TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ii

LISTE DES FIGURES vi

LISTE DES TABLEAUX x

RÉSUMÉ xii

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 5

REVUE DE LITTÉRATURE 5

1.1 Généralités 5

1.1.1 Épinette noire 5

1.1.2 Coupes partielles 7

1.1.2.1 Coupe de jardinage 8

1.1.2.2 Éclaircie commerciale 8

1.1.2.3 Coupe avec protection des petites tiges marchandes 9

1.1.2.4 Coupe progressive 9

1.1.3 Qualité du bois 10

1.1.4 Relation entre les propriétés mécaniques du bois, les caractéristiques anatomiques et physiques 11

1.1.5 Effet des coupes partielles sur la qualité du bois 15

1.2 Méthodes non destructives pour l'évaluation de la qualité du bois 17

1.2.1 Utilisation des méthodes non destructives pour évaluer les propriétés mécaniques du bois 17

1.2.2 Méthode de l'onde mécanique 18

1.2.3 Vibration transversale *20*
1.2.4 Technique de l'ultrason *23*
1.2.5 Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique *26*
CHAPITRE 2 30
MATÉRIAUX ET MÉTHODES 30
2.1 Aires d'étude et caractéristiques des sites 30
2.2 Échantillonnage 31
2.3 Protocole expérimental 33
2.3.1 Préparation des échantillons *33*
2.3.2 Mesure des propriétés mécaniques du bois *34*
2.3.3 Propriétés acoustiques *35*
2.4 Analyse statistique des résultats 37
CHAPITRE 3 39
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 39
3.1 Statistiques descriptives 39
3.2 Variation radiale des propriétés mécaniques de l'épinette noire 42
3.3 Effet des coupes partielles sur les propriétés mécaniques de l'épinette noire 47
3.3.1 Effet des coupes partielles sur les propriétés en flexion *48*
3.3.2 Effet des coupes partielles sur les propriétés en compression parallèle ... *58*
3.3.3 Effet des coupes partielles sur les propriétés en compression perpendiculaire *64*
3.4 Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique 69
3.4.1 Variation radiale des propriétés acoustiques de l'épinette noire *69*
3.4.2 Relation entre le MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal et le MOE_{stat} mesuré en flexion trois points *76*
3.4.3 Relation entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat} mesurés en compression parallèle *82*

3.4.4 Relation entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat} mesuré en compression perpendiculaire *86*

CONCLUSION 91

BIBLIOGRAPHIE 94

LISTE DES FIGURES

Figure Page

Figure 1.1 (a) Aire de distribution mondiale de l'épinette noire (*Picea mariana*). (b) Aire de distribution de la forêt continue, dominée par l'épinette noire (*Picea mariana*) (Gagnon et Morin, 1992). 6

Figure 1.2 Les trois principaux axes par rapport à la direction du fil et aux cernes de croissance. 12

Figure 1.3 Effet de l'angle du fil sur les propriétés mécaniques du bois clair de défauts selon la formule de Hankinson. *Q/P* est le rapport entre la propriété mécanique à travers le fil (*Q*) et la compression parallèle au fil (*P*); *n* est une constante déterminée empiriquement (Ross, 2010). 14

Figure 1.4 Principe de mesure du temps de propagation de l'onde mécanique dans une poutre de bois (Wang *et al.*, 2001). 19

Figure 1.5 Réponse théorique de l'extrémité d'une barre viscoélastique (section transversale), en réponse à une propagation d'une onde mécanique (Wang *et al.*, 2001). 19

Figure 1.6 Mesure de temps de propagation par le système Metriguard, modèle 239A (Zaturecky *et al.*, 2006). 21

Figure 1.7 (a) Modèle de vibration amortisseur/ressort. (b) Poutre en vibration transversale (Wang *et al.*, 2001). 22

Figure 1.8 Principe du contrôle ultrasonore en mode réflexion (FAA, 2014). 24

Figure 1.9 Principe du contrôle ultrasonore d'atténuation (FAA, 2014). 25

Figure 2.1 Carte de localisation des sites d'étude du réseau expérimental de coupes partielles (Fenton *et al.*, 2013). 31

Figure 2.2 Représentation schématique de la répartition des échantillons pour les tests mécaniques et acoustiques (Lemay, 2012). 33

Figure 2.3 (a) Test de flexion trois points et de compression parallèle (b) à l'aide de l'appareil d'essai universel Zwick/Roell Z20. 34
Figure 2.4 Test de vitesse de propagation du son à l'aide de l'appareil Sonatest 380M. 36
Figure 3.1 Variation de la masse volumique du bois de l'épinette noire en fonction de la position par rapport à la moelle au DHP de 1,3 m. 44
Figure 3.2 Variation radiale du module d'élasticité en flexion en fonction de la position par rapport à la moelle au DHP de 1,3 m. 44
Figure 3.3 Variation radiale du module d'élasticité en compression parallèle en fonction de la position par rapport à la moelle, au DHP de 1,3 m. 45
Figure 3.4 Variation radiale du module d'élasticité en compression perpendiculaire en fonction de la position par rapport à la moelle au DHP de 1,3 m. 47
Figure 3.5 Variation de la masse volumique (kg/m^3) de l'épinette noire en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 55
Figure 3.6 Variation de la contrainte à la rupture (MPa) en flexion trois points en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 56
Figure 3.7 Variation du module d'élasticité (GPa) en flexion trois points en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 57
Figure 3.8 Variation du MOE en compression parallèle en fonction du DHP. 60
Figure 3.9 Variation de la contrainte maximale (MPa) en compression parallèle en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 61
Figure 3.10 Variation de la contrainte à la rupture (MPa) en compression parallèle en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 62

Figure 3.11 Variation du module d'élasticité (MPa) en compression parallèle en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 63

Figure 3.12 Variation de la contrainte maximale (MPa) en compression perpendiculaire en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 66

Figure 3.13 Variation de la contrainte à la rupture (MPa) en compression perpendiculaire en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 67

Figure 3.14 Variation du module d'élasticité (MPa) en compression perpendiculaire en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3). 68

Figure 3.15 Relation entre les valeurs moyennes de la masse volumique et du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal de différentes distances par rapport à la moelle au DHP. 72

Figure 3.16 Variation de la valeur moyenne du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal en fonction de la position par rapport à la moelle. 72

Figure 3.17 Variation de la valeur moyenne du MOE_{dyn} mesuré dans le sens tangentiel en fonction de la position par rapport à la moelle. 74

Figure 3.18 Relation entre les valeurs moyennes de la masse volumique et du MOE_{dyn} mesuré dans le sens tangentiel de différentes distances par rapport à la moelle au DHP. 75

Figure 3.19 Relation entre le MOE_{dyn} dans le sens longitudinal et le MOE_{stat} en flexion trois points pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce des 24 arbres. 79

Figure 3.20 Relation entre les valeurs moyennes du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal et du MOE_{stat} mesuré en flexion trois points de la planche centrale des 24 arbres. 81

Figure 3.21 Relation entre le MOE_{dyn} dans le sens longitudinal et le MOE_{stat} en compression parallèle pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce des 24 arbres. 84

Figure 3.22 Relation entre les valeurs moyennes du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal des fibres et celles du MOE_{stat} mesuré en compression parallèle de la planche centrale des 24 arbres. 85

Figure 3.23 Relation entre le MOE_{dyn} dans le sens tangentiel et le MOE_{stat} en compression perpendiculaire pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce des 24 arbres. 87

Figure 3.24 Relation entre les valeurs moyennes du MOE_{dyn} obtenu par la mesure de la vitesse acoustique dans le sens radial et du MOE_{stat} mesuré en compression perpendiculaire pour les 24 arbres. 89

Rapport-Gratuit.com

LISTE DES TABLEAUX

Tableau Page

Tableau 2.1 Caractéristiques des sites d'étude 32

Tableau 2.2 Détails de l'échantillonnage effectué 32

Tableau 3.1 Valeurs moyennes[1], coefficients de variation (COV) (entre parenthèses) de la masse volumique et propriétés mécaniques en flexion trois points, en compression parallèle et en compression perpendiculaire de l'épinette noire au DHP, pour tous les traitements et les classes de DHP de trois peuplements en Abitibi-Témiscamingue 41

Tableau 3.2 Analyse de variance des effets fixes sur le module d'élasticité, la contrainte maximale, la contrainte à la rupture en flexion trois points et la masse volumique 49

Tableau 3.3 Analyse de variance des effets fixes sur le module d'élasticité, la contrainte maximale, la contrainte à la rupture en compression parallèle..... 50

Tableau 3.4 Analyse de variance des effets fixes sur le module d'élasticité, la contrainte maximale, la contrainte à la rupture en compression perpendiculaire. 51

Tableau 3.5 Les valeurs de la masse volumique, de la vitesse de propagation des ondes d'ultrasons et du module d'élasticité dynamique mesuré dans le sens longitudinal près de la moelle et l'écorce pour les échantillons de bois 71

Tableau 3.6 Les valeurs de la masse volumique, de la vitesse de propagation des ondes d'ultrasons et du module d'élasticité dynamique mesuré dans le sens longitudinal près de la moelle et de l'écorce pour les échantillons de bois..... 73

Tableau 3.7 Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens longitudinal et de la résistance en flexion trois points pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce pour les 24 arbres 76

Tableau 3.8 Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens longitudinal et de la résistance en flexion trois points pour les 24 arbres 80

