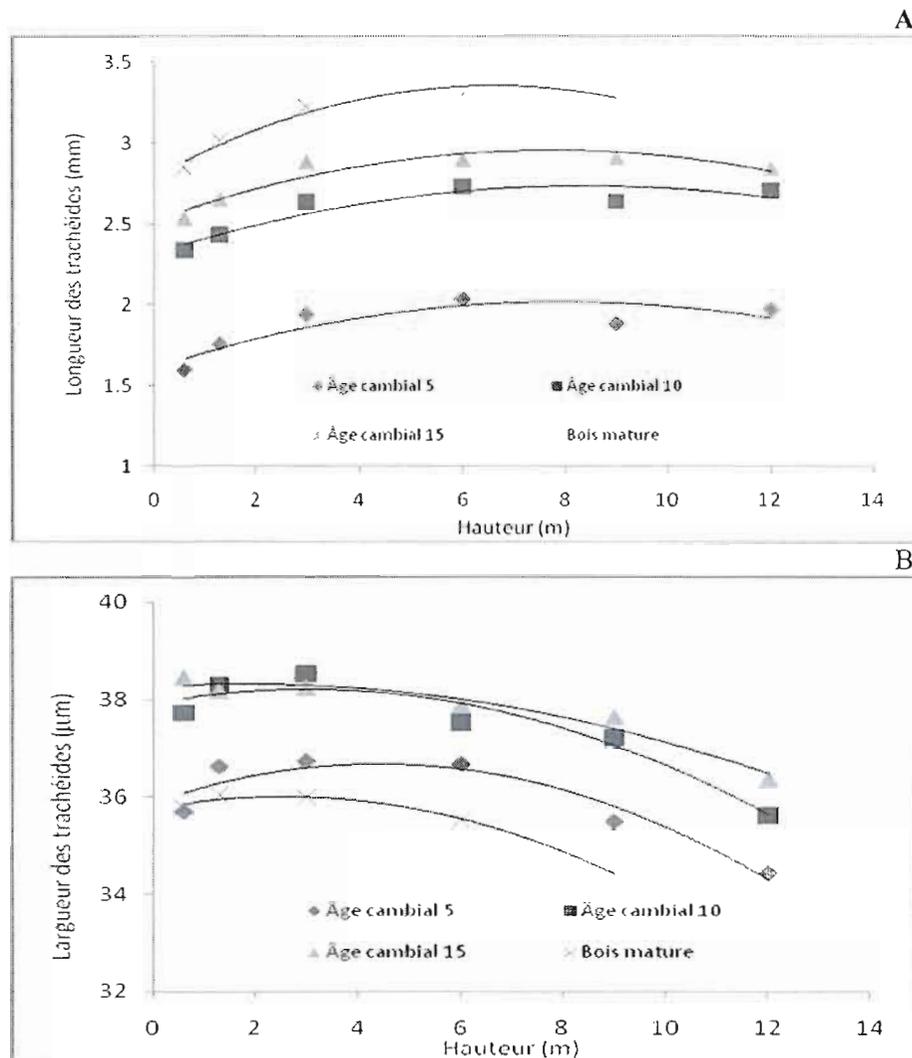


Figure 3.6 Variation longitudinale de la longueur (A) et la largeur (B) des trachéides du pin gris (le bois mature est la moyenne des âges cambiaux, 18, 25, 31)

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

L'étude de la variation intra-arbre a révélé clairement une variation importante des propriétés du bois à l'intérieur des arbres en termes de variation radiale et variation longitudinale. La plupart des propriétés varient peu dans le bois mature. Dans les 5 peuplements étudiés, les traitements d'éclaircie sont appliqués à un âge avancé, donc dans le bois mature. Par conséquent, la variation intra arbre est minime ce qui rend facile la tâche de détecter toute

variation due aux interventions sylvicoles dans les peuplements étudiés à une hauteur spécifique en bas du houppier.

Dans cette section, nous présentons les résultats des analyses de variance des effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance 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). 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 la 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 11 montre les variations de la longueur du bois initial (Figure 3.9A), du bois final (Figure 3.9B) et de la largeur des cernes du bois initial (Figure 3.9C) et du bois final (Figure 3.9D).

3.3.1. Effet de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale

L'analyse de variance (Tableau 3.3) révèle des effets significatifs des facteurs étudiés et de leurs interactions sur les propriétés du bois. Ainsi, les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final varient significativement avec le site, la hauteur dans l'arbre, le temps par rapport à la date du traitement et le traitement d'éclaircie. Par contre, l'effet du facteur aléatoire, l'arbre, n'est pas significatif.

L'effet significatif du site sur la croissance est prévisible considérant les différences entre les caractéristiques des sites et de l'âge des peuplements. L'effet de la hauteur sur la croissance radiale est également prévisible et concorde avec les résultats présentés à la section précédente (Figure 3.2).

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). Chez le pin gris de plantation, Savva et al. (2007, 2008) expliquent les variations des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final avec les années de croissance par les variations climatiques.

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

Source	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	459,4**	287,3**	606,9**	990,0**	3689**	5370**	2995**
Site (S)	349,9**	401,5**	50,1**	191,9**	18,2**	5,3**	141,9**
Hauteur (H)	256,3**	341,7**	39,5**	135,0**	279,1**	149,4**	24,9**
Temps (T)	34,3**	29,0**	29,0**	11,4**	32,7**	11,7**	19,3**
Éclaircie (E)	33,7**	29,0**	19,1**	32,5**	2,1 ^{ns}	15,3*	10,0**
Densité du peuplement (DP)	2,3 ^{ns}	2,7 ^{ns}	0,05 ^{ns}	38,4**	9,7**	0,2 ^{ns}	48,0**
SxH	37,4**	44,6**	10,8**	8,3**	8,8**	6,6**	6,0**
SxE	63,2**	61,6**	28,5**	27,8**	33,4**	29,7**	39,5**
TxE	7,0**	6,3**	4,2**	5,5**	1,8*	1,5 ^{ns}	4,5**
HxE	1,3 ^{ns}	0,7 ^{ns}	4,6**	3,3**	4,1**	2,3**	5,6**
	Estimations des paramètres de covariance (Valeur Z de Wald)						
Résidu	48,4**	48,0**	48,0**	48,0**	48,4**	48,0**	48,0**
Arbre	1,2 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,55 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,1 ^{ns}
	Analyse des contrastes au DHP (Valeur de F)						
Témoin vs EC modérée	8,4**	3,0**	Ns	Ns	Ns	ns	ns
Témoin vs EC forte	10,4**	6,9**	6,4*	Ns	Ns	ns	ns
Témoin Vs EC modérée et forte	12,6**	6,3**	6,1**	Ns	Ns	ns	ns
EC modérée vs EC forte	ns	ns	Ns	Ns	Ns	ns	ns
Avant éclaircie vs T=1	ns	ns	Ns	Ns	14,6**	3,8**	4,8**
Avant éclaircie vs T=2	32,3**	24,3*8	37,3*	Ns	Ns	ns	9,0**
Avant éclaircie vs T=3	65,9**	74,1**	52,6**	8,8**	8,8**	7,0**	ns
Avant éclaircie vs T=4	13,2**	23,8**	4,03*	19,8*	19,8*	ns	ns
Avant éclaircie vs T=5	54,0**	106,2**	29,4**	75,7**	75,7**	12,3**	13,0**

ns : effet non significatif au niveau de signification $\alpha=0,05$;

* : effet significatif au niveau de signification $\alpha=0,05$;

** : effet significatif au niveau de signification $\alpha=0,01$

Les résultats de l'analyse de variance indiquent que l'éclaircie commerciale a un effet significatif sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final. Ces propriétés augmentent suite aux traitements d'éclaircie (Figure 3.7). L'analyse des contrastes pour les données du DHP (Tableau 3.5) ne montre pas de différences significatives entre la réponse de ces propriétés à l'éclaircie forte et modérée. Ainsi, une éclaircie forte n'est pas nécessairement utile pour l'amélioration de la croissance radiale.

La réponse aux traitements d'éclaircie varie d'un site à l'autre comme l'indique l'interaction significative SxE. Nous observons des augmentations des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final dans les sites de Clericy, Duprat-est et Figuery. Par contre, on n'observe pas d'amélioration de la croissance radiale (largeurs du cerne, du bois initial et du bois final) par éclaircie dans les sites de Castagnier Nord et de Dollard (Figure 3.7). L'élargissement de la largeur des cernes du pin gris suite à l'éclaircie commerciale dans les sites de Clericy, Duprat-est et Figuery concorde avec les résultats des études antérieures sur le pin gris (Bella et De Franceschi, 1974; Barbour et al., 1994; Schneider, 2007).

La densité du peuplement, utilisée comme co-variable dans le modèle, n'a pas montré d'effets significatifs sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final. Ce résultat est surprenant. Parmi les explications plausibles à ce résultat, il y a la diversité des densités des peuplements entre les 5 sites de l'étude. En effet, la densité initiale diffère grandement entre les peuplements. De plus, le taux de prélèvement n'était pas constant d'un peuplement à un autre pour l'éclaircie modérée et forte. D'autres facteurs en lien avec le développement de la cime (Larson, 1967) pourront expliquer ces résultats. Ces facteurs n'ont pas été considérés dans la présente étude.

L'effet de l'interaction T x E significatif sur la croissance des cernes s'explique par le fait que l'effet de l'éclaircie varie d'une année à l'autre après le traitement. Cette affirmation est supportée par les résultats des analyses des contrastes (Tableau 3.3). En effet, la comparaison des moyennes des largeurs des cernes, du bois initial et du bois final avant et une année après le traitement ne montre aucune différence significative. Par contre, avec l'avancement dans le temps (T=2, T=3, T=4 et T=5) cette différence devient significative (Tableau 3.3).

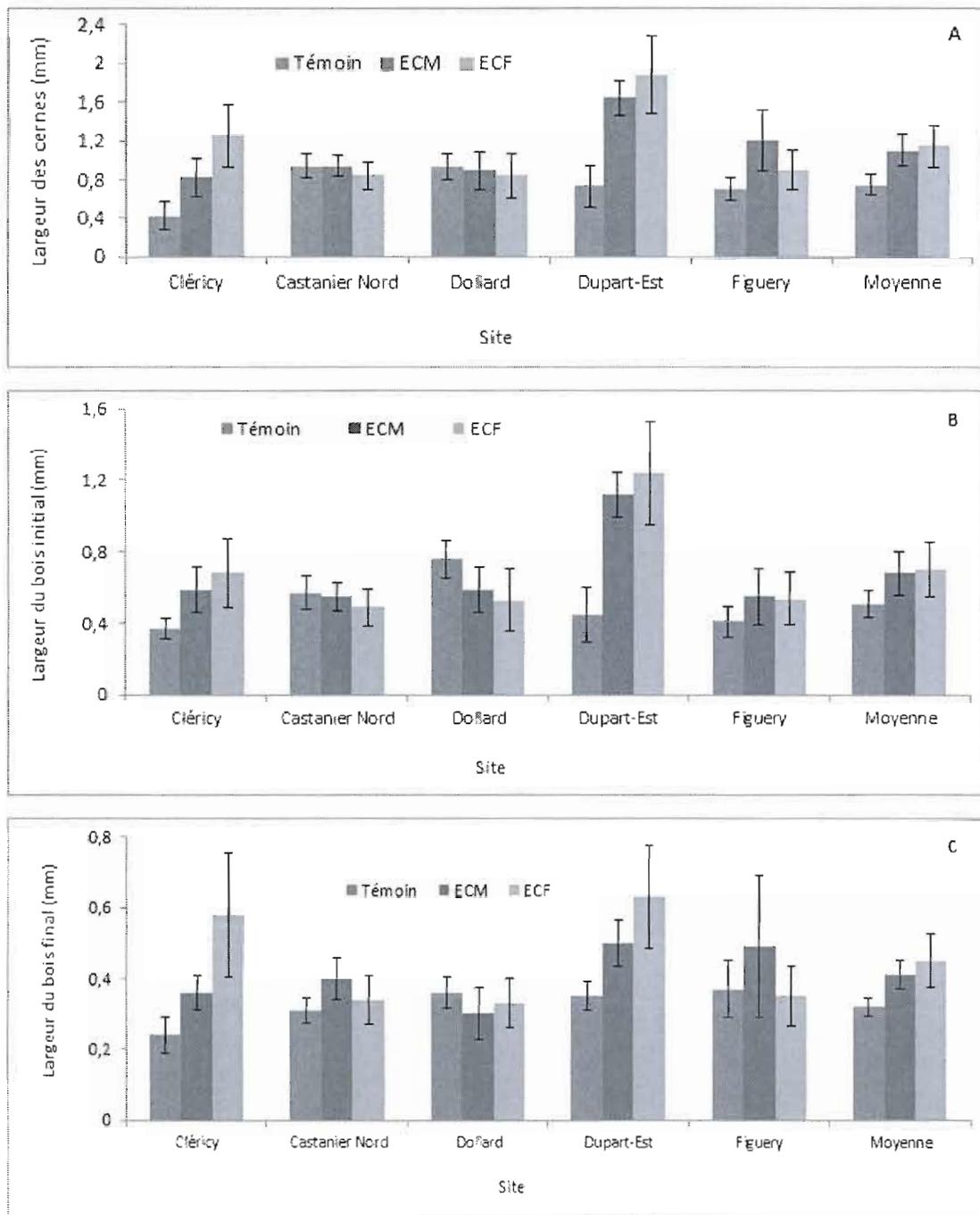


Figure 3.7 Variations de : A) la largeur des cernes; B) la largeur bois initial; et C) la largeur du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale dans cinq sites (ECM : éclaircie commerciale modérée; ECF : éclaircie commerciale forte).