Tableau 3.9 Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens longitudinal et de la résistance en compression parallèle pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce de chaque planche centrale des 24 arbres 83

Tableau 3.10 Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens longitudinal et de la résistance en compression parallèle pour 24 arbres 83

Tableau 3.11 Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens tangentiel et de la résistance en compression perpendiculaire pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce de chaque planche centrale des 24 arbres 86

Tableau 3.12 Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens tangentiel et de la résistance en compression perpendiculaire pour 24 arbres 88

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

RÉSUMÉ

L'aménagement forestier intensif, dont les coupes partielles, représente une possibilité visant à augmenter la croissance de l'épinette noire. Bien que ces pratiques aient des effets positifs sur la croissance en diamètre, l'impact sur la qualité du bois a été peu étudié. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet des coupes partielles sur la qualité du bois de l'épinette noire, à savoir les propriétés mécaniques et acoustiques. Des placettes permanentes ont été sélectionnées dans un réseau de coupes partielles mis en place au cours des quinze dernières années. Trois intensités de récolte des coupes ont été étudiées : 0 %, 0-50 % et 75-100 % de la surface terrière. Les arbres sélectionnés ont été divisés en trois classes de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) : 10-15 cm, 15-20 cm et > 20 cm. Un échantillonnage destructif a été réalisé dans trois sites et des éprouvettes normalisées ont été prélevées avant et après le traitement pour étudier les propriétés mécaniques (flexion, compression parallèle et perpendiculaire). Le module d'élasticité dynamique a été mesuré de la moelle à l'écorce, au DHP, avec un outil ultrasonique. Les résultats indiquent qu'une croissance accélérée de l'épinette noire après les coupes partielles n'a eu des effets négatifs que sur les propriétés mécaniques en flexion trois points et en compression parallèle (MOE, σ_{rup}, σ_{max}). Également, il n'y a pas de différence significative entre les intensités de traitement. Une réponse différente a été observée pour les propriétés mécaniques en compression perpendiculaire à la suite d'une coupe partielle. La variation du module d'élasticité est reliée seulement à sa valeur avant le traitement. Quant à la contrainte de rupture, un changement négatif est observé, causé par un traitement de prélèvement d'intensité modérée; cependant, un traitement de prélèvement d'intensité forte n'avait aucun effet nuisible sur cette propriété. Une forte corrélation existe entre le module d'élasticité dynamique mesuré dans le sens longitudinal et le module d'élasticité statique, déterminée par un test de flexion trois points et un test de compression parallèle. Toutefois, aucune bonne corrélation n'a été trouvée en compression perpendiculaire. Cette étude suggère que l'efficacité de l'outil ultrason pour l'évaluation non destructive des propriétés mécaniques de l'épinette noire varie selon la direction des fibres du bois.

MOTS-CLÉS : coupes partielles, épinette noire, propriétés mécaniques, ultrason, module d'élasticité dynamique, module d'élasticité statique.

INTRODUCTION

Depuis des années au Québec, l'exploitation forestière et les attentes à l'égard de la ressource ont beaucoup changé dans la forêt boréale. L'augmentation de la concurrence au sein de l'industrie forestière ainsi que la réduction de la disponibilité en bois de sciage impliquent la mise en place de nouvelles stratégies afin d'augmenter le volume de bois produit dans les forêts restantes (Vincent *et al.,* 2009). Dans cette perspective, les traitements sylvicoles semblent être la solution la plus appropriée pour répondre à la demande du marché mondial, tout en conservant une valeur maximale de la qualité de production (Zhang *et al.,* 2006).

La coupe partielle est un traitement sylvicole qui englobe un grand nombre de traitements ayant pour but de récolter une proportion importante du couvert forestier (Bois, 2009) et dont l'objectif est de réduire la compétition entre les individus d'un peuplement, d'induire un gain de croissance ainsi que d'augmenter la productivité des arbres résiduels (Josza et Middleton, 1994). Toutefois, ce processus influence plusieurs caractéristiques importantes dans l'arbre, notamment la masse volumique et les propriétés mécaniques, ce qui pourrait influencer indirectement la qualité des produits finaux du bois (Alteyrac, 2005; Zhang, 1995).

Jusqu'à présent, très peu d'études ont documenté la réponse des arbres résiduels après une coupe partielle (Thorpe *et al.,* 2007). Les effets des pratiques sylvicoles sur la qualité du bois de l'épinette noire sont aussi peu connus (Alteyrac, 2005; Vincent *et al.*, 2009; Zhang et Koubaa, 2009).

L'épinette noire est une espèce commerciale particulièrement importante au Québec. Elle est principalement utilisée dans la fabrication de pâtes à papier et de panneaux

MDF, et aussi comme matériau de construction (Alteyrac, 2005). En outre, l'épinette noire est l'une des principales espèces utilisées dans la production de bois classé par machine (MSR), et le module d'élasticité (MOE) en flexion est l'une des propriétés du bois les plus importantes pour déterminer l'usage final et le rendement de qualité du bois classé mécaniquement (Vincent *et al.*, 2011). Il devient donc important, voire primordial, d'obtenir plus d'informations sur l'effet des coupes partielles sur la croissance et sur les attributs de la qualité du bois, notamment ses propriétés mécaniques.

Contrairement à d'autres matériaux homogènes et isotropes tels que les métaux, les matières plastiques et les céramiques, qui ont des propriétés mécaniques bien connues et des procédés de fabrication strictement contrôlés, le bois n'a pas cette caractéristique, puisqu'il est un matériau généré par la nature. Pour cette raison, le bois a une grande variabilité concernant ses propriétés mécaniques. En outre, la méthode classique de caractérisation du bois peut avoir une certaine variabilité dans les résultats en raison de facteurs relatifs à la préparation de l'échantillon ou à la méthode destructive utilisée.

Une caractérisation effective du bois par des techniques non destructives (NDT) est possible, pour laquelle l'extraction des échantillons n'est pas nécessaire, et ce, sans endommager les propriétés chimiques, physiques et mécaniques de la pièce. L'utilisation de ces techniques pour l'évaluation du bois et de ses sous-produits est très répandue; elle a commencé dans les années 1960 (Jayne, 1959). Prédire les propriétés du matériau bois est devenu d'une importance considérable pour l'industrie forestière. Le grand avantage de la NDT par rapport à la caractérisation destructive est la rapidité dans l'obtention d'informations avec une charge de travail inférieure.

Actuellement, les techniques de NDT se développent à une forte tendance et sont employées de manière appropriée dans l'évaluation structurelle des bâtiments en bois. Parmi les techniques les plus utilisées, il y a celles qui sont basées sur les

caractéristiques acoustiques du bois, comme la propagation des ondes mécaniques, les ondes ultrasonores et la vibration transversale. L'ultrason est une technique basée sur le principe d'application d'ondes inaudibles dans le matériau bois pour déterminer ses constantes d'élasticité. En connaissant la vitesse de propagation et la masse volumique du matériau, il est possible de calculer ces constantes d'élasticité.

Plusieurs études montrent l'utilité de la méthode ultrasonore pour déterminer les propriétés mécaniques du bois, en particulier les constantes d'élasticité, ce qui met en évidence les principaux avantages qui ont constitué la rapidité de l'utilisation, la polyvalence, les faibles coûts d'exploitation et son efficacité pour examiner le bois et ses produits (De Oliveira *et al.*, 2005), en commençant par l'arbre sur pied jusqu'aux panneaux à base de bois.

Dans ce contexte, d'autres études sont nécessaires pour combler les lacunes dans la littérature, qui sont liées à la compréhension des phénomènes de propagation des ondes d'ultrasons dans le bois, ainsi que la façon d'utiliser les résultats de recherche pour améliorer cette technologie.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact des coupes partielles sur la qualité du bois de l'épinette noire, notamment les propriétés mécaniques et acoustiques. Dans cette étude, les coupes partielles sont réalisées sur des arbres issus de peuplements naturels en forêt boréale (pessière noire). La caractérisation des propriétés mécaniques est effectuée, d'une part, en fonction des classes de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et, d'autre part, en fonction de l'intensité de prélèvement.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont :

1) Évaluer la variation intra-arbre des modules d'élasticité statique et dynamique du bois.

2) Étudier l'effet de l'intensité des coupes partielles sur les propriétés mécaniques du bois de l'épinette noire en flexion, en compression parallèle et en compression perpendiculaire selon les classes de diamètre.

3) Étudier la relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique du bois d'épinette noire pour valider la fiabilité des outils ultrasons pour étudier les variations intra-arbres et dues aux traitements sylvicoles des propriétés mécaniques du bois en flexion, en compression parallèle et en compression perpendiculaire à l'aide d'outils non destructifs.

Pour répondre aux objectifs déjà mentionnés, nous avons posé les hypothèses suivantes :

- Les propriétés mécaniques du bois augmentent, du bois juvénile vers le bois mature (Alteyrac, 2005).

- Une augmentation de l'accroissement en volume par tige à la suite d'une coupe partielle est associée à une diminution des propriétés mécaniques du bois (Bowyer *et al.*, 2007). Ces changements devraient être plus importants dans le cas d'une intervention de forte intensité que pour une intensité modérée (Zhang *et al.*, 2006).

- Les outils de caractérisation non destructifs, dont les ultrasons, permettent de prévoir les propriétés mécaniques du bois de l'épinette noire et d'étudier les variations intra-arbres et celles dues aux traitements sylvicoles de ces propriétés.