L'interaction éclaircie hauteur (E x H) n'est pas significative pour la largeur du cerne et la largeur du bois initial. Ainsi, l'effet de l'éclaircie sur ces deux variables est le même quelle que soit la hauteur de l'arbre. Ce résultat est intéressant puisque l'accélération de la croissance par éclaircie n'est pas susceptible d'entraîner un défilement prononcé. Des analyses plus approfondies devront être entreprises pour confirmer cette hypothèse.

3.3.2. Effet de l'éclaircie commerciale sur la masse volumique du bois

L'analyse de variance (Tableau 3.3) révèle des effets significatifs des facteurs étudiés et de leurs interactions sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final. Ces dernières varient significativement en fonction du site, de la hauteur dans l'arbre, du temps par rapport à la date du traitement. L'effet de l'arbre (Facteur aléatoire) n'est pas significatif sur la masse volumique du cerne et ses composants.

L'effet du site sur la masse volumique du bois est prévisible considérant les différences entre les caractéristiques des sites et de l'âge des peuplements. L'effet de la hauteur sur la masse volumique concorde avec les résultats présentés à la section précédente (Figure 3.4).

L'effet du temps sur les masses volumiques 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). Savva et al. (2010) attribuent les variations de la masse volumique du bois et de ses composants du bois du pin gris avec les années de croissance aux variations climatiques.

Pour l'ensemble des sites, la moyenne de la masse volumique des échantillons issus des parcelles témoins et des deux traitements (éclaircie modérée et forte) n'est pas statistiquement différente (Tableau 3.3, Figure 3.8). Par contre, à l'intérieur des sites, la réponse aux traitements est différente comme l'indique l'effet significatif de l'interaction SxE (Tableau 3.3). En fait, la réponse aux traitements d'éclaircie varie d'un site à l'autre (Figure 3.8). Pour le site Cléricy, on ne remarque pas de tendance particulière. Les arbres témoins et

issus de l'éclaircie forte ont la même masse volumique. Par contre, la masse volumique des arbres issus de l'éclaircie modérée est supérieure aux deux autres parcelles. Pour les sites Castagnier Nord et Dollard, on observe une diminution de la masse volumique avec les traitements d'éclaircie. Pour le site Figuery, la masse volumique augmente légèrement suite à l'éclaircie alors que pour le site Duprat-Est, aucune variation de la masse volumique n'est observée. Par ailleurs, l'analyse des contrastes pour les données de masse volumique du cerne au niveau du DHP (Tableau 3.3) et autres hauteurs (résultats non présentés) ne montre pas de différences significatives entre les moyennes des arbres-témoins et issus des éclaircies fortes et modérées. Ce résultat contredit les résultats de Barbour et al. (1994) qui rapportent que les parcelles traitées par éclaircies produisent du bois d'une masse volumique bien inférieure à celle du bois des arbres de la parcelle témoin. Ce résultat est intéressant à la fois pour les utilisateurs du bois et les aménagistes forestiers étant donné que l'amélioration de la croissance par l'éclaircie n'est pas associée à des répercussions négatives sur la qualité et la valeur du bois notamment le rendement de pâte et les propriétés mécaniques du bois d'œuvre, deux propriétés étroitement liées à la masse volumique du bois (Zhang et Koubaa, 2009).

L'effet non significatif de l'éclaircie commerciale sur la masse volumique des cernes pourra s'expliquer en partie par les effets opposés de ce traitement sur les masses volumiques du bois initial et final. L'analyse de variance (Tableau 3.3) indique des effets significatifs de l'éclaircie sur ces deux propriétés. Ces effets sont caractérisés par une légère diminution de la masse volumique du bois initial (Figure 3.8B) et une légère augmentation du bois final (Figure 3.8C). Ainsi, ces effets opposés rendent l'effet sur la masse volumique du cerne nul.

Concernant les effets de l'intensité de l'éclaircie, l'analyse des contrastes ne montre pas des différences significatives entre les éclaircies fortes et modérées pour la masse volumique du bois initial et du bois final au niveau du DHP (Tableau 3.3). Pour les autres hauteurs, l'analyse des contrastes ne montre pas de différence significative entre les intensités fortes et modérée. Concernant, la différence des témoins et les intensités forte et modérée, les résultats ne sont pas consistants, à certaines hauteurs nous observons des différences significatives et dans d'autres non significatifs (Résultats non présentés).

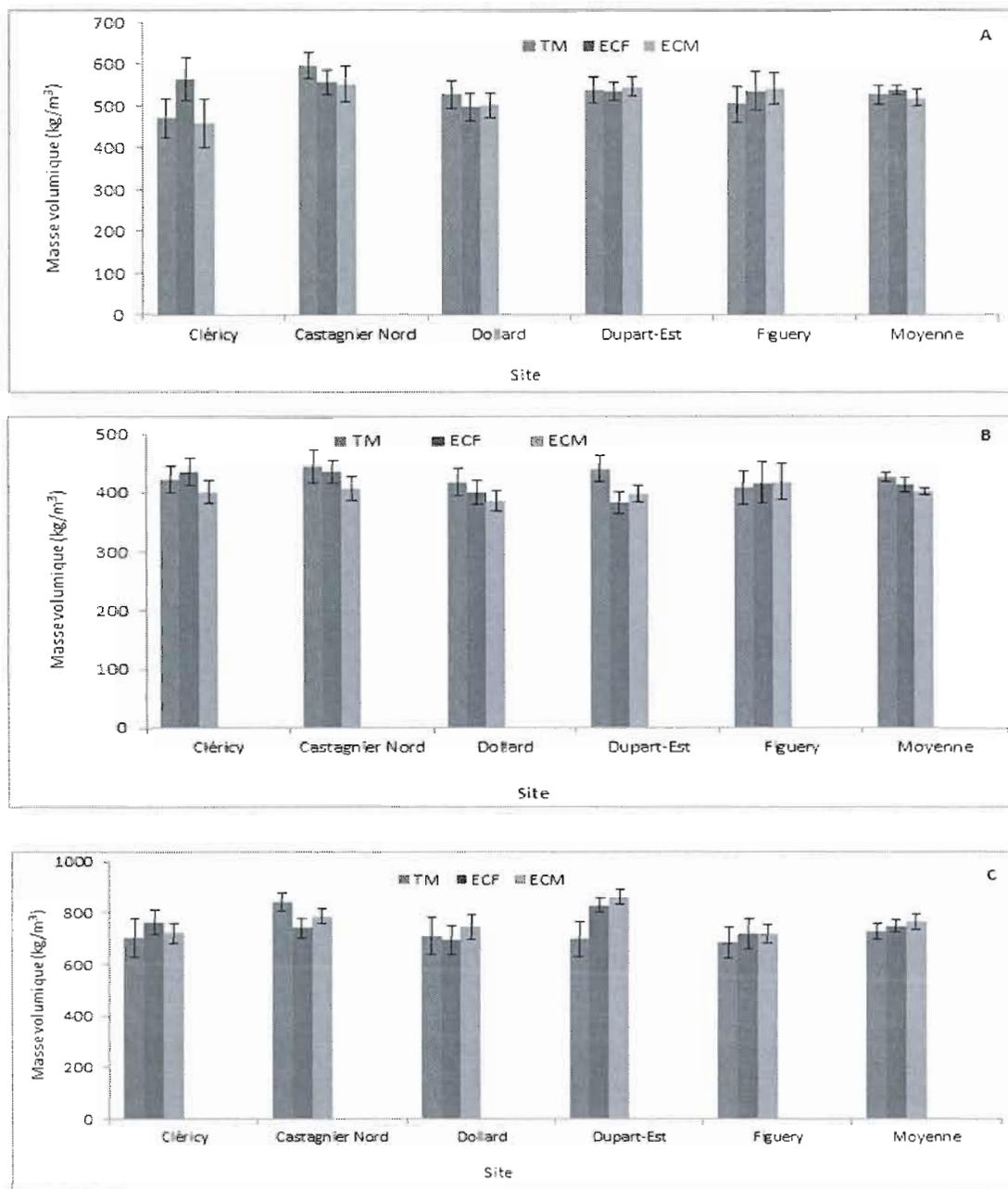


Figure 3.8 Variations de la masse volumique A) du cerne; B) du bois initial; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale dans 5 sites différents (ECM: éclaircie commerciale modérée; ECF: éclaircie commerciale forte; TM: témoin).

La densité initiale du peuplement, utilisée comme co-variable dans le modèle, a montré un effet significatif sur la masse volumique du cerne et du bois final (Tableau 3.3). L'effet de la densité initiale du peuplement sur la masse volumique du bois initial est non significatif.

Pour les masses volumiques du bois initial et du bois final, la réponse aux traitements d'éclaircie varie d'un site à l'autre comme l'indique l'interaction significative SxE. Pour le bois initial, on remarque une légère diminution avec l'intensité de l'éclaircie dans tous les sites à l'exception du site de Figury où cette propriété n'est pas affectée (Figure 3.8B). Pour la masse volumique du bois final, nous observons de légères augmentations suite à l'éclaircie dans 4 sites et une diminution dans le site de Castagnier Nord.

L'effet de l'interaction T x E est significatif sur les masses volumiques du cerne et du bois final s'explique par le fait que l'effet de l'éclaircie varie d'une année à l'autre après le traitement. Cette affirmation est supportée par les résultats des analyses des contrastes (Tableau 3.3). En effet, la comparaison des moyennes des masses volumiques avant et après le traitement montre généralement des différences significatives entre la masse volumique avant et après traitement. L'effet de l'interaction éclaircie hauteur (ExH) est significative pour les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final. Ce résultat indique que l'effet de l'éclaircie sur ces variables varie selon la hauteur dans l'arbre.

3.3.3. Effet de l'éclaircie commerciale sur la morphologie des trachéides

Le site montre un effet significatif sur les longueurs et les largeurs des trachéides du bois initial et du bois final (Tableau 3.4). Cependant, les variations de ces propriétés restent faibles et sans implications pratiques (Figure 3.9). Les longueurs moyennes des trachéides du bois initial et final variaient de 2,48 mm à 2,65 mm et de 2,76 mm à 2,92 mm, respectivement. Les largeurs des trachéides du bois initial et final variaient de 37,5 μm à 39,3 μm et de 30,8 μm à 32,4 μm , respectivement.

L'effet de l'arbre sur les propriétés morphologiques des trachéides est non significatif. L'effet

du temps, un facteur indicatif des fluctuations environnementales, est également non significatif sur la longueur des trachéides du bois initial et sur la largeur des trachéides du bois initial et du bois final. Par contre, le facteur temps montre un effet significatif sur la longueur des trachéides du bois final. Ce résultat indique cette propriété est sensible aux changements environnementaux.

Tableau 3.4 Synthèse des analyses de variance des effets du site, de l'arbre, de l'éclaircie commerciale, du temps et de la densité du peuplement sur la longueur et la largeur du bois initial et du bois final des trachéides du pin gris.

Source	Longueur		Largeur	
	Bois initial	Bois final	Bois initial	Bois final
	Test des effets fixes (Valeur de F)			
Constante	1353**	1238**	3353**	3671**
Site (S)	3,9**	4,1**	4,8*	4,6**
Temps (T)	1,0 ^{ns}	2,8**	0,0 ^{ns}	1,5**
Éclaircie (E)	0,1 ^{ns}	2,4 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,2 ^{ns}
Densité du peuplement	0,0 ^{ns}	4,5**	4,0**	0,5 ^{ns}
SxE	2,5**	2,9**	2,9**	1,6**
	Estimations des paramètres de covariance (Valeur Z de Wald)			
Arbre	0,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,9 ^{ns}
Résidu	13,2**	13,0**	13,1**	13,3**

ns : effet non significatif au niveau de signification $\alpha=0,05$; * : effet significatif au niveau de signification $\alpha=0,05$; ** : effet non significatif au niveau de signification $\alpha=0,01$

L'analyse de variance ne révèle pas d'effets significatifs de l'éclaircie sur les propriétés morphologiques des trachéides soient, les longueurs et les largeurs du bois initial et du bois final des trachéides (Tableau 3.4). Par contre, l'interaction site éclaircie est significative pour toutes les propriétés morphologiques des trachéides. Ce résultat indique que la réponse des propriétés morphologiques aux traitements d'éclaircie varie d'un site à l'autre (Figure 3.9).

La densité initiale du peuplement, utilisée comme co-variable dans le modèle, a montré un effet significatif sur la largeur des trachéides du bois initial et la longueur des trachéides du bois final (Tableau 3.4). Par contre, la densité initiale du peuplement ne montre pas d'effet significatif sur la longueur des trachéides du bois initial et le diamètre des trachéides du bois final (Tableau 3.4).

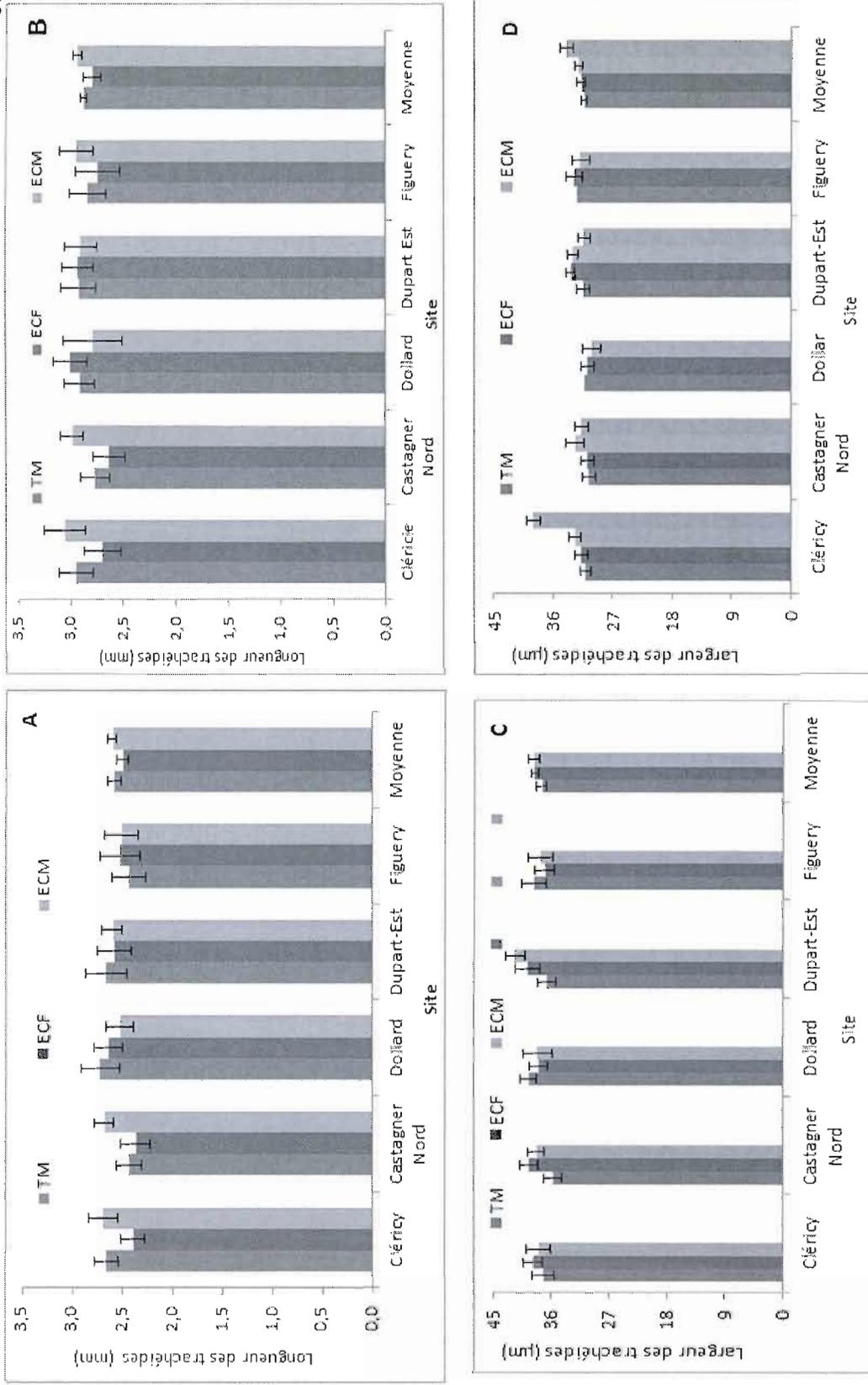


Figure 3.9 Variations de la longueur (A, B) et du diamètre (C, D) du bois initial et du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale dans cinq sites différents (ECM : éclaircie commerciale modérée; ECF : éclaircie commerciale forte).

Ces résultats montrent que l'éclaircie n'entraîne pas des variations significatives des propriétés morphologiques des trachéides. Par conséquent, nous estimons que l'effet de l'éclaircie n'a pas d'implications pratiques sur la qualité de la fibre du pin gris. L'utilisation du pin gris issus de peuplements qui ont subi des éclaircies commerciales pour des produits à base de fibres n'entraînera pas des impacts négatifs sur la qualité du produit fini.

On peut conclure à travers les différents travaux de recherche traitant de la morphologie des trachéides que l'éclaircie commerciale engendre un faible changement des propriétés des trachéides du bois. En effet, plusieurs études faites sur l'épinette de Norvège (Mäkinen et al. 2007; Mäkinen et al. 2002a ; Lindstrom, 1996c ; Herman et al.1998b ; Sirviö et Karenlampi, 2001; Tuula, 2008) révèlent qu'une croissance rapide causée par les éclaircies cause une faible diminution de la longueur des trachéides et une faible augmentation de leur diamètre (Helander, 1933). Ces conclusions ont amené Tuula (2008) à affirmer que l'impact des traitements d'éclaircies n'a presque aucun effet préjudiciable sur les propriétés morphologiques du bois.

De plus, Bowyer et al. 2007, indiquent que ces variations sont beaucoup moins importantes que celle de la variation de la dimension de la moelle vers l'écorce dans une même tige, car le développement des propriétés du bois est un processus complexe qui dépend de plusieurs facteurs génétiques, environnementaux, physiologique et le statut de l'arbre dans la canopée.

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

Dans cette section, nous présentons les résultats des analyses de variance des effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance et sur la masse volumique du bois (Tableau 3.5) et sur les longueurs et les largeurs des trachéides du bois initial et du bois final (Tableau 3.6). Les effets combinés de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la croissance (Figure 3.10), la masse volumique (Figure 3.11) et la morphologie des fibres (Figure 3.12) sont illustrés pour les sites étudiés. On illustre les variations de la largeur des cerne (Figure 3.10.A), du bois initial (Figure 3.10.B) et du bois final (Figure 3.10.C), de la masse volumique du cerne (Figure 3.11A), du bois initial (Figure 3.11B) et du bois final (Figure 3.11C) ainsi que la longueur des trachéides (Figure 3.12 A,B) du bois initial et du

bois final et la largeur des trachéides (Figure 3.12 C,D) du bois initial et final.

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

L'analyse de variance (Tableau 3.5) révèle des effets significatifs des facteurs étudiés et de leurs interactions sur les propriétés de croissance. Ainsi, les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final varient significativement avec le site, la hauteur dans l'arbre, le temps par rapport à la date du traitement et les traitements d'éclaircie et de fertilisation. Par contre, l'effet du facteur aléatoire, l'arbre, n'est pas significatif. Les résultats des effets des facteurs site, hauteur, le temps par rapport à la date du traitement d'éclaircie sur les 3 sites concorde avec les résultats de la section 3.3.1. L'effet significatif du site sur la croissance est prévisible considérant les différences entre les caractéristiques des sites et de l'âge des peuplements. L'effet de la hauteur sur la croissance radiale est également prévisible et concorde avec les résultats présentés à la section précédente (Figure 3.2). L'effet hautement significatif du temps sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final s'explique par les variations dues aux conditions environnementales (précipitations, températures) et physiologiques (âge cambial) tel que rapporté par Savva et al. (2007, 2008).

L'effet de la fertilisation sur la croissance est significatif et caractérisé par des améliorations des largeurs du cerne (Figure 3.10A), du bois initial (Figure 3.10B) et du bois final (Figure 3.10C). Ce résultat concorde avec les résultats des études antérieures qui rapportent une réponse très significative de la croissance radiale du pin gris à la fertilisation azotée (Weetman et Algar 1974; Morrison et al. 1977; Bernier et Camiré 1981). Ces travaux expliquent la réponse de la croissance radiale à la fertilisation par l'augmentation de l'épaisseur du bois initial (Klem 1972, 1974; Saikku 1975a,b; Kukkola et Saramäki 1983; Kenk et Fisher, 1988; Lindström 1996; Mäkinen et al. 2002 b; c). Par contre, cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée dans ce travail (Tableau 3.7). En effet, la fertilisation ne montre aucun effet significatif sur la largeur des fibres.

L'effet significatif de l'interaction site fertilisation indique que l'effet du traitement de fertilisation n'est pas le même dans les 3 sites. En effet, les illustrations de la figure 3.10

montrent qu'en général le traitement de fertilisation augmente les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final. Par contre, l'amplitude de cette augmentation diffère d'un site à l'autre. De la même façon, l'interaction significative entre les traitements d'éclaircie et de fertilisation indique que l'effet de la fertilisation n'est pas le même pour les 3 intensités d'éclaircie étudiées.

L'effet significatif de l'interaction triple site x fertilisation x éclaircie est plus compliqué à interpréter. Plusieurs explications sont plausibles cependant des études approfondies sont nécessaires pour expliquer ce résultat. Parmi les facteurs qui peuvent avoir un rôle dans ce résultat, notons les différences entre les densités des peuplements initiaux et après les traitements d'éclaircie. Une autre hypothèse pour expliquer ce résultat est que la fertilisation d'un site fortement éclaircie ne se traduit pas nécessairement par un gain dans la croissance. En effet, les illustrations de la figure 3.10 indiquent très peu ou pas d'effet de la fertilisation dans les sites dont l'éclaircie est forte.

Les interactions hauteur traitement (Éclaircie et fertilisation) sont généralement non significatives. Ce résultat indique que l'effet des traitements sur la croissance est similaire aux différentes hauteurs étudiées.

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

Les résultats des effets combinés de l'éclaircie et de la fertilisation sur la masse volumique sont présentés au Tableau 3.5. L'analyse de variance révèle des effets significatifs des facteurs étudiés ou de leurs interactions sur les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final. Ces propriétés varient significativement en fonction du site, de la hauteur dans l'arbre, le temps par rapport à la date des traitements, le traitement d'éclaircie et de fertilisation (Figure 3.11). L'effet de l'arbre (Facteur aléatoire) sur la masse volumique du cerne et ses composants n'est pas significatif.