.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Généralités

1.1.1 Épinette noire

L'épinette noire, une espèce indigène de l'Amérique du Nord (figure 1.1 a), se classe parmi les conifères les plus importants de la forêt boréale canadienne, en matière de volume et de valeur économique. Elle est principalement abondante dans les forêts de l'est du continent, soit en Ontario, au Québec et à Terre-Neuve (figure 1.1 b) (Viereck et Johnston, 1990).

Cette grande forêt d'épinette noire traverse la province québécoise d'est en ouest, entre le 52e et le 49e parallèle. Elle forme une bande de près de 300 km de largeur et couvre 28 % de la superficie de la province (Gagnon et Morin, 1992). D'après Alteyrac (2005), cette espèce se trouve généralement sur des sols organiques humides et, la plupart du temps, elle constitue un peuplement pur (surtout au nord). Mais on peut la trouver aussi associée à d'autres espèces (plutôt au sud), comme l'épinette blanche (*Picea glauca*), le sapin baumier (*Abies balsamea*), le pin gris (*Pinus banksiana*) et le bouleau blanc (*Betula papyrifera*). Dans des sites non aménagés, les tiges d'épinette noire sont relativement petites en diamètre. Cependant, dans de bonnes conditions de croissance, elles peuvent atteindre un DHP moyen d'environ

20 cm au maximum (Zhang et Koubaa, 2009), ce qui entraîne une très faible récupération du volume de bois d'œuvre par volume de tige. À titre d'exemple, un peuplement de 80 à 100 ans permet de récolter environ 200 m³ de bois par hectare (Alteyrac, 2005). La particularité de cette espèce, pour les jeunes peuplements, est son aptitude à se maintenir et à se régénérer d'une façon presque immédiate et sur une courte période à la suite d'un feu (Filion et Morin, 1996; Gagnon et Morin, 1992).

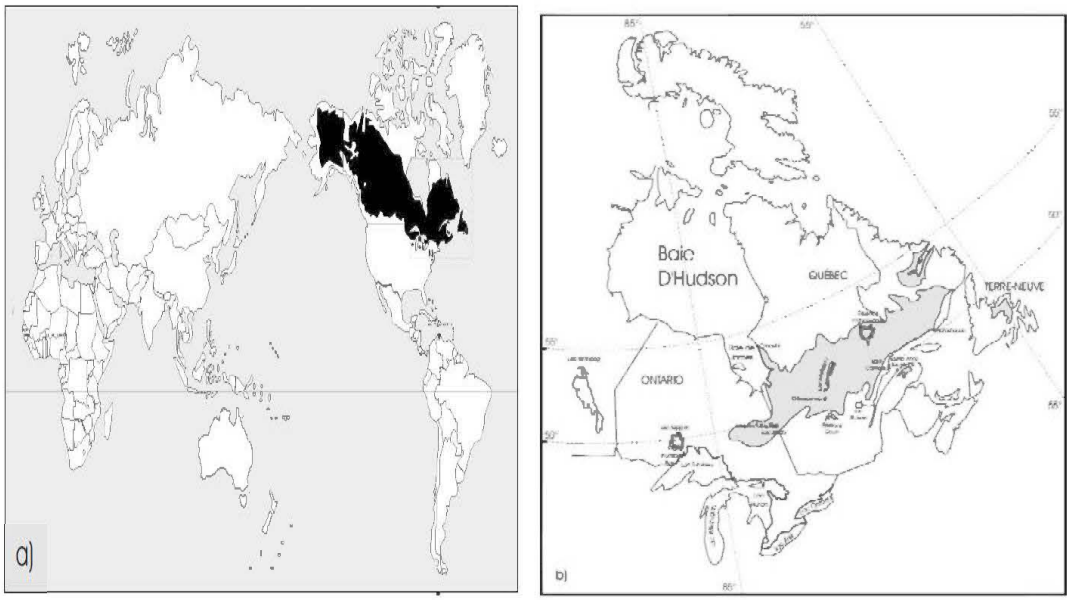

Figure 1.1 (a) Aire de distribution mondiale de l'épinette noire (*Picea mariana*). (b) Aire de distribution de la forêt continue, dominée par l'épinette noire (Gagnon et Morin, 1992).

Dans l'industrie forestière, les propriétés physico-mécaniques du bois sont considérées comme des facteurs indicateurs de la qualité du bois (Alteyrac, 2005). Elles présentent un intérêt considérable lors de la classification des produits. Parmi les propriétés physiques, la masse volumique est souvent considérée comme un facteur déterminant de la qualité du bois, étant donné qu'elle permet d'en expliquer les nombreuses autres propriétés (Zhang *et al.*, 1997). Pour l'épinette noire, la masse

volumique à l'état vert est de 762 kg/m³ (Pnevmaticos *et al.,* 1972) et sa masse volumique basale est de 428 kg/m³ en moyenne (Jessome, 1977).

L'épinette noire est considérée comme le moteur de l'industrie forestière au Québec. Sa principale utilisation commerciale au Canada est orientée vers la fabrication de pâtes à papier et de bois d'œuvre (Zhang et Koubaa 2009). Son usage dans le bois d'œuvre est attribuable principalement à ses propriétés mécaniques. Elle présente un MOE en flexion statique de 9 500 MPa à l'état vert et de 11 000 MPa à 12 % d'humidité, un MOR en flexion statique de 42 MPa à l'état vert et de 74 MPa à 12 % d'humidité (Alteyrac, 2005).

Par ailleurs, le MOR et le MOE pour cet arbre augmentent de la base au sommet (Zhang et Chauret, 2001). Alteyrac (2005) a rapporté une forte corrélation entre le MOE, le MOR et l'angle des microfibrilles (AMF) chez l'épinette noire. Cependant, aucune étude n'a mis en exergue la relation linéaire entre les propriétés mécaniques, la masse volumique et la largeur des cernes, d'où l'importance de combler ce manque.

1.1.2 Coupes partielles

Les systèmes sylvicoles font partie des moyens les plus appropriés pour répondre aux différents enjeux du secteur forestier québécois. Ils ont pour but commun d'augmenter la croissance des arbres et la valeur finale d'un peuplement en réduisant la compétition entre les individus et en promouvant la nutrition (Josza et Middleton, 1994).

Les travaux sylvicoles les plus répandus sont la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) et la coupe partielle. Toutefois, la CPRS ne permet pas de maintenir la biodiversité de l'écosystème; c'est ainsi que la coupe partielle

Rapport-Gratuit.com

apparaît comme une solution de rechange qui permet de récolter une partie de la surface terrière d'un peuplement afin d'augmenter la croissance des tiges résiduelles, tout en maintenant la structure et la composition du peuplement (Bergeron *et al.,* 2001). Dans cette perspective, la coupe partielle pourrait être un moyen de répondre à des objectifs écologiques et économiques (McComb *et al.,* 1993).

Au Québec, plusieurs types de coupes sont pratiqués : l'éclaircie commerciale, la coupe avec protection des petites tiges marchandes, la coupe de jardinage et les coupes progressives.

1.1.2.1 Coupe de jardinage

D'après le ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec, la coupe de jardinage est la récolte d'arbres choisis individuellement ou par petits groupes en prenant soin de protéger ceux qui sont exempts de malformations et de maladies. Elle vise à diversifier la composition de la forêt avec des arbres de tous les âges. Actuellement, la coupe de jardinage est le traitement sylvicole le plus couramment utilisé dans les forêts feuillues québécoises : les forestiers y ont recours pour traiter plus de 400 000 ha de forêt depuis plusieurs années (Forget et Nolet, 2005).

1.1.2.2 Éclaircie commerciale

Cette opération consiste à récolter une partie du volume marchand d'un peuplement équien qui n'a pas atteint l'âge d'exploitabilité, soit entre 30 % et 35 % de la surface couverte (MRNF, 2003). Ce traitement a comme objectif d'améliorer l'accroissement en diamètre afin d'avoir un peuplement de plus grande valeur que celui qui serait équivalent, mais non éclairci (Poulin, 2013). Au Québec, l'éclaircie commerciale est

une application relativement récente, ce traitement a commencé au début des années 1990 dans des peuplements d'épinettes noires, dans la forêt boréale du Québec (Vincent *et al.,* 2009). L'éclaircie commerciale représente un des traitements d'aménagement intensif les plus prometteurs par rapport à la forte demande de bois (Park et Wilson, 2007). L'avantage de ce type de traitement, c'est qu'il peut être exploité pour une courte période de croissance d'un peuplement dans les régions boréales où le climat est froid (Vincent *et al.,* 2011).

1.1.2.3 Coupe avec protection des petites tiges marchandes

La coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) consiste à récolter des arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine est supérieur à un minimum fixé, tout en protégeant les gaules et les petites tiges marchandes; le diamètre minimal fixé est de 13, 15 ou 17 centimètres (Glossaire forestier, 2015). Au Québec, la récolte varie de 70 % à 90 % du volume marchand (Lemay, 2012). Ce type de traitement est adéquat pour les peuplements résineux équiens, tels que le sapin, l'épinette noire et l'épinette blanche (Boucher *et al.*, 2003; Buongiorno, 2004). La CPPTM permet de développer et de former pour la prochaine récolte, sur des délais raccourcis, des tiges résiduelles d'une bonne qualité. En outre, par rapport aux coupes à blanc, une augmentation des diamètres moyens des tiges résiduelles est prévue (Riopel *et al.*, 2000). Cependant, les effets de la CPPTM dépendent de l'aptitude des individus résiduels à contribuer à l'évolution des futurs peuplements.

1.1.2.4 Coupe progressive

La coupe progressive est un traitement sylvicole qui consiste à la récolte d'un peuplement selon une séquence de coupes partielles pour établir une ou des cohortes

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

de régénération sous un couvert forestier mature contenant des arbres semenciers (Glossaire forestier, 2015). La méthode de coupe progressive a apparue comme une alternative à la coupe à blanc. En comparaison avec la coupe à blanc, la coupe progressive présente plusieurs avantages : La méthode de coupe progressive peut être appliquée dans de nombreux environnements et pour les objectifs sylvicoles aussi divers que la protection de la régénération, l'établissement d'espèces difficiles à se régénérer, la conversion en espèces plus souhaitables, et la régénération naturelle des grandes surfaces (McDonald, 1976b).Principalement, on peut définir deux procédés de régénération de la coupe progressive : la coupe progressive régulière et la coupe progressive irrégulière.

1.1.3 Qualité du bois

La qualité du bois n'est pas facile à décrire, puisque son évaluation peut se faire sur plusieurs aspects et qu'elle dépend de l'application envisagée (Barnett et Jeronimidis, 2009). Certains auteurs définissent la qualité du bois comme étant son aptitude à satisfaire les exigences nécessaires à une utilisation précise (Briggs et Smith, 1986; Josza et Middleton, 1994). Les multiples utilisations de cette ressource prennent en considération toutes ses caractéristiques, à savoir les propriétés chimiques, anatomiques, physiques et mécaniques, lesquelles peuvent être analysées comme des facteurs pertinents pour la caractérisation (Alteyrac, 2005). La masse volumique du bois (kg/m^3) se trouve parmi les attributs les plus importants pour en définir la qualité (Zhang et Koubaa, 2009). La connaissance de cet attribut est efficace pour prédire d'autres caractéristiques, telles que la résistance, la rigidité, la stabilité dimensionnelle, le potentiel de rendement en pâte et la qualité de la pâte papetière (Josza et Middleton, 1994; Koubaa *et al.*, 2002).

Dans le domaine de la construction, les deux critères les plus importants sont la rigidité (module d'élasticité MOE ou module du Young E) et la contrainte à la rupture ou de résistance, désignée comme le module de rupture (MOR) du matériau bois. Les propriétés mécaniques les plus importantes dépendent de la nature des applications (Alteyrac, 2005).

Ces propriétés sont déterminées par la nature et le type de chargement auquel le produit sera soumis (Bowyer *et al.*, 2007). Par exemple, les solives de plancher doivent satisfaire à des exigences de rigidité, de résistance et de vibration; le module d'élasticité MOE détermine la capacité des solives à supporter les déflexions sous l'effet de surcharge et à réduire ainsi les vibrations attribuables aux charges dynamiques qui gênent les utilisateurs (Kliger, 2000).

1.1.4 Relation entre les propriétés mécaniques du bois, les caractéristiques anatomiques et physiques

D'abord, le bois peut être décrit comme un matériau anisotrope; ses propriétés peuvent dépendre de trois axes : l'axe longitudinal (L) qui est parallèle à la direction du fil, l'axe radial (R) et l'axe tangentiel (T) qui sont perpendiculaires au fil. Les contraintes en compression ou en traction ne sont pas les mêmes dans les différents plans; également, le module d'élasticité n'est pas le même selon que l'essai a lieu dans le sens des fibres ou non (Alteyrac, 2005). Par exemple, la valeur de la résistance à la compression parallèle au fil du bois clair se situe entre 40 et 60 % de la résistance à la flexion (Ross, 2010).

La relation entre les propriétés physiques, anatomiques et mécaniques du bois a longtemps été un sujet important de recherche. La masse volumique est l'un des principaux facteurs qui influent sur la résistance mécanique du bois; toutefois, on constate que ces deux propriétés sont positivement corrélées, d'une façon presque

linéaire (Bowyer *et al.*, 2007). Lorsqu'on applique une contrainte parallèle au fil, le module d'élasticité tend à être linéairement lié à la masse volumique (Bodig et Jayne, 1982). D'une manière générale, cette relation varie beaucoup selon l'espèce étudiée et le type de bois étudié (Zhang, 1997). Cependant, le comportement du bois face à une contrainte perpendiculaire au fil est non linéaire avec la masse volumique. Selon Feio (2006), on adopte souvent une relation non linéaire donnée par la formule ci-dessous, où f_{90} est la résistance du bois en compression transversale, D est la densité du bois et α est une constante comprise entre 1,5 et 2,3.

$$f_{90} \approx (D)^{\alpha} \tag{1.1}$$

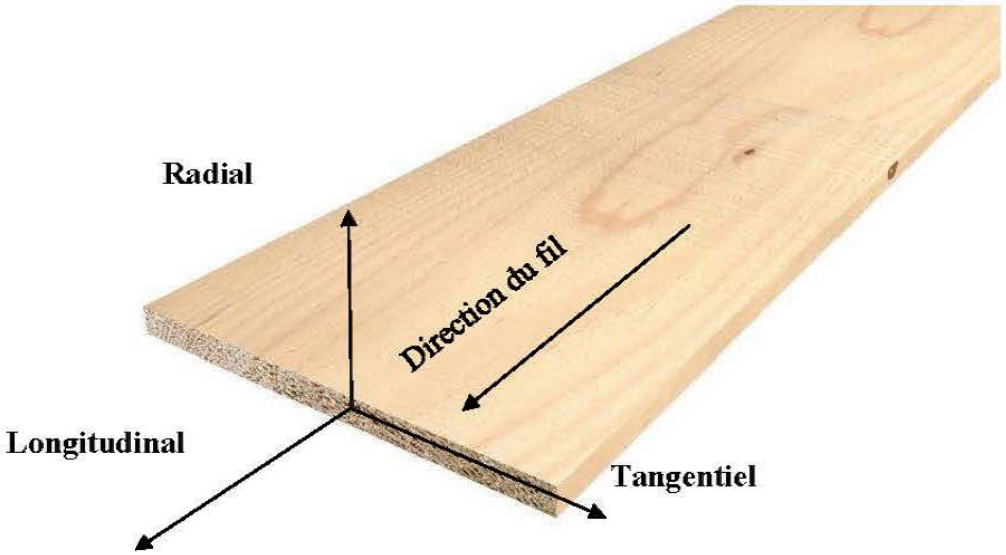

Figure 1.2 Les trois principaux axes par rapport à la direction du fil et aux cernes de croissance.

Cette valeur dépend de l'orientation des cernes de croissance et des dimensions de l'échantillon. Ethington *et al.* (1996) ont souligné que la résistance en compression perpendiculaire dépend de l'orientation des cernes de croissance annuelle selon une relation quasi quadratique. D'autres chercheurs rapportent que la compression perpendiculaire est fortement dépendante des caractéristiques anatomiques du bois

(Muller *et al.*, 2003; Tabarsa et Chui, 2000, 2001). Kennedy (1968) a indiqué que les espèces à faible proportion de bois final étaient plus fortes en compression radiale qu'en compression tangentielle. En effet, les couches de bois final sont la principale source de résistance à la charge appliquée, car elles sont beaucoup plus rigides que les couches de bois initial lorsqu'on applique une charge dans la direction tangentielle (Tabarsa et Chui, 2000). Les résultats obtenus par Tabarsa et Chui (2001) ont confirmé la relation entre le comportement mécanique en compression radiale, celui en compression tangentielle et la proportion de bois final.

L'effet de l'angle des microfibrilles sur la résistance mécanique du bois a été étudié par plusieurs chercheurs (Brazier, 1986; Maun, 1991). En fait, la variation de l'AMF a un effet significatif et indépendant sur le MOE. Ce dernier peut être prédit de façon fiable ou être estimé à partir des mesures de l'AMF (Yang et Evans, 2003). Alteyrac (2005) a indiqué que la relation entre le module d'élasticité et l'AMF est significative, alors que la relation avec la masse volumique ne l'est pas.

Les propriétés mécaniques du bois dépendent aussi d'autres facteurs, dont le pourcentage de bois juvénile, le bois de compression, la présence et la taille des nœuds (Zhang et Koubaa, 2009).

Le bois juvénile, qui est situé à proximité de la moelle, est formé dans les premières années de croissance de l'arbre. Il est caractérisé par une paroi cellulaire mince, de courtes trachéides, un angle des microfibrilles élevé et par une faible densité (Macdonald et Hubert, 2002; Polge, 1964). Par conséquent, la présence de ce bois en grande proportion peut affaiblir les propriétés mécaniques (Kretschmann, 1997).

Le bois de réaction est similaire au bois juvénile sur plusieurs points, mais il est formé par l'arbre pour des raisons différentes. Chez les résineux, le bois de réaction se forme dans les zones soumises à une contrainte de compression, d'où son nom « bois de compression » (Bowyer *et al.*, 2007). La structure et la composition

chimique du bois de compression diffèrent du bois ordinaire. Les trachéides ont une paroi cellulaire plus épaisse et elles sont plus rondes en coupe transversale, avec un angle des microfibrilles plus élevé que les trachéides du bois normal (Macdonald et Hubert, 2002). La présence du bois de compression peut avoir un effet sur les propriétés mécaniques. Dhubhain *et al*. (1988) ont constaté que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la proportion du bois de compression. Cependant, le module de rupture n'était pas affecté pour l'épinette de Sitka.