L'effet du site sur la masse volumique du bois est prévisible considérant les différences entre les caractéristiques des sites et de l'âge des peuplements. L'effet de la hauteur sur la masse volumique concorde avec les résultats présentés à la section précédente (Tableau 3.5; Figure

3.4).

L'effet du temps sur les masses volumiques 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). Savva et al. (2010), attribuent les variations de la masse volumique du bois et de ses composants du bois du pin gris avec les années de croissance aux variations climatiques.

L'effet de l'éclaircie sur les masses volumiques du cerne et du bois initial est significatif (Tableau 3.5) et caractérisé par une légère diminution (Figure 3.11A; Figure 3.11B). Cependant, cet effet varie selon le site comme indiqué par l'interaction significative. L'effet significatif de l'éclaircie sur la masse volumique du cerne (Tableau 3.5) contredit celui trouvé dans l'analyse précédente conduite sur 5 sites (Tableau 3.5). Cette contradiction s'explique par le fait que contrairement à l'analyse précédente, la masse volumique montre la même tendance dans les 3 sites. Par ailleurs, l'effet de l'éclaircie commerciale sur la masse volumique du bois final est caractérisé par une légère baisse (Figure 3.11C).

L'effet de la fertilisation sur la masse volumique du cerne apparaît non significatif (Tableau 3.5). Par contre, l'interaction site fertilisation est significative. Ce résultat indique que l'effet de la fertilisation est non significatif, mais varie d'un site à l'autre. En effet, l'examen de la figure 13 indique que le traitement de fertilisation diminue la masse volumique moyenne dans les sites de Cléricy et de Catagnier Nord, mais a très peu d'effet sur celle de Dupart-Est.

Par ailleurs, la fertilisation a un effet significatif sur la masse volumique du bois initial (Tableau 3.5). L'interaction site x fertilisation est non significative indiquant que l'effet de la fertilisation est le même dans les 3 sites. En effet, dans les 3 sites on observe une diminution de cette propriété (Figure 3.11B).

L'analyse de variance montre l'effet de la fertilisation sur la masse volumique du bois final est hautement significatif (Tableau 3.5). L'interaction site x fertilisation est non significative indiquant que l'effet de la fertilisation est le même dans les 3 sites. D'une façon générale, la fertilisation diminue la masse volumique du bois final (Figure 3.11C). D'autre part, les interactions hauteur x fertilisations, éclaircie x fertilisation et site x éclaircie x fertilisation ne sont pas significatives pour les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final.

La densité initiale du peuplement, utilisée comme co-variable dans le modèle a montré un effet significatif sur la masse volumique du cerne et celle du bois final (Tableau 3.5). L'effet de la densité du peuplement sur la masse volumique du bois initial est non significatif.

La diminution de la masse volumique du bois avec les traitements combinés de fertilisation est en accord avec les résultats rapportés dans la littérature pour le pin sylvestre (Morling, 2001). Par contre, ils contredisent les résultats de Nyakuengama et al. (2001) pour le pin radiata qui indiquent que l'application des fertilisants au milieu de la rotation augmenterait la masse volumique du bois.

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

Les résultats des effets combinés de l'éclaircie et de la fertilisation sur les propriétés morphologiques des trachéides sont présentés au Tableau 3.6. Les résultats de ces analyses confirment les résultats trouvés dans les analyses précédentes en ce qui a trait aux effets des sites, de l'éclaircie, du temps, de la densité du peuplement et de l'arbre (Tableau 3.4) sur les propriétés morphologiques des trachéides.

Pour la longueur des trachéides du bois initial, les résultats de l'analyse de variance indiquent que les effets de l'éclaircie et de la fertilisation en facteurs principaux ne sont pas significatifs (Tableau 3.6). Par contre, l'interaction éclaircie site ainsi que l'interaction site éclaircie fertilisation sont significatives. Comme discuté dans les sections précédentes, la première interaction indique que l'effet de l'éclaircie est non significatif, mais diffère d'un site à l'autre. En fait, il n'y a pas de tendance claire dans la variation de la longueur des trachéides du bois initial avec les traitements (Figure 3.12A). Pour la moyenne des 3 sites, la longueur des trachéides est presque constante quel que soit le traitement. La même tendance est observée dans le site Dupart Est. Pour les deux autres sites, la fertilisation dans les sites non éclaircis diminue légèrement la longueur des trachéides du bois initial. Par contre, on n'observe pas de tendances pour les parcelles éclaircies (Figure 3.12A). Ces différences de réponse aux traitements dans les différents sites expliquent les interactions significatives obtenues malgré l'effet du facteur principal ne soit pas significatif.

L'interaction triple site x éclaircie x fertilisation est plus complexe à interpréter, mais indique que les effets des traitements d'éclaircie et de fertilisation sont significatifs, mais varient d'un site à l'autre. La réponse de la fertilisation varie en fonction du traitement d'éclaircie (Figure 3.12A). À titre d'exemple, dans le site Cléricy la combinaison de l'éclaircie modérée et de la fertilisation ne change pas la longueur moyenne des trachéides du bois initial. Par contre, la combinaison des traitements éclaircie forte et fertilisation diminue substantiellement la longueur moyenne des trachéides du bois initial. (Figure 3.12A). Dans le site de Castagnier, un résultat contraire a été obtenu. L'éclaircie modérée et la fertilisation ont diminué la longueur moyenne des trachéides du bois initial alors que le traitement combiné de l'éclaircie forte et de la fertilisation ne change pas la longueur moyenne des trachéides du bois initial.

Concernant la longueur des trachéides du bois final, l'analyse de variance indique des effets significatifs du site, de l'interaction site x éclaircie et de l'interaction triple site x éclaircie x fertilisation (Tableau 3.6). Généralement, l'éclaircie entraîne une légère diminution de la longueur moyenne des trachéides du bois final (Figure 3.12B). L'interaction site x éclaircie indique que l'effet de l'éclaircie varie d'un site à l'autre. En effet, on observe que la longueur moyenne des fibres du bois final diminue avec le traitement d'éclaircie modéré dans les sites de Cléricy et de Castagnier Nord (Figure 3.12B). Par contre aucun effet de ce traitement n'est observé dans le site de Duprat Est.

L'interaction triple site x éclaircie x fertilisation (Tableau 3.6) est plus difficile à interpréter. Elle indique que la réponse aux traitements varie d'un site à l'autre et d'une intensité d'éclaircie à l'autre. À titre d'exemple, dans le site de Duprat-est, aucune variation de la longueur des trachéides du bois final n'est observée. Par contre, dans les sites de Cléricy et de Castagnier Nord, on observe de variations de la longueur des trachéides du bois final avec la fertilisation et cette variation est différente entre les sites et d'une intensité d'éclaircie à l'autre (Figure 3.12B).

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 cerne et de leurs composants

Source	Largeur du			Proportion du			Masse volumique du			
	Cerne	Bois initial	Bois final	bois final	Cerne	Bois initial	Bois final	Cerne	Bois initial	Bois final
	Test des effets fixes (Valeur de F)									
Constante	43,5**	32,0**	48,1**	31,5**	337,0**	434**	288,7**	337,0**	434**	288,7**
Site (S)	25,0**	47,5**	7,0**	297,2**	7,8**	10,3*	77,0**	7,8**	10,3*	77,0**
Hauteur (H)	4,9**	4,9**	4,2**	22,8**	2,1*	2,4*	2,7**	2,1*	2,4*	2,7**
Temps (T)	10,3**	7,0**	20,0**	7,4**	17,3**	8,6**	19,6***	17,3**	8,6**	19,6***
Éclaircie (E)	3,2*	2,7ns	0,6ns	5,9**	4,1*	3,7*	5,4**	4,1*	3,7*	5,4**
Fertilisation (F)	83,3**	76,9**	37,2**	30,6**	0,6ns	8,1**	15,1**	0,6ns	8,1**	15,1**
Densité du peuplement (DP)	0,7ns	0,7ns	0,5ns	3,5ns	0,1ns	1,1ns	3,8*	0,1ns	1,1ns	3,8*
SxH	9,6**	10,4**	6,1**	5,3**	7,1**	4,8**	4,9**	7,1**	4,8**	4,9**
SxF	29,8**	20,2**	39,6**	3,6**	0,1ns	0,1ns	0,9ns	3,6**	0,1ns	0,9ns
SxE	33,7**	24,6**	47,7**	11,6**	7,1**	6,3**	6,3**	7,1**	6,3**	6,3**
TxE	1,7*	1,4ns	1,9*	2,9**	0,6ns	2,4**	2,7**	0,6ns	2,4**	2,7**
HxE	0,9ns	0,8ns	3,3**	6,3**	2,2**	0,7ns	5,2**	2,2**	0,7ns	5,2**
HxF	2,0ns	2,0ns	2,0ns	5,2**	1,5ns	0,4ns	1,4ns	1,5ns	0,4ns	1,4ns
ExF	6,1**	3,8*	1,57ns	0,12ns	0,12ns	0,1ns	2,5ns	0,12ns	0,1ns	2,5ns
SxExF	7,2**	6,4**	9,3**	0,8ns	0,8ns	0,6ns	0,8ns	0,8ns	0,6ns	0,8ns
Résidu	39,5**	39,1**	39,1**	39,1**	39,5**	39,1**	39,1**	39,5**	39,1**	39,1**
Arbre	1,1ns	1,0ns	1,1ns	1,2ns	1,1ns	1,1ns	1,2ns	1,1ns	1,1ns	1,2ns
Estimations des paramètres de covariance (Valeur Z de Wald)										
Analyse des contrastes au DHP (Valeur de F)										
Témoin vs E modérée non fertilisé	8,4**	3,02*	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	Ns	ns
Témoin vs E forte non fertilisé	10,4**	6,9**	6,4*	6,4*	ns	Ns	ns	ns	Ns	ns
Témoin Vs E modérée et fertilisé	ns	Ns	ns	ns	4,5*	1258**	7,6**	4,5*	1258**	7,6**
Témoin vs E forte et fertilisé	7,14**	7,0**	ns	ns	n.s	4,1*	n.s	n.s	4,1*	n.s
E modérée et fertilisé vs E forte et fertilisé	11,2**	7,6**	ns	ns	n.s	n.s	5,0*	n.s	n.s	5,0*

ns : effet non significatif au niveau de signification $\alpha=0,05$;

* : effet significatif au niveau de signification $\alpha=0,05$

** : effet non significatif au niveau de signification $\alpha=0,01$

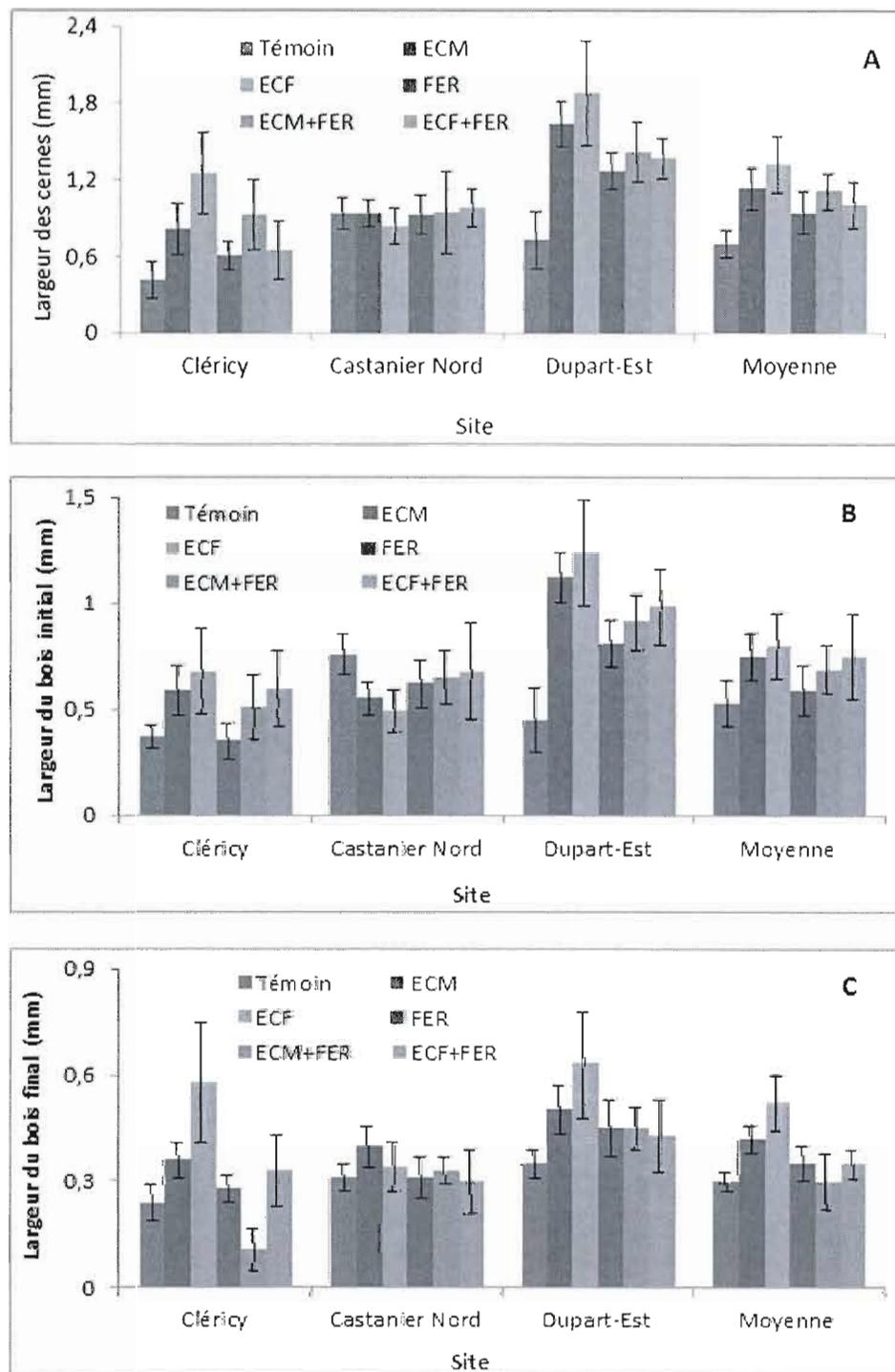


Figure 3.10 Variations de la largeur A) du cerne ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie de fertilisation dans trois sites (ECM : éclaircie commerciale modérée; ECF : éclaircie commerciale forte; FR: fertilisation)

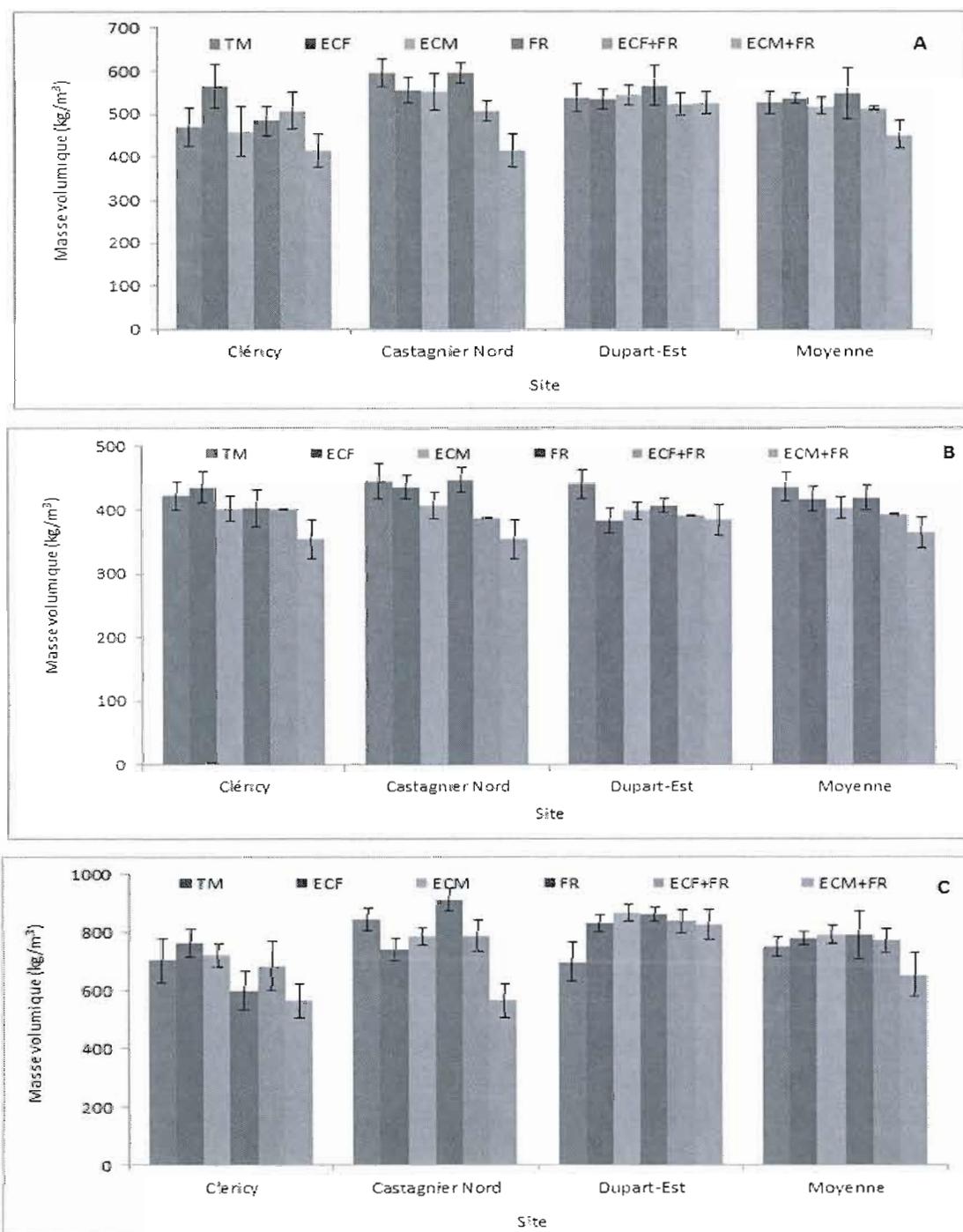


Figure 3.11 Variations de la masse volumique : A) du cerne ; B) du bois initial ; et C) du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale de fertilisation dans trois sites (ECM : éclaircie commerciale modérée; ECF : éclaircie commerciale forte; FR : fertilisation)

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 du pin gris à 1,3 m de hauteur.

Source	Longueur		Largeur	
	Bois initial	Bois final	Bois initial	Bois final
Test des effets fixes (Valeur de F)				
Constante	736,5**	701,9**	1933**	2353**
Site (S)	1,9 ^{ns}	0,9 ^{ns}	3,2*	0,3 ^{ns}
Temps (T)	1,2 ^{ns}	2,4*	1,2 ^{ns}	0,8 ^{ns}
Éclaircie (E)	0,7 ^{ns}	4,7**	1,0 ^{ns}	1,3 ^{ns}
Fertilisation (F)	0,2 ^{ns}	0,2 ^{ns}	2,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}
Densité du peuplement	0,1 ^{ns}	4,7**	3,0**	0,1 ^{ns}
SxE	5,7**	5,0*	0,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}
SxF	0,2 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}
ExF	0,8 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}
SxExF	2,9*	3,6**	0,8 ^{ns}	0,9 ^{ns}
Estimations des paramètres de covariance (Valeur Z de Wald)				
Arbre	0,8 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,9 ^{ns}
Résidu	10,2**	10,7**	10,8**	10,7**

ns : effet non significatif au niveau de signification $\alpha=0,05$

* : effet significatif au niveau de signification $\alpha=0,05$

** : effet non significatif au niveau de signification $\alpha=0,01$

Concernant la largeur des trachéides du bois initial et du bois final, les traitements d'éclaircie et de fertilisation et les interactions entre ces traitements et le site ne sont pas significatifs (Tableau 8). L'examen des figures 3.12C et 3.12D ne montrent pas de variations des largeurs des trachéides du bois initial et du bois final avec les traitements d'éclaircie et de fertilisation.

La variabilité de la réponse de la longueur des trachéides aux traitements combinés de l'éclaircie et de la fertilisation a été également rapportée chez le pin radiata (Nyakuengama et al. 2001) où les variations de la longueur trachéides ont varié en fonction des sites.

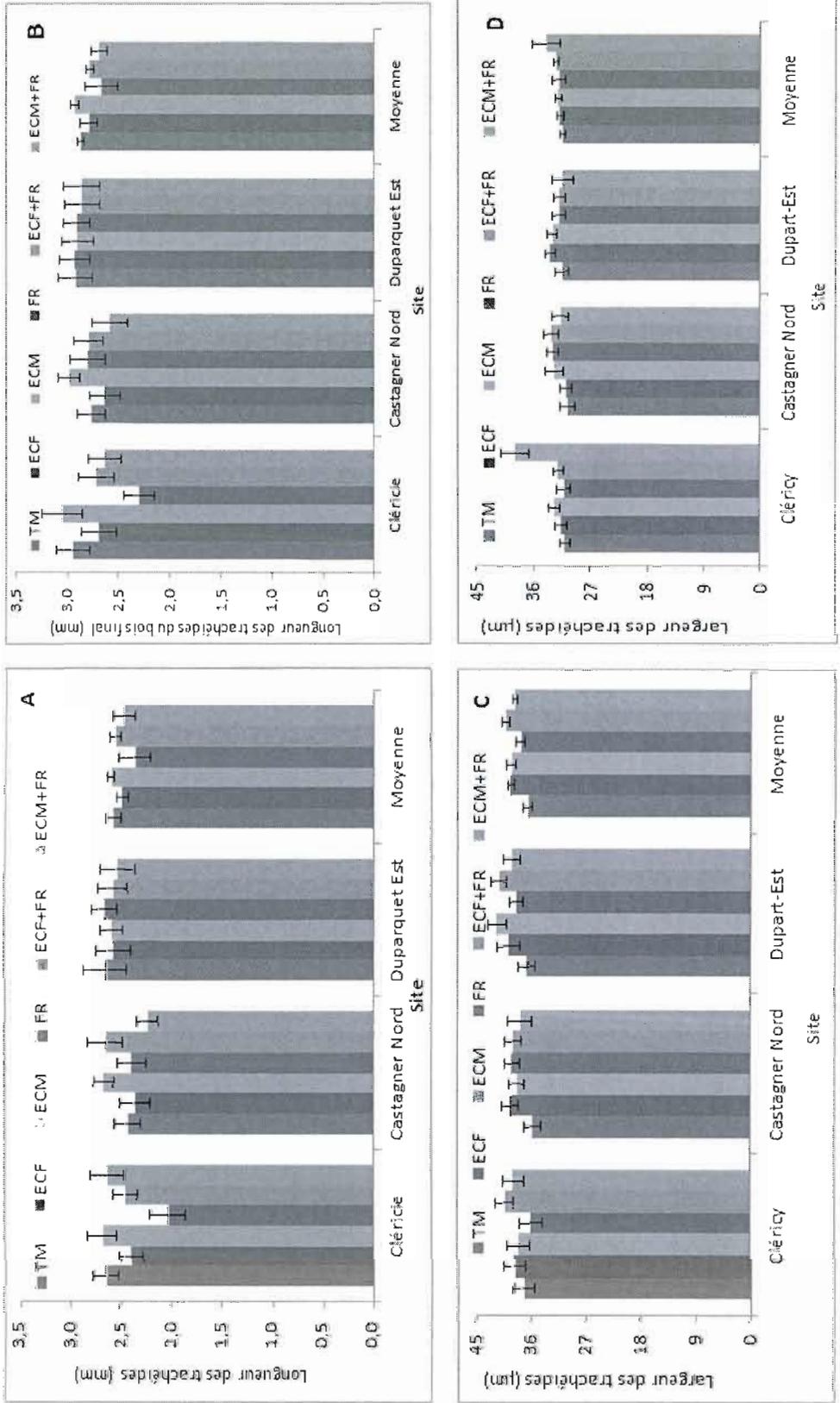


Figure 3.12 Variations de la longueur (A, B) et de la largeur des trachéides (C, D) du bois initial et du bois final avec les traitements d'éclaircie commerciale et de fertilisation dans trois sites (ECM : éclaircie commerciale modérée; ECF : éclaircie commerciale forte; FER : fertilisation)

CONCLUSION

Cette étude a permis d'établir les patrons des variations radiales et longitudinales : 1) des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final; 2) de la masse volumique du cerne et du bois initial et du bois final; 3) de la longueur des trachéides du cerne et du bois initial et du bois final. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- 1) Les variations radiales de la largeur du cerne et du bois initial sont caractérisées par une diminution importante dans la phase juvénile. Dans le bois mature, la largeur du cerne continue de diminuer linéairement avec l'âge cambial, mais à un rythme beaucoup plus faible que celui dans la phase juvénile. Le patron de variation du bois final est similaire, cependant l'amplitude de diminution dans la phase du bois juvénile est moins importante que celle du cerne et du bois initial. Par ailleurs, les largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final diminuent avec l'augmentation de la hauteur dans l'arbre. Pour la largeur du cerne du bois final, cette tendance est observée dans le bois juvénile et dans le bois mature. Par contre pour les largeurs du bois initial et du bois final, les tendances de variation dans le bois juvénile et dans le bois mature sont différentes. Dans le bois juvénile, les largeurs du bois initial et du cerne augmentent pour atteindre un maximum à la mi-hauteur puis diminuent par la suite.
- 2) La variation radiale de la masse volumique du cerne et du bois initial est typique de celle rapportée dans la littérature pour le pin gris 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. D'autre part, 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. Par contre, 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 augmentent linéairement avec la hauteur de l'arbre alors que dans le bois mature, elles diminuent linéairement avec la hauteur de

l'arbre. Dans le cas de la masse volumique du 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.