Le bois naturel est un bois « de fil », cependant, à cause des forces extérieures et des facteurs environnementaux, le fil de bois peut présenter une pente par rapport à l'axe longitudinal. La déviation de l'angle du fil peut affecter les propriétés mécaniques, comme c'est illustré à la figure 1.3 (Ross, 2010).

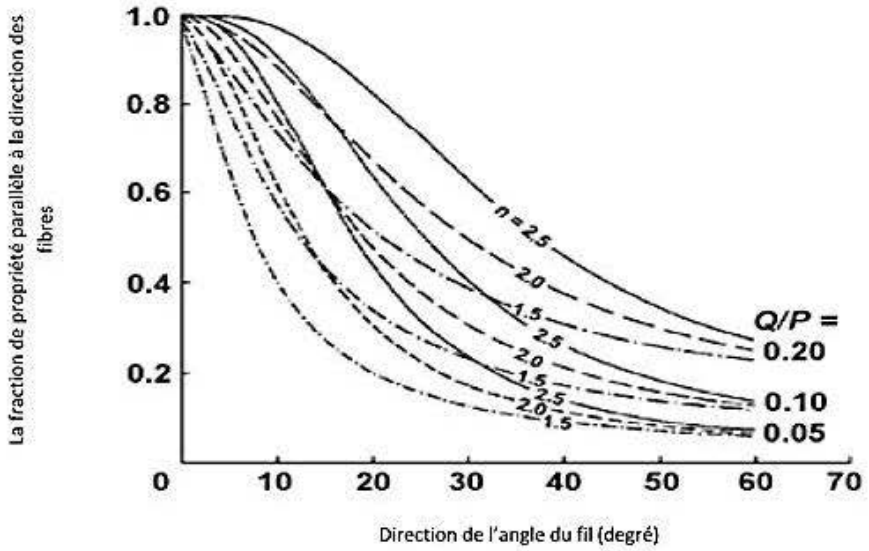

Figure 1.3 Effet de l'angle du fil sur les propriétés mécaniques du bois clair de défauts selon la formule de Hankinson. Q/P est le rapport entre la propriété mécanique à travers le fil (Q) et la compression parallèle au fil (P); n est une constante déterminée empiriquement (Ross, 2010).

1.1.5 Effet des coupes partielles sur la qualité du bois

L'effet des coupes partielles sur la croissance et la qualité des tiges résiduelles a été étudié pour différentes essences, dont l'épinette de Norvège (Mäkinen et Isomäki, 2004), l'épinette blanche (Gagné *et al.*, 2012), l'épinette de Sitka (Moore *et al.*, 2009) et l'épinette noire (Alteyrac, 2005; Tong *et al.*, 2009; Vincent *et al.,* 2011, 2009). Dans la majorité de ces études, les résultats montrent une augmentation de la croissance des tiges résiduelles à la suite d'une diminution de la densité d'un peuplement. Par contre, dans la littérature, les résultats sont contradictoires en ce qui concerne la masse volumique du bois. Plusieurs études montrent que les coupes partielles pourraient générer des tiges dont l'attribut de qualité est inférieur à celui du peuplement initial (Barbour *et al.*, 1994; Zhang, 1995). Leurs résultats montrent qu'à la suite d'un accroissement rapide, la proportion du bois initial augmente au détriment du bois final, aboutissant ainsi à une diminution de la masse volumique. Ces auteurs ont rapporté une réponse négative à la variation de la densité du bois après une intervention sylvicole. D'autres études (Gagné *et al.,* 2012; Koga et Zhang, 2002; Moschler *et al.*, 1989; Zobel, 1992) rapportaient que l'éclaircie commerciale avait peu ou pas d'effets sur la masse volumique du bois, et ce, pour plusieurs espèces d'arbres. Des études (Cregg *et al.*, 1988; Koga et Zhang, 2002) ont conclu que la masse volumique du bois est plus influencée par les facteurs climatiques que par le taux d'accroissement ou la densité du peuplement.

Quant aux propriétés mécaniques, d'une manière générale, la densité de peuplement affecte les modules d'élasticité et de rupture. De nombreuses études ont démontré qu'une augmentation de croissance en volume chez les résineux affectait négativement les propriétés d'élasticité (MOE) et les propriétés de résistance (MOR) (Bowyer *et al.,* 2007; Josza et Middleton, 1994; Zhang, 1995). Cette diminution est expliquée par le fait qu'un changement relativement faible de la masse volumique du bois peut être accompagné par un changement considérable des propriétés

mécaniques (Zhang *et al.,* 1997), puisque ces deux attributs du bois sont positivement et linéairement corrélés (Bowyer *et al.*, 2007). De plus, Zhang *et al.* (2006) ont démontré que la résistance (MOR) et la rigidité (MOE) du pin gris diminuent avec l'augmentation de l'intensité de l'éclaircie, d'une part, et avec l'augmentation de la classe de DHP, d'autre part. Par contre, Alteyrac (2005) a trouvé que la densité de peuplement de l'épinette noire n'avait pas d'influence significative, ni sur le MOE ni sur le MOR. Ces résultats s'accordent avec ceux de Vincent *et al.* (2011), qui ont démontré que le MOE de l'épinette noire n'a pas significativement varié après l'éclaircie, malgré la variation importante de la masse volumique. Également, Gagné *et al.* (2012) indiquent que, malgré une augmentation des accroissements en volume par tige d'épinette blanche après une éclaircie commerciale, la masse volumique, le MOE et le MOR ne semblent pas être significativement affectés au niveau du DHP, quels que soient l'âge de l'arbre et sa classe sociale.

Bendtsen (1978) a mentionné que l'effet de la croissance accélérée sur les propriétés du bois est mineur par rapport aux différences observées entre les propriétés du bois mature et celles du bois juvénile. Toutefois, les propriétés mécaniques dépendent de la présence et de la taille des nœuds, ainsi que du pourcentage de bois de compression (Zhang et Koubaa, 2009).

Des résultats contradictoires concernant l'effet des coupes partielles sur la qualité du bois ont été rapportés dans la littérature, en particulier dans l'étude de la masse volumique et des propriétés mécaniques. Pour mieux étudier ces propriétés, plusieurs paramètres sont à considérer, notamment la répartition géographique des espèces (Zhang *et al.,* 2006), l'effet des interventions sylvicoles, l'espacement initial, la qualité du site, l'âge des arbres, etc. (Koga *et al.*, 1997; Zobel, 1992).

Jusqu'à présent, plusieurs recherches se sont efforcées d'évaluer l'impact des coupes partielles sur les peuplements inéquiens de la forêt boréale du Québec (Liu *et al.*, 2007). Ces études ont porté notamment sur la qualité du bois de l'épinette noire

(Zhang et Koubaa, 2009), qui représente une essence d'intérêt pour le Québec et qui reste encore peu étudiée. Il serait donc nécessaire d'évaluer l'effet des régimes des coupes partielles sur la qualité du bois et la valeur des produits de l'épinette noire, ce qui faciliterait la modélisation des coupes partielles sur les espèces et confirmerait leurs effets bénéfiques sur la croissance et la qualité du bois.

1.2 Méthodes non destructives pour l'évaluation de la qualité du bois

1.2.1 Utilisation des méthodes non destructives pour évaluer les propriétés mécaniques du bois

Les méthodes existantes pour déterminer le MOE peuvent être divisées en deux groupes : les méthodes d'essais statiques et les méthodes d'essais dynamiques. D'une part, les techniques statiques sont les plus communément utilisées et elles décrivent une méthode d'essai normalisée pour la détermination du MOE (Machek *et al.*, 2001). D'autre part, la méthode dynamique, ou encore non destructive, est un processus qui vise à mesurer les propriétés mécaniques, physiques et chimiques du matériau sans l'endommager (Liang et Fu, 2007; Ross *et al.*, 1998). La détermination du module d'élasticité par méthode dynamique date de la Deuxième Guerre mondiale, lorsque les essais en laboratoire concernant les produits forestiers ont montré que le module d'élasticité du bois peut être mesuré par l'utilisation d'ondes sonores (Swamy et Rigby, 1971). Les méthodes de mesures non destructives des propriétés mécaniques sont depuis utilisées dans le contrôle non destructif des matériaux à l'échelle industrielle dans différents domaines. À titre d'exemple, dans l'industrie des produits forestiers, une large gamme de techniques d'évaluation non destructive, y compris les vibrations de basse fréquence, l'onde mécanique, l'ultrason, la thermographie infrarouge et les rayons X, ont été testées et sont en cours d'adoption. Le choix d'une technique ou d'une autre dépend principalement de la

Rapport-Gratuit.com

nature des matériaux à contrôler et du type de l'information recherchée (détection de défauts ou mesure d'un paramètre physique) (Kawamoto et Williams, 2002).

Parmi ces techniques, l'ondes de mécanique et l'ultrason sont actuellement les plus utilisés pour évaluer les propriétés de résistance des produits et des matériaux à base de bois, et ce, en raison de leurs avantages considérables, à savoir une technologie portable, rapide, économique et facilement utilisable (Chiu *et al.*, 2012).