- 3) Les variations radiales des trachéides du bois initial et du bois final se caractérisent par une augmentation constante dans le bois juvénile. Dans le bois mature, les longueurs de trachéides atteignent un plateau. La variation radiale de la largeur des trachéides du bois en fonction de l'âge cambial est relativement faible. Cependant, son patron de variation est similaire à celui de la largeur des cernes annuels. Les trachéides sont étroites à proximité de la moelle, puis leur largeur augmente pour atteindre un palier entre les âges cambiaux de 10 et 18 ans suivi par une diminution constante pour atteindre un plateau dans le bois mature. Par ailleurs à un même âge cambial, la morphologie des trachéides varie très peu dans la direction longitudinale quoique des tendances se dégagent. À n'importe quel âge cambial, la longueur des trachéides augmente légèrement selon la hauteur de l'arbre pour atteindre une valeur maximale vers la mi-hauteur. La même tendance est observée pour la largeur des trachéides de la base de tige vers la mi-hauteur. De la mi-hauteur vers le sommet de l'arbre, on observe une tendance à la diminution de la largeur des trachéides, et cela quel que soit l'âge cambial.
- 4) L'effet de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale est hautement significatif. Les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final augmentent suite aux traitements d'éclaircie. Par contre, il n'y a pas de différence significative entre les intensités d'éclaircie. Ainsi, il a été conclu qu'une éclaircie forte n'est pas nécessairement utile pour améliorer la croissance.
- 5) La réponse des indicateurs de la croissance à l'éclaircie varie d'un site à l'autre. Dans deux des cinq sites de l'étude, il n'y a pas d'amélioration de la croissance suite à ce traitement. De plus, cette réponse varie d'une année à l'autre après le traitement. L'effet de l'éclaircie sur les largeurs des cernes est le même quel que soit la hauteur de l'arbre. Ainsi, l'accélération de la croissance par éclaircie n'est pas susceptible d'entraîner un défilement prononcé.

- 6) L'effet de l'éclaircie commerciale sur les masses volumiques du bois initial et du bois final est hautement significatif. Par contre, l'effet sur la masse volumique du cerne n'est pas significatif. L'effet de l'éclaircie commerciale sur la masse volumique du cerne est non significatif et a été expliqué par les effets opposés de ce traitement sur les masses volumiques du bois initial et du bois final. En effet, l'éclaircie diminue la masse volumique du bois initial, mais augmente celle du bois final. L'effet de l'éclaircie sur la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final varie d'un site à l'autre, entre les hauteurs et entre les années après le traitement.
- 7) L'éclaircie commerciale n'entraîne pas des variations significatives des propriétés morphologiques des trachéides et n'a pas d'implications pratiques sur la qualité de la fibre du pin gris.
- 8) L'effet de la fertilisation sur la croissance radiale est hautement significatif et est caractérisé par une amélioration des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final. Cependant, l'effet du traitement varie d'un site à l'autre et d'une intensité d'éclaircie à l'autre.
- 9) La fertilisation a un effet significatif sur la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final caractérisée par une diminution. Pour les masses volumiques du cerne et du bois initial, la diminution n'est pas la même dans les 3 sites de l'étude. Par contre, ce traitement a le même effet sur la masse volumique du bois final dans les 3 sites. L'effet de la fertilisation est le même quel que soit la hauteur dans l'arbre.
- 10) Les résultats des analyses de variance indiquent que l'effet de la fertilisation sur la longueur des trachéides est généralement significatif, mais varie selon le site et l'intensité de l'éclaircie. Par contre, l'effet de ce traitement sur la largeur des trachéides n'est pas significatif.
- 11) Les résultats montrent que la diminution de la masse volumique du bois et le changement de la morphologie des trachéides sont faibles comparativement à l'augmentation de la croissance des arbres. Ces faibles changements des propriétés physiques et anatomiques dans l'arbre n'ont eu qu'un faible impact sur la qualité marchande du bois et n'ont pas d'implications pratiques

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, H.L., 2000. Silvicultural treatments to enhance productivity. In: J. E. Obe, The forests handbook. Oxford. Malden, MA, USA. pp. 129-139.
- Alteyrac, J. 2005. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire *Picea mariana* (Mill) B.S.P. Thèse de doctorat. Université Laval. 108p.
- André, P.; Buchet, V.; Defayo, E.; Lhoir, P. et Reginster, P. 1994. Éclaircie en futaie résineuse. Fiche technique n 3. Ministère de la région Wallonne. Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement. 37p.
- 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. pp54-62.
- Aussenac, G.; Granier A. et Naud R. 1984. Éclaircies systématiques dans un jeune peuplement de Douglas fir. Modifications microclimatiques et influences sur la croissance. Revue forestière française. 36: 279-288.
- Ballard, L.A. et Long J.N. 1988. Influence of stand density on log quality of lodgepole pine. Can. J. For. Res. 18: 911-916.
- Bannan, M.W. 1967. Anticlinal divisions and cell length in conifer cambium. Forest Prod. J. 17 (6): 63-69.
- Bannan, M.W. 1970. A survey of cell length and frequency of multiplicative divisions in the cambium of conifers. Can. J. Bot 48 : 1585-1589.
- Bannan, M.W. 1960. Cambial behaviour with reference to cell length and ring width in *Thuja occidentalis* L. Can. J. Bot. 38 : 177-183.

- 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 (12) : 2439-2447.
- Bell, F.W.; Bastarache, P.J. et Meyer, L. 1997. Jack pine fertilization : A review of the littérature. Ont. Min.Nat.Resour., Northwest sci. Technol. Thunder Bay, Ont. TR-111.18p
- Bella, L.E. et De Franceschi, J.P. 1974. Analysis of jack pine thinning experiments, Manitoba and Saskatchewan. Dept. Environment. Canadian Forestry Science. Publication No 1338.
- Bernier, C. et Camiré, B. 1981. Fertilisation azotée en forêt de pin gris (*Pinus banksiana*) II. Variations de la masse foliaire et des éléments nutritifs du feuillage de pin gris et de quelques espèces du sous-bois. Can. J. For. Res. 11(2): 423-432
- Berry, A.B. 1971. Stem form and growth of plantation red pine 30 years after heavy thinning. Information report PS-X-24. Can. For. Ser. Department of fisheries and forestry. 13p.
- Biblis, E. J.; Carino, R. et Brinker H.F. 1997. Flexural properties of lumber from two 40-year-old loblolly pine plantations with different stand densities. Wood Fiber Sci. 29(4): 375-380.
- Biblis, E.J.; Carino, H.F.; Brinker, R. et Mckee, C.W. 1995. Effect of stand density on flexural properties of lumber from two 35-year-old loblolly pine plantations. Wood Fiber Sci. 27(1): 25-33.
- Bisset, I. J. W.; Dadswell, H. E. et Wardrop, A. B. 1951. Factors influencing tracheid length in conifer stems. Austral. Forestry. 15: 17-30.
- Bisset, I. J. W. et Dadswell. H. E.1949. The Variation of Fibre Length within one Tree of *Eucalyptus regnans*. Aust. For. 13 (2): 86-96.
- Briggs, D.G. et Smith, W.R. 1986. Effect of silvicultural practices on wood proprieties of conifers. A review. In Douglas fir: stand management for the future. C, Olivier, D. Hanley and J. Johnson (Eds). University of Washington Press. Seattle. pp 108-117.
- Brix, H. 1972. Nitrogen fertilization and water effects on photosynthesis and earlywood - latewood production in Douglas fir. Can. J. For. Res. 2: 467-478.

- 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.
- Bowyer, B. J.; Shmulsky, R. et Haygreen, J. G. 2007. *Forest products and wood science. An Introduction*. 5th Ed., Blackwell publishing.
- Bues, C.T. 1985. Influence of stand density and thinning on the wood density of South African *Pinus radiata*. *Holz. Roh. Werkst.* 43(2): 69-73.
- Burton, J.D. 1981. Thinning and pruning influence glaze damage in a loblolly pine plantation. Research Note SO-264, U.S.D.A. Forest Service. 4 p.
- Comité consultatif scientifique pour le manuel d'aménagement forestier (CCSMAF). 2003. *Éclaircie commerciale pour la production prioritaire SEPM. Avis scientifique*. 80 p.
- Chalk, L. 1930. Tracheid length with special reference to Sitka spruce (*Picea sitchensis Carr.*). *J. Forestry*. 4:7-14.
- Chui, Y.H. et Zhang S.Y. 1997. Non-destructive evaluation of wood quality in Jack Pine family tests. CTIA/IUFRO workshop. Timber management toward wood quality and end-product value. II.25-II.29. August 18-22.
- Clark, A.; Saucier, J.R.; Baldwin, V.C. et Bower, D.R. 1994. Effect of initial spacing and thinning on lumber grade, yield, and strength of loblolly pine. *For. Prod. J.* 44(11/12): 14-20.
- Cloutier, A. 2005. *Laboratoire d'anatomie du bois avancée SBO-66409, documents de laboratoire, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Hiver 2005*.
- 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.
- Cown, D.J. 1980. Radiata pine: Wood age and wood property concepts. *New Zealand J. of For. Sci.* 10:504-507.
- Cown, D. J. et McConchie, D.I. 1981. Effects of thinning and fertilizer application on wood properties of *Pinus radiata*. *New Zealand J. For. Sci.* 11: 79-91.
- Cregg, B.M.; Dougherty, T.C. et Hennessey, P.M. 1988. Growth and wood quality of young loblolly pine trees in relation to stand density and climatic factors. *Can. J. For. Res.* 18:

851-858.