1.2.2 Méthode de l'onde mécanique

Pour illustrer cette technique, Wang *et al.* (2001) ont considéré l'application d'une onde mécanique unidimensionnelle à une barre homogène viscoélastique (figure 1.4). Ensuite, un coup de marteau est donné sur la section transversale de la barre, une onde de contrainte de compression est alors induite et se déplace de gauche à droite à une vitesse C. Puis, les ondes sont reflétées par les interfaces internes du matériau et les bornes du spécimen, comme une onde de tension, et elles recommencent à se déplacer vers l'arrière en redescendant le long de la barre. L'énergie est dissipée sous la forme d'une onde qui se déplace à travers la barre; ainsi, même si la vitesse de l'onde reste constante, le mouvement des particules diminue à chaque passage successif de l'onde. Finalement, toutes les particules de la barre se stabilisent.

En constatant le mouvement d'une section transversale à proximité de l'extrémité de la barre, en réponse à la propagation d'une onde de contrainte, on observe une forme d'ondes qui se composent des impulsions également séparées (Δt), dont l'amplitude décroît exponentiellement avec le temps (figure 1.5).

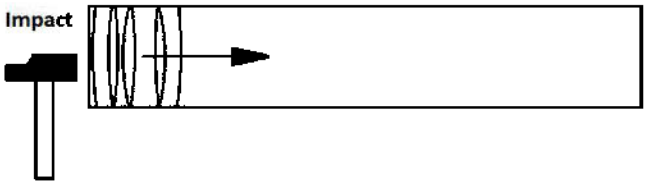

Figure 1.4 Principe de mesure du temps de propagation de l'onde mécanique dans une poutre de bois (Wang *et al.*, 2001).

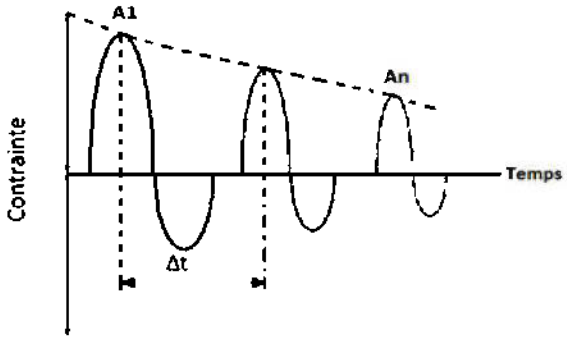

Figure 1.5 Réponse théorique de l'extrémité d'une barre viscoélastique (section transversale), en réponse à une propagation d'une onde mécanique (Wang *et al.*, 2001).

La vitesse de propagation C (en m/s) de l'onde décrite ci-dessus peut être déterminée par le couplage de la mesure du temps entre les impulsions (Δt) et de la longueur L de la barre, comme l'indique la formule ci-dessous.

$$C = \frac{2\,L}{\Delta t} \tag{1.2}$$

Le MOE dynamique (en Pa) peut être calculé par l'utilisation de la vitesse C et de la densité de la barre ρ, comme le montre la formule 1.3.

$$MOE_{dyn} = C^2\rho \tag{1.3}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Dans le cas d'utilisation de cette technique avec le bois, la pertinence d'une théorie d'une onde unidimensionnelle pour décrire le comportement des ondes mécanique pourrait être considérée comme douteuse, puisque le bois est un matériau hétérogène et anisotrope. Cependant, plusieurs chercheurs ont constaté que la théorie d'une onde unidimensionnelle est adéquate pour décrire le comportement des ondes avec le bois et les produits à base de bois (Ross et Pellerin, 1994). Les instruments utilisés pour la mesure de l'onde mécanique sont développés sur la base de la relation entre le temps de propagation longitudinale de l'onde mécanique, la masse volumique du matériau et le MOE.

Dans le cas de l'équipement Metriguard, modèle 239A (figure 1.6), le principe de mesure du temps de propagation consiste à générer des ondes mécaniques à une extrémité de l'échantillon de bois, sur la face tangentielle, avec un accéléromètre de départ qui ressemble à un marteau; l'accéléromètre d'arrêt est solidement placé sur l'autre extrémité pour détecter les ondes mécaniques. Le MOE dynamique (en GPa) peut être calculé par la formule qui suit (Liang et Fu, 2007).

$$MOE_{dyn} = \frac{C^2 \rho}{g} \tag{1.4}$$

Où :

- C : La vitesse de propagation (m/s).
- ρ : La masse volumique du matériau (kg/m^3).
- g : L'accélération de la pesanteur (m.s^{-2}).

1.2.3 Vibration transversale

Plusieurs domaines de recherche ont examiné l'utilisation de la technique de vibration transversale (vibration en flexion) pour déterminer la condition physique d'un

matériau ou évaluer le module d'élasticité des poutres de structure sans les affecter par une charge qui pourrait leur causer du dommage. La théorie de cette technique repose sur le fait que tous les matériaux ont une fréquence naturelle à laquelle ils vibrent (Emerson *et al.*, 1998).

Figure 1.6 Mesure de temps de propagation par le système Metriguard, modèle 239A (Zaturecky *et al.*, 2006).

Les techniques de vibration ont reçu une attention particulière pour l'application des méthodes non destructives (Jayne, 1959; Ross *et al.*, 1991; Ross et Pellerin, 1994). Wang *et al.* (2001) ont illustré la théorie de cette méthode (le modèle de Timoshenko). Selon les auteurs une analogie peut être faite entre le comportement d'une poutre vibrante et la vibration d'une masse qui se fixe au ressort en apesanteur par rapport à la force d'amortissement interne (figure 1.7).

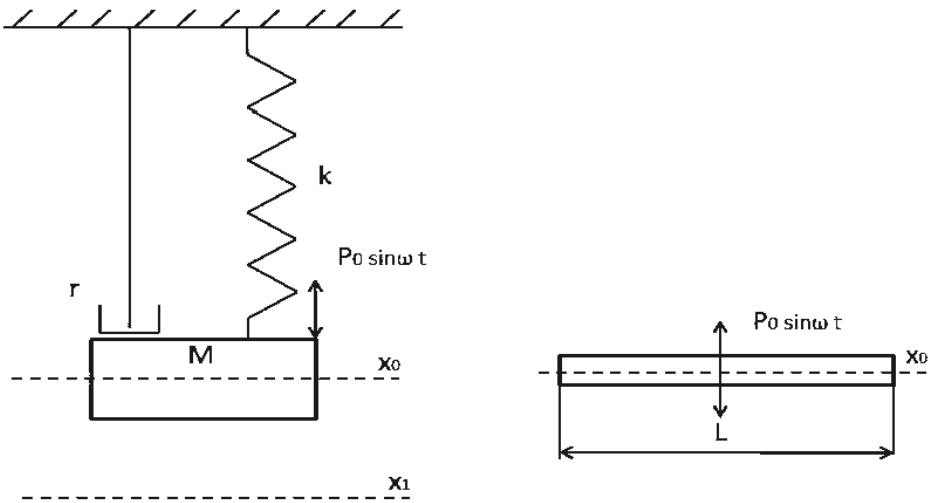

Figure 1.7 (a) Modèle de vibration amortisseur/ressort.
(b) Poutre en vibration transversale (Wang *et al.*, 2001).

Dans la figure 1.7, la masse M est soutenue par un corps rigide, un ressort en apesanteur, dont la constante élastique est donnée par K. Le frottement interne ou l'amortissement est donné par r, qui représente le coefficient de l'amortisseur visqueux. Une fonction de forçage égal ($P_0 \sin\omega t$) à zéro est appliquée pour la vibration forcée et libre, son équation de mouvement peut être exprimée par la formule ci-dessous.

$$M\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right) + r\left(\frac{dx}{dt}\right) + Kx = P_0 \sin \omega t \tag{1.5}$$

L'équation 1.5 peut être résolue pour K ou r. Selon Timoshenko *et al.* (1974), une solution pour K conduira à une expression du MOE_{dyn} (en Pa) selon la formule qui suit.

$$MOE_{dyn} = \frac{f_r^{\,2}\, W\, L^3}{C\, I\, g} \tag{1.6}$$

Où :

- f_r : La fréquence de résonance (Hz).
- C : La constante égale à 12,65 pour une poutre posée librement sur deux points nodaux et égale à 2,46 pour une poutre supportée à une de ses extrémités.
- W : Le poids de la poutre (kg).
- L : La portée de la poutre (m).
- I : Le moment d'inertie (m^4).
- g : L'accélération de pesanteur (m/s^2)

1.2.4 Technique de l'ultrason

L'ultrason est une onde acoustique ou élastique dont la fréquence est supérieure à celle des sons de haute fréquence (20 kHz-100 MHz). L'onde est définie comme une perturbation d'un milieu solide ou fluide se propageant de proche en proche dans le milieu par les actions des particules élémentaires sur leurs voisines (Brancheriau, 2013). L'ultrason est souvent utilisé dans les matériaux homogènes et non poreux. Dans le bois et les matériaux composites de bois, il est moins efficace en raison de la nature poreuse et non homogène de la matière (Beall, 2002). Les ultrasons sont exploités pour la détection de défauts à l'intérieur d'un matériau, tels que les nœuds et les caries dans le bois, et servent également à évaluer la résistance mécanique.

Cette technique est basée sur la transmission et la réflexion d'ondes de type ultrason à l'intérieur d'un matériau (Emerson *et al.,* 1998). Le procédé le plus utilisé par les méthodes d'ultrason fait appel à l'effet piézoélectrique. Ces ondes ultrasonores ont l'avantage d'être utilisables en émission/réception. À l'émission, l'élément piézoélectrique est mis en vibration par un signal électrique (Lefebvre *et al.*, 2004). Lors de la réception, la vibration ultrasonore se fait par deux modes : réflexion et atténuation (Kawamoto et Williams, 2002). Le mode de réflexion (ou impulsion-

écho) est la méthode la plus employée. Selon Brancheriau (2013) la méthode consiste à utiliser un seul transducteur, qui sert à la fois à l'envoi (écho d'émission) et à la réception des ondes pulsées, qui sont réfléchies vers l'appareil (figure 1.8). L'onde ultrasonore réfléchie provient d'une interface, telle que la paroi arrière de l'objet (écho de fond), ou d'une imperfection dans l'objet (écho de défaut). Les signaux d'entrée et de retour sont affichés sur un instrument à ultrasons sous la forme d'un signal ayant une amplitude représentant l'intensité de la réflexion et de la distance. Ces données représentent le temps d'arrivée de la réflexion. L'écho de défaut entre les deux échos permet d'établir sa position dans la profondeur de l'échantillon.

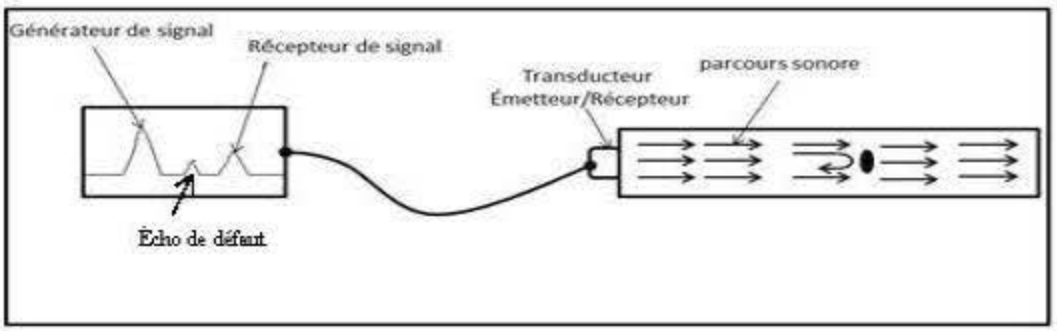

Figure 1.8 Principe du contrôle ultrasonore en mode réflexion (FAA, 2014).

Concernant le mode d'atténuation, un émetteur envoie à travers une surface des impulsions ultrasoniques détectées par un récepteur (figure 1.9). Les paramètres à retenir sont le temps de propagation et l'atténuation. Des imperfections entre l'émetteur et le récepteur réduisent la quantité de sons émis. L'utilisation d'un morceau de plexiglas comme référence augmente l'efficacité du procédé en réduisant les pertes d'énergie d'ondes ultrasonores (Beall, 2002).

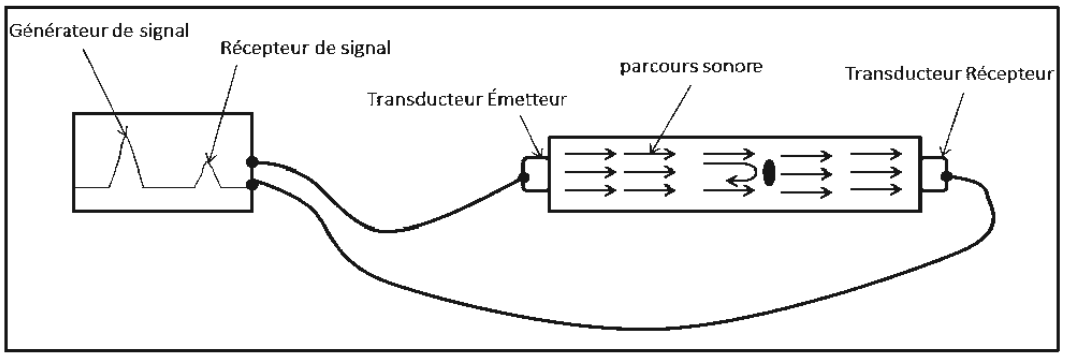

Figure 1.9 Principe du contrôle ultrasonore d'atténuation (FAA, 2014).

Pour l'ultrason, le signal reçu est le résultat d'interactions multiples d'ondes de réflexion et de changements de mode (Vary, 1988). Différentes caractéristiques des signaux peuvent être décrites par des paramètres tels que les mesures de l'atténuation du signal, de la vitesse, de la forme et de la fréquence. La vitesse du signal (C) est calculée en fonction du temps de transit (t), qui est le temps de propagation de l'émetteur au récepteur, sur la base de l'hypothèse d'un chemin de signal direct de distance (d) dans un milieu homogène (Kawamoto et Williams, 2002).

$$C = \frac{d}{t} \tag{1.7}$$

En ce qui concerne l'évaluation des produits du bois, les techniques ultrasonores sont recommandées et leurs usages offrent plusieurs avantages, y compris le faible coût de l'équipement et la simplicité relative de son utilisation (De Oliveira *et al.*, 2005; Erikson *et al.*, 2000). La masse volumique est un des paramètres les plus couramment utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques du bois, et c'est un facteur également important qui affecte la vitesse d'une onde ultrasonore (Karsulovic *et al.*, 2000). Par conséquent, on peut s'attendre à une gamme de valeurs concernant la propriété de la vitesse de propagation (Bucur, 2006).

Jayne (1959) a proposé l'hypothèse que les propriétés de stockage d'énergie et de dissipation dans le bois sont contrôlées par les mêmes mécanismes qui déterminent

son comportement. En conséquence, les relations utiles entre les propriétés acoustiques et statiques sont réalisables, d'où la relation entre la vitesse d'ultrason C (en m/s), la densité ρ (en m^3/kg) et le MOE dynamique (Pa).

$$\mathrm{MOE_{dyn}} = \rho C^2 \tag{1.8}$$

L'exploitation et l'application de cette méthode ont été rapidement mises au point pour ses multiples avantages dans les domaines du bois et des panneaux à base de bois. De nombreuses études sur les essais et l'évaluation du MOE par la méthode d'ultrason ont été menées par un grand nombre de chercheurs. Ceci a ouvert la voie à l'application réussie des méthodes non destructives sur les pieds d'arbres avant la récolte (Auty et Achim, 2008; Jones et Emms, 2010). D'autres outils ont été développés pour des applications plus avancées dans la chaîne de production du bois (Paradis, 2011). Ils peuvent être utilisés soit pour le bois de sciage, les billes de bois, les panneaux composites de bois, etc. (Grabianowski *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2005; Kinra, 1994; Ross *et al.*, 2005).

Au Canada, l'outil acoustique est très rarement exploité pour faire une sélection de bois récolté en fonction de ses propriétés mécaniques avant l'étape du sciage (Paradis, 2011). Cependant, dans plusieurs pays comme les États-Unis et la Nouvelle-Zélande, cet outil est utilisé dans différents niveaux de la chaîne d'approvisionnement du produit forestier (Auty et Achim, 2008; Jones et Emms, 2010).

1.2.5 Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique

Plusieurs études ont caractérisé la relation entre le module d'élasticité obtenu par un essai statique normalisé et par un essai non destructif, notamment avec la méthode d'onde mécanique, l'essai vibratoire et le procédé d'ultrason (Chiu *et al.*, 2012;

Haines *et al.*, 1996; Halabe *et al.*, 1997; Hassan *et al.*, 2013; Sandoz *et al.*, 2000; Wang et Ko, 1998; Hernández *et al.*, 1998).

Ces études ont été réalisées avec différentes essences de bois. Cependant, peu de recherches ont été effectuées sur les espèces indigènes de la forêt boréale canadienne (Paradis, 2011), en particulier l'épinette noire. En outre, on remarque à travers ces études que la force de relation entre le module d'élasticité statique et dynamique est variable, non seulement d'une espèce à l'autre, mais aussi pour la même espèce; les résultats montrent que le facteur de corrélation varie avec le changement de la méthode non destructive utilisée. De plus, si la mesure est effectuée sur un arbre sur pied, sur une bille ou sur un bois de sciage, la teneur en humidité des échantillons testés influence énormément la force de relation entre les variables d'intérêt.

Ross *et al.* (1991) ont utilisé des techniques de vibration transversale pour estimer la qualité de l'épinette, du pin et du sapin. Ils ont observé une relation utile entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat} en flexion (r = 0,99).

Hassan *et al.* (2013) ont étudié les relations entre le module d'élasticité statique (MOE_{stat}), obtenu par un essai de flexion statique (selon la norme BS 373), et le module d'élasticité dynamique, obtenu par un essai non destructif avec la technique de vibration longitudinale et de flexion, de même que par un essai ultrasonore. L'essence de bois utilisée était le pin sylvestre. Les échantillons (20 mm x 60 mm x 500 mm) avaient une teneur en humidité de 12 %. Ces essais ont montré que les coefficients de corrélation (R^2) entre le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique, déterminés par la vibration de flexion (MOE_f), la vibration longitudinale (MOE_{lv}) et les techniques d'ultrason (MOE_{us}), sont respectivement de 0,96, de 0,86 et de 0,73, indiquant ainsi de fortes corrélations.

Une étude similaire a été effectuée par Liang et Fu (2007), dont l'objectif était d'examiner le module d'élasticité dynamique du pin tordu par trois méthodes non

Rapport-Gratuit.com

destructives : la méthode de l'onde mécanique, de l'ultrason et de la vibration longitudinale contre la flexion statique trois points.