- Curtis, R.O. et Marshall, D.D. 2002. Levels-of-growing-stock cooperative study in Douglas fir: Report no. 14- Stampede Creek: 30 year results. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Research Paper PNW-RP-543. 77 p.
- Cyr, G. 2002. L'élagage des résineux. Contexte, effets et modalités. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 475, 28 p.
- Cyr, G. 2006. Élagage et qualité du bois : inspirons-nous de la nature pour hâter son œuvre. N 3. Juin. Avis de recherche forestière.
- Dadswell, H.E. et Wardrop, A.B. 1960. Some aspects of wood anatomy in relation to pulping quality and to tree breeding. J. Austral. Pulp and Paper Ind. Tech. Assoc. 13: 161 -173.
- Day, R.J. et Nanang, D.M. 1997. Principles of thinning for improved growth, yield and economic profitability of lodgepole and jack pine. Proceedings of a commercial thinning workshop, White court, Alberta, October 17- 18.
- Deslauriers, A.; Morin, H.; Urbinati, C. et Carrer, M. 2003. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Québec (Canada). Trees 17:477–484.
- 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. TIA/IUFRO workshop. Timber management toward wood quality and end-product value. Ages IV.45-IV.50. Août 18- 22.
- Dinwoodie, J.M. 1965. The relationship between fiber morphology and paper properties: A review of literature. Tappi J. 48 : 440- 447.
- Drapeau, C. 2005. Effets de l'éclaircie commerciale sur la structure et la composition végétale des peuplements naturels de pin gris mémoire de maîtrise en biologie. Université du Québec à Montréal - Université du Québec en Abitibi Témiscamingue. 121p.
- Duff, G.H et Nolan, N.J. 1953 Growth and The controls of cambial and apical morphogenesis in the canadian forest species.I. The controls of cambial and apical activity in *Pinus resinosa* Ait. Can. J. Bot 31 : 471-513

- Dutilleul, P.; Herman, M. et Avella-Shaw, T. 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce. *Can. J. For. Res.* 28: 56-68.
- Echols, R.M. 1958. Variation in tracheid length and wood density in geographic race of Scotch pine. *Yale University. School of Forestry Bulletin.* 64:1-52.
- Echols, R.M. 1955. Linear relation of fibrillar angle to tracheid length, and genetic control of tracheid length in slash pine. *Tropical Woods* 102: 11-22.
- 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.
- Farrar, J.L. 1961. Longitudinal variation in the thickness of the annual ring. *For. Chron.* 37: 323-330.
- Farrar, J.L. 1998. *Trees in Canada.* [CD-ROM]. Fitzhenry & Whiteside, Markham, Ont
- Fight, R.D.; et Fahey, T.D. et Johnston, S. 1991. Timber quality and pruning: an analysis of management regimes for the Siuslaw National Forest. Dans: MURPHY, D. (éd.). *National Silviculture Workshop. Getting to the future through silviculture. Workshop Proceedings.* 6-9 mai. Cedar City, Utah. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, Gen. Tech. Rep. INT 291.p.93-95.
- Fleming, R.L.; Mossa, D.S. et Marek, G.T. 2005. Upland black spruce stand development 17 years after cleaning and pre commercial thinning. *The forestry chronicle* 81: 31-4.
- Giordano, E. 1970. Interaction de la sélection et de la culture intensive. *Revue internationale des forêts et des produits forestiers.* FAO - L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Vol 24: 97-98.
- Gooding, J.W. et Smith, W.H. 1972. Effects of fertilization on stem, wood properties and pulping characteristics of slash pine (*Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm.). *Proceedings of a Symposium on the Effect of Growth Acceleration on the Properties of Wood,* Madison, WI, November 10-11, 1971. USDA. For. Sery. For. Prod. Lab. pp. E1-18
- Grenier, Y. 2004. Éclaircie commerciale dans les peuplements de pin gris : dendrométrie, diversité et écophysologie. 6^{ième} colloque de la Chaire AFD. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec.

- Greyer, W.A. et Gilmore, A.R. 1965. Effect of spacing on wood specific gravity in loblolly pine in southern Illinois. Agric. Exp. Stat. Note 113, Urbana, IL: Univ. of Illinois. 5 p.
- Grigal, D.F. et Sucoff, E.I. 1966. Specific gravity variation among thirty jack pine plot. Tappi J. 49: 497-498
- Herman, M.; Dutilleul, P. et Avella-Shaw, T. 1998a. Intra-ring and inter-ring variations of tracheid length in fast grown versus slow-grown Norway-spruce. IOWA J. 19 :3-23.
- Herman, M.; Dutilleul, P. et Avella-Shaw, T. 1998b. Growth rate effects on temporal trajectories of ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Wood Fiber Sci. 30(1): 6–17.
- Hilt, D.E. 1979. Diameter growth of upland oaks after thinning. Res. Pap. NE-437. Broomall, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North eastern Forest Experiment Station. 12p.
- Hofgaard, A.; Tardif, J. et Bergeron, Y. 1999. Dendroclimatic response of *Picea mariana* and *Pinus banksiana* along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. Can. J. For. Res. 29:1333–1346.
- Isebrands, J.G. et Hunt, C.M. 1975. Growth and wood properties of rapid-grown Japanese larch. Wood Fiber 7:119-128.
- Jaakkola, T.; Mäkinen, H. et Saranpää, P. 2005. Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. Can. J. For. Res.35: 1767-1778.
- Janas, P.S. et Brand, D.G.1988. Comparative growth and development of planted and natural stands of jack pine. For. chron. 64: 320-328.
- Jobidon, R. 2000. Density-dependent effects of northern hardwood competition on selected environmental resources and young white spruce (*Picea glauca*) plantation growth, mineral nutrition, and stand structural development- a 5-year study. For. Ecol. Manag. 130: 77-97.
- Jozsa, L.A. et Middleton, G.R. 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois. Nature et conséquences pratiques. Forintek Canada Corp. 42p.
- Keith, C.T. 1986. Defining wood quality, what is important? In: Proceeding of wood quality considerations in tree improvement programs, a workshop held in Québec City, pp. 21-

- Keller, R. et Thiercelin, F. 1984. L'élagage des plantations d'épicéa commun et de Douglas. Rev. For. Fr. XXXVI(4) : 289-302. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/21739>
- Kellison, R.C.; Lea, D.J. et Frederick, R. 1983. Effect of silvicultural practices on wood quality of southern hardwoods. Tappi J. 66 (1): 67-69.
- Kenk, G. et Fischer, H. 1988. Evidence from nitrogen fertilization in the forests of Germany. Environ. Pollut. 54: 199-218.
- Kladtke, J. 2003. Thinning experiment Norway spruce 337, Pfalzgrafenweiler. Silvicultural results and conclusions. 174: 31-41. February.
- Klem, G. 1972. The influence of fertilization of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and pine (*Pinus sylvestris* L.) on summerwood percent, specific gravity and extractive content. [In Norwegian with English summary.] Nor. Skogforsöksves. Medd. 122: 283-324.
- Klem, G. 1974. Properties of wood from fertilized forests. [In Norwegian with English summary.] Norsk Tretek. Inst. Medd. 51.
- Klem, G.S. 1968. Quality of wood from fertilized forests. Tappi J. 51(11):99-103.
- 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.
- Krause, C. ; Bouazara, M. ; Zhang T. ; Côté, D. et Morin, H. 2002. Mise au point d'un outil de prédiction de la qualité du bois après traitement d'éclaircie précommerciale et commerciale. Projet de recherche 2002-2006. Fonds de la recherche forestière du Saguenay-Lac St Jean.
- Kukkola, M. et Saramäki, J. 1983. Growth response in repeatedly fertilized pine and spruce stands on mineral soils. Commun. Inst. For. Fenn. 114. Larocque, G.R. et Marshall, P.L. 1994. Wood relative density development in red pine (*Pinus resinosa* Ait.) stands as affected by different initial spacings. *Forest Science*, 41(4): 709-728.
- Larson, P.R. 1973. Evaluating the quality of fast grown coniferous wood. Actes de la 63rd. West. For. Conf. pp56-58.
- Larson, P.R. 1967. Silvicultural control of the characteristics of wood used for furnishes.

Tappi J. 50:143-151.

Larson, P.R. 1969. Wood formation and the concept of wood quality. School of forestry. New Haven. Yale University. Bulletin N° 74. 54 pages.

Larson, P.R. 1962. A biological approach to wood quality. Tappi J. 45:443-448.

Law, K.N. et Valade, J.L. 1997. Effect of wood quality on thermomechanical pulping: A case study on black Spruce and jack pine. CTIA/IUFRO international wood quality workshop. Quebec city, Canada. Timber management toward wood quality and end-product value. Chapter VII. pp 3-7.

Liechty, H.O.; Reed, D.D. et Mroz, G.D. 1988. An interim economic comparison of thinning treatments in a high site quality red pine plantation. North. J. Appl For. 5: 211-215.

Lindström, H. 1996. Basic density in Norway spruce. Part I. A literature review. Wood Fiber Sci. 28: 15-27.

Lundgren, A.L. 1981. The effect of initial number of trees per acre and thinning densities on timber yields from red pine plantations in the lake states. Research paper. NC 193 USDA Forest service. 25p.

Migneault, S.; Koubaa, A.; Erchiqui F.; Chaala, A.; Englund, K. ;Krause, C. et Wolcott, M. 2008. Effect of fiber length on processing and properties of extruded wood-fiber/HDPE Composites. J Appl Polym Sci 110:1085-1092.

Magnussen, S. et Keith, C. T. 1990. Genetic improvement of volume and wood properties of jack pine: selection strategies. For. Chron. 66: 281-286.

Mäkinen, H. et Isomäki, A., 2004a. Thinning intensity and long-term changes in increment and stem form of Scots pine trees. For. Ecol. Manage. 203:21-34

Mäkinen, H. et Isomäki, A., 2004b. Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. For. Ecol. Manage. 201, 311-325

Mäkinen, H.; Saranpää, P. et Linder, S. 2002a. Wood density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fiber dimensions. Can. J. For. Res. 32: 185-194.

Mäkinen, H.; Saranpää, P. et Linder, S. 2002b. 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. 2002c. Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holzforschung* 56 : 449- 460.
- Mäkinen, H. 1999. Growth, suppression, death, and self-pruning of branches of Scots pine in southern and central Finland. *Can. J. For. Res.* 29: 585-594.
- Mäkinen, H.; Jaakkola, T.; Saranpää, P. et Piispanen R. 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *For. Ecol. Manag.* 241(1–3): 175–188.
- Marton, R.; Stairs, S.G.R. et Schreiner, E. J. 1968. Influence of growth rate and clonal effects on wood anatomy and pulping properties of hybrid poplars. *Tappi J.* 51: 230-235.
- 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.
- Megraw, R.A. et Nearn, W. T. 1972. Detailed DBH density profiles of several trees from Douglas fir fertilizer/thinning plots. Proc. Symposium on the effect of growth acceleration on the properties of wood. Forest Products Laboratory, Forest Service, Madison.
- Miranda, I.; Almeida, M.H ; et Pereira, H. 2001. Variation of fibre biometry in different provenances of *Eucalyptus globulus* Labill. *Appita J.* 54: 272–280.
- Miranda, I.; Almeida, M.H. et Pereira, H.. 2003. The influence of spacing on wood properties for *Eucalyptus globulus* Labill pulpwood. *Appita J.* 56: 140–143.
- Moorhead, D.J. 1997. Forest Fertilization Speakers Notes. Georgia Forestry Association Meeting. Cooperative Extension Service, Warnell School of Forest Resources, the University of Georgia, Athens, GA 30602 U.S.A.
- Moorhead, D.J. et Dickens, E.D. 2002. Fertilizing Pine Plantations. A County Agents' Guide for Making Fertilization Recommendations. Warnell School of Forest Resources, the University of Georgia, Athens, GA 30602 U.S.A. <http://www.bugwood.org/fertilization/csoillab.html>
- Morling, T. 2001. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. *Ann. For. Sci.* 59: 29-40.
- Morris, D.M.; Bowling, C. et Hills, S.C. 1994. Growth and form responses to pre commercial thinning regimes in aerially seeded jack pine stands: 5th year results. *For. Chron.*

70:780-787.

- Morris, D.M. et Parker, W.H. 1992. Variable-quality form in mature jack pine stands: quantification and relationship with environmental factors, *Can. J. For. Res.* 22: 279–289.
- Morrison, I.K.; Swan, H.D.; Foster, N.W. et Winston, D.A. 1977. Ten-year growth in two fertilization experiments in a semimature jack pine stand in northwestern Ontario. *For. Chron.* 53:142-146.
- Neilsen, W.A. et Pinkard, E.A. 2003. Effects of green pruning on growth of *Pinus radiata*. *Can. J. For. Res.* 33: 2067-2073.
- Newnham, R.M. 1965. Stem form and the variation of taper with age and thinning regime. *Journal of forestry* 38: 218-224.
- Nyakuengama, J.G.; Nambiar, E.K.S. et Downes, G.M. 2001. A critical review of the effect of thinning and fertilizer application on radiata pine wood properties with particular reference to later-age stands. CSIRO-Div. For. Report.
- Olesen, P.O. 1977. The variation of the basic density level and tracheid width within the juvenile and mature wood of Norway spruce. *For. Tree Improv.* 12: 1–21.
- Olesen, P.O. 1982. The effect of cyclophysis on tracheid width and basic density in Norway spruce. *Forest Tree Improvement* 15: 1–80.
- Olivier, C.D. et Larson, B.C. 1996. *Forest stand dynamics : Update edition*. New York : John Wiley and sons, Inc. 540 p.
- Ollinmaa, P.J. 1959. Study on reaction wood. *Acta For. Fenn.* 72, 1-54. (English summary).
- Panshin, A. J. et de Zeeuw, C. 1980. *Textbook of wood technology*. Co, McGraw-Hill Book. New York City. 772 pp.
- 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.

- Paul, B.H. 1957. Juvenile wood in conifers. FPL Rep. 2094. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 6p.
- Philipson, W.R. et Butterfield B.G. 1967. A theory on the causes of size variation in wood elements. *Phytomorphology*. J. 17: 155-159.
- Pichard, O.; Clinovski F.; Lanthéaume, F.; Grange B.; Pillon, S. et Pichard, F. 1997. L'homme et bois. 58p. http://www.nature-en-lorraine.net/trav_perso/hombois.pdf
- Pikk, J.; Kask, R. et Peterson, P. 2006. The wood quality of fertilized Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands on *Vaccinium vitis-idaea* and *Cladonia* site type. *Forestry Studies* 44: 9-19.
- Posey, C.E. 1965. Effects of fertilization upon wood properties of Loblolly pine (*Pinus taeda* L.). Proceedings of 8th Southern Conference on Forest Tree Improvement, Savannah, GA, June 16-17, 1965. Committee on Southern Forest Tree Improvement Pub. No. 24. pp. 126-130.
- Pothier, D.; Margolis, H.A. et Waring, R.H. 1989a. Patterns of change in saturated sapwood permeability and conductance with stand development. *Can. J. For. Res.* 19:432-439.
- Pothier, D.; Margolis, H.A. ; Poliquin, J. et Waring, R.H. 1989b. Relation between the permeability and the anatomy of jack pine sapwood with stand development. *Can. J. For. Res.* 19:1564–1570.
- Pothier, D. 2002. Twenty-years results of precommercial thinning in a balsam fir stand. *For. Ecol. Manag.* 168 :177-186.
- Pothier, D. et Margolis, H.A. 1991. Analysis of growth and light interception of balsam fir and white birch saplings following pre commercial thinning. *Ann. Sci. For.* 48:123-132.
- Pronin, D. 1971. Estimating tree specific gravity of major pulpwood species in Wisconsin. USDA For. Serv. Res. Pap. FPL-161, 17 p. For. Prod. Lab., Madison, Wis.
- Quilhó, T.; Miranda, I. et Pereira, H. 2006 Within tree variation in wood fibre biometry and basic density of the Urograndis Eucalyptus hybrid (*Eucalyptus Grandis** *E. Urophylla*). *IAWA J.*, 27(3): 243–254.
- Reader, T.G. et Kurmes, E.A. 1996. The influence of thinning to different stocking levels on

compression wood development in Ponderosa pine. For. Prod. J. 46: 92-100.

Rudolph T.D. et Laidly, P.R. 1990. *Pinus banksiana* Lamb. Jack Pine. In: Burns, R.M. and B.H. Honkala, tech. Cords. 1990. Silvics of North America: 1. Conifers. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. Vol. 1, 675 p.

Saikku, O. 1975a. The effect of fertilization on the basic density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). A densitometric study on the X ray chart curves of wood. Commun. Inst. For. Fenn. 85(3).

Saikku, O. 1975b. The effect of nitrogen fertilization on the basic density of Scots pine (*Pinus sylvestris*), Norway spruce (*Picea abies*) and common birch (*Betula verrucosa*). [En finlandais, Résumé en anglais.] Commun. Inst. For. Fenn. 85 (5).

Saranpää, P. 1985. Lengths, diameter and cell wall thickness of tracheids in mature lodgepole pine bole wood. Silva Fenn. 19: 21-32. (Résumé en anglais).

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 and Manag. 242: 636-647.

Savva, Y.; Bergeron, Y.; Denneler, B.; Koubaa, A.; 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.; 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.

Schmidting, R.C. 1973. Intensive culture increases growth without affecting wood quality of young southern pines. Can. J. For. Res. 3: 565-573.

Schneider, R.; Zhang, T.; Bégin, J. et Swift, E. 2005. Impact of commercial thinning on wood density and strength in Jack pine (*Pinus Banksiana*). Symposium. 19 June, 48th annual SWST convention.

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. 97p.

- Shea, S.R et Armson, K.A. 1972. Stem analysis of jack pine (*Pinus banksiana*, Lamb) : techniques and concepts. Can J. For. Res. 2:392-406.
- Sheedy, G. et Bertrand, V. 1997. Résultats de 10 ans concernant les éclaircies en ligne réalisées dans les plantations de la forêt de Drummondville. MNRQ note de recherche forestière. Québec. 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.
- Sirviö, J. et Kärenlampi, P. 2001. The effects of maturity and growth rate on the properties of spruce wood tracheids. Wood Sci. Technol. 35(6): 541–554.
- Sonderman, D.L. et Rast, E.D. 1988. Effect of thinning on mixed-oak stem quality. Research paper northeastern forest experiment station. Vol. NE-6 18. 6 p.
- Sonne, E.; Turnblom E.; Briggs, D. et Becker, G. 2004. Log and lumber grades and value from a Douglas-fir stand 20 years after thinning and biosolids fertilization . Western J. Appl. For. 19 (1): 34-41.
- Stairs, G.R.; Marton, R.; Brown, A.F.; Rizzio, M. et Petrik, A. 1966. Anatomical and pulping properties of fast- and slow grown Norway spruce. Tappi J. 49: 296–300.
- Stiell, W.M. et Berry, A.B. 1973. Development of unthinned white spruce plantations at age 50 at Petawawa Forest Experiment Station. Publication 1317. Canadian Forestry Service. Ottawa. 18 pp.
- Tasissa, G. et Burkhart, H.E. 1998. Modeling thinning effects on ring specific gravity of loblolly pine. For. Sci. 44: 212-223.
- Thomson, A.J. et Barclay, H.J. 1984. Effect of thinning and urea fertilization on the distribution of the area increment along the boles of Douglas fir at Shawnigan Lake. British Columbia. Can. J. For. Res. 14:879-884.
- Tong, Q.J; Zhang, S.Y et Thompson, M. 2005. Evaluation of growth response, stand value and financial return for precommercially thinned jack pine stands in Northern Ontario. For. Eco. Manag. 209: 225-235.

- Tuula, J. 2008. The effects of thinning and fertilisation on wood and tracheid properties of Norway spruce (*Picea abies*) – The results of long-term experiments' Dissertationes Forestales 55, 55. 59 p. Finnish Society of Forest Science Unioninkatu 40A, FI-00170 Helsinki, Finland.
- Tyrväinen, J. 1995. Wood and fiber properties of Norway spruce and its suitability for thermomechanical pulping Acta Forestalia Fennica 249. 155 p.
- Valinger, E. 1992. Effect of thinning and nitrogen fertilization on stem growth and stem form of *Pinus sylvestris* trees. Can. J. For. Res. 7: 219-228.
- Valinger, E.; Elfving, B. et Morling, T. 2000. Twelve-year growth response of Scots pine to thinning and nitrogen fertilisation. For. Écolo. Manag. 134; 45-53.
- Viens, E. 2001. Effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la forme de la tige du pin gris, *Pinus banksiana* (Lamb.) en Abitibi, Québec. Mémoire de baccalauréat. Université de Chicoutimi. 58p.
- Ward, D. et Gardiner, J.J. 1976. The influence of spacing on tracheid length and density in Sitka Spruce. Irish-Forestry 33(1):39-56.
- Weetman, G.F. 1971. Effects of thinning and fertilization on the nutrient uptake, growth, and wood quality of upland black spruce. Pulp Pap. Res. Inst. Cano Woodlands Res. Div. Pap. No. 28.
- Weetman, G.F. et Algar, D. 1974. Jack pine nitrogen fertilization and nutrition studies; three year results. Can. J. For. Res. 4 : 381-398.
- Wenger, K. F. 1984. Forestry Handbook. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1360 pages.
- Weiskittel, A.R.; Maguire, D.A.; Monserud, R.A.; Rose, R. et Turnblom, E.C. 2006. Intensive management influence on Douglas fir stem form, branch characteristics, and simulated product recovery .New Zealand J. For. Sci. 36 (2-3): 293-312.
- Yang, K.C et Wong, J.K. 1986. Distribution of juvenile wood in two stems of *Larix laricina*. Can. J. For. Res. 16: 1041-1049.
- Yang, K.C. 1994. Impact of spacing on width and basal area of juvenile and mature wood in *Picea mariana* and *Picea glauca*. Wood Fiber Sci. 26(4): 479-488.

- Yang, K.C. et Hazenberg, G.1994. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana*. Can. J. For. Res. 24(5): 996-1007.
- Yang R.C.; Wang E.I.C et Micko M.M. 1988. Effects of fertilizations on wood density and tracheid length of 70-year-old lodgepole pine in west-central Alberta. Can. J For. Res. 18: 954-956.
- Youngberg, C.T.; Walker, L.C.; Hamilton, J.R. et Williams, R.F. 1963. Fertilization of slash pine. Can. For. Res. Council. Pap. Macon Vol 17.
- Zahner, R. et Olivier, W.W. 1962. The influence of thinning and pruning on the date of summerwood initiation in red and jack pines. For. Sci.8: 51-63.
- Zahner, R. et Whitmore, F.W. 1960. Early growth of radically thinned loblolly pine. J. For. 58: 628-634.
- Zeide, B. 2001. Thinning and growth: A full turn around. J. Forestry 99 : 20-25
- Zhang, S.Y. et Koubaa, A. 2009. Les résineux de l'Est du Canada : Écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. Publication spéciale, FPInnovations; SP-526F, 377 p.
- Zhang, S.Y. et Morgenstern E.K. 1995. Genetic variation and inheritance of wood density in black spruce (*Picea mariana*) and its relationship with growth: implications for tree breeding. Wood Sci. Technol. 30:63-75.
- Zhang, S.Y.; Lei, Y.C.; Chauret, G. et Bowling, C. 2005. Modelling tree growth and stem quality in relation to initial spacing in black spruce. N. J. Appl. For. 22(2): 85-93.
- 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. 1998. Éclaircie précommerciale du sapin baumier: implications sur la qualité de la fibre et des pâtes et papiers 66e congrès de l'ACFAS. Session: S-225 Sciences forestières.
- Zhang, S.Y.; Fujiwara, S. et Baas, P. 1992. Hardwood density in relation to fibre morphology and tissue proportions. IAWA Bull. 13(3): 266-267.

- Zhang, S.Y.; 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/UFRO, Quebec City. Timber management toward wood quality and end-product value, August 18-22. pp I.17-I.39.
- 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 Fiber Sci.* 34(3): 460–475.
- Zhang, S.Y.; Yu, Q. et Beaulieu, J. 2004. Genetic variation in veneer quality and its correlation to growth in white spruce. *Can. J. For. Res.* 34: 1311-1318.
- Zhang, S.Y.; Morgenstern, E.K. 1995. Genetic variation and inheritance of wood density in black spruce (*Picea mariana*) and its relationship with growth: implications for tree breeding. *Wood Science and Technology* 30: 63-75.
- Zobel, B. J. et Kellison, R. C. 1984. Wood - where will it come from, where will it go? A comparison of the southern. United States with South America. *Tappi J.* 67: 33-37.
- Zobel, B. J.; Mcelwee, R.L. et Browne, C. 1961. Interrelationship of wood properties of loblolly pine. Proceedings of 6th Southern Conference on Forest Tree Improvement, Gainesville, FL, June 7-8, 1961. University of Florida, Gainesville. pp. 142-163.
- Zobel, B.J. et Talbert, J. 1984. Applied Forest Tree improvement. John Wiley & sons (eds). New York. pp 403-404.
- Zobel, B.J. et Van Buijtenen, J.P. 1989. Wood variation, its causes and control. Springer Verlag, Berlin.