Les résultats montrent que les trois méthodes utilisées sont utiles pour prédire le MOE. La méthode vibratoire avait la précision la plus élevée par rapport aux deux autres méthodes. Les valeurs moyennes des trois modules d'élasticité dynamique du MOE_{us}, du MOE_{om} et du MOE_{v} étaient respectivement 15,04 GPa, 13,64 GPa et 13,31 GPa. Les résultats montrent que le MOE_{v} obtenu par la méthode vibratoire était le plus proche du MOE_{stat} obtenu par la méthode statique, soit 11,73 GPa.

Chiu *et al.* (2012) ont évalué le module d'élasticité dynamique, mesuré sur des billes récoltées à différentes hauteurs de l'arbre, et de corréler le résultat avec le MOE statique en flexion de petits échantillons sciés, et ce, en utilisant trois techniques non destructives : la méthode ultrasonique, l'onde mécanique et la vibration longitudinale. Pour ce faire, l'auteur a utilisé 12 cèdres à encens âgés de 32 ans. Les résultats montrent principalement que les valeurs du MOE statique et dynamique ont une tendance semblable, qui décroît avec la hauteur de l'arbre : 1/4 H > 1/2 H > 3/4 H. Les auteurs expliquent cette tendance par le fait que la densité du bois diminue de la base au sommet de l'arbre.

Des études semblables ont indiqué que les valeurs du module d'élasticité dynamique sont souvent plus importantes que celles du MOE statique. Ceci est attribuable aux propriétés viscoplastiques du bois, qui est un matériau hautement résistant aux chocs (Halabe *et al.,* 1997).

Grâce aux plusieurs observations expérimentales, on peut se risquer d'ordonner les différents modules obtenus par différents essais comme suit (Brancheriau, 2013).

$$MOE_{\text{statique 3 points}} < MOE_{\text{vibration longitudinale}} < MOE_{\text{onde mécanique}} < MOE_{\text{ultrason}}$$

Ainsi, on peut conclure que la force de la corrélation qui existe entre le MOE_{sat} et le MOE_{dyn} peut dépendre de plusieurs facteurs, essentiellement l'essence du bois étudiée, l'outil acoustique utilisé et la teneur en humidité des échantillons.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAPITRE 2

MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1 Aires d'étude et caractéristiques des sites

Les sites retenus dans le cadre de ce projet ont été sélectionnés parmi des placettes permanentes du réseau d'expérimentation des coupes partielles de l'Abitibi (Fenton *et al.*, 2013) (figure 2.1). Depuis 1998, 11 blocs expérimentaux ont été installés, dans des peuplements purs ou mélangés d'épinettes noires, en utilisant un système de récolte basé sur une méthode entièrement mécanisée et couramment utilisée sur le territoire.

Le climat de cette région est continental, avec une température annuelle moyenne de 0,7 °C. Les précipitations annuelles sont de 889 mm, avec une moyenne mensuelle maximale de 101,9 mm au mois de septembre (Environnement Canada, 2004, cité dans Braido dos Santos, 2014). La topographie est relativement plane et l'altitude avoisine environ 300 à 350 m. Le sol est de type argileux, lourd, mal drainé, avec une couche de matières organiques de 10 à 20 cm d'épaisseur (Braido dos Santos, 2014).

Nous avons concentré nos analyses sur les peuplements purs, dominés par l'épinette noire, et de structure irrégulière. Le choix des sites d'étude s'est effectué en fonction du diamètre des arbres à échantillonner. Chacun des sites a été soumis à des traitements, trois sites de peuplements d'épinette noire (Cramolet, Villars et Muskuchii) ont été échantillonnés au cours de l'été et de l'automne 2011/2012. Un

seul site témoin n'ayant subi aucune intervention et représentant des caractéristiques similaires a été sectionné à proximité des sites traités. Les caractéristiques des sites sont représentées au tableau 2.1.

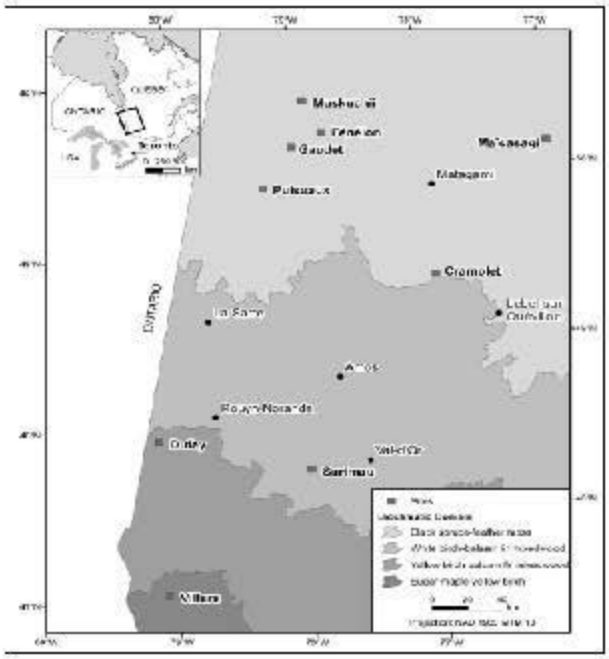

Figure 2.1 Carte de localisation des sites d'étude du réseau expérimental de coupes partielles (Fenton *et al.*, 2013).

2.2 Échantillonnage

Des échantillonnages destructifs ont été réalisés dans les trois sites (une somme de 38 arbres) à des fins d'analyse des propriétés mécaniques et acoustiques du bois après des coupes partielles (tableau 2.2). Les billes de bois ont été échantillonnées entre la hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur au niveau de 2 m. Le DHP de chaque tige a été mesuré et a servi à la classification des billes pour avoir trois classes de diamètre (tableau 2.2). Pour notre échantillonnage, les billes sélectionnées ne représentaient pas des défauts flagrants en termes de défilement, courbure, gros nœuds, pourriture,

bois de compression etc. Les billes de bois ont été ensuite séchées à l'air pendant une année à l'entrepôt du Laboratoire de caractérisation des biomatériaux de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Il est à noter qu'après sciage, les échantillons présentant des gerces et des fissures causées par le séchage à l'air libre ont été rejetés.

Tableau 2.1

Caractéristiques des sites d'étude

Caractéristiques	**Sites**		
	Cramolet	Villars	Muskuchii
Latitude, longitude	48° N, 77° W	46° N, 79° W	50° N, 78° W
Âge du peuplement[1]	99	95	93
DHP moyen	18,18	20,4	17,27
Surface terrière initiale (m^2/ha)	24,84	18,72	19,75
Saison de traitement	Hiver 2007	Automne 2005	Été 1999/2000
Saison de récolte	Automne 2012	Été 2011	Été 2011
Volume marchand récolté	0 % non traité et 0-50 % modéré	0-50 % modéré	75 %-100 % fort

[1] Âge du peuplement soit du temps depuis le dernier feu, moyenne de tous les individus échantillonnés dans les sites

Tableau 2.2

Détails de l'échantillonnage effectué

		Site			**Total**
Classes de DHP	**Intervalles de diamètre**	Cramolet	Villars	Muskuchii	
C1	de 10 à 15 cm	5	4	5	14
C2	de 15,1 à 20 cm	4	4	7	15
C3	> 20,1 cm	4	4	1	9

2.3 Protocole expérimental

2.3.1 Préparation des échantillons

Les billes de bois échantillonnées à hauteur de poitrine (DHP) ont été sciées en planches. Chaque planche centrale de chaque bille a été sélectionnée pour étudier l'effet de l'éclaircie sur les propriétés mécaniques du bois. Des languettes de section (10 mm x 10 mm) ont été coupées de l'écorce à la moelle. Ces dimensions ont été choisies puisque la période de traitement de la coupe partielle est plus ou moins de dix ans, selon les différents sites d'étude. Les dix cernes qui se situent près de l'écorce représentent la période après la coupe partielle (AP), les cernes qui la précèdent (juste avant) représentent la période avant la coupe partielle (Av) (figure 2.2). Dans le cas de grandes planches (qui proviennent de grandes billes), il est possible de continuer d'échantillonner des planches dans la partie avant le traitement (Av2, Av3), et ainsi de suite jusqu'à ce que la moelle soit atteinte.

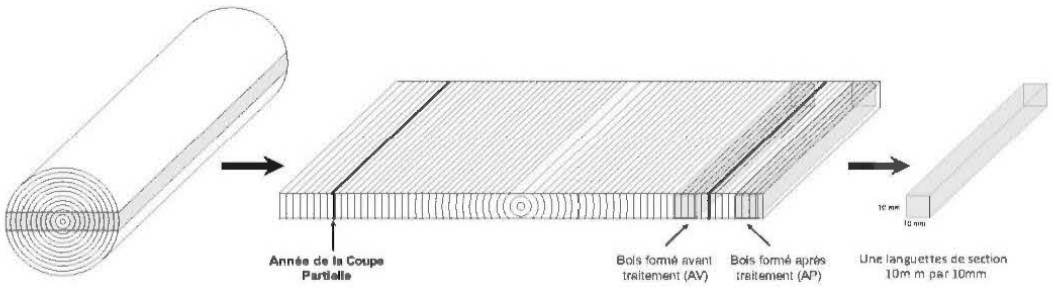

Figure 2.2 Représentation schématique de la répartition des échantillons pour les tests mécaniques et acoustiques (Lemay, 2012).

À partir de ces languettes (figure 2.2), des éprouvettes claires et sans défauts ont été préparées pour chaque type de test mécanique.

- Flexion : 10 mm (radial) x 10 mm (tangentiel) x 150 mm (longitudinal).

- Compression parallèle : 10 mm (radial) x 10 mm (tangentiel) x 40 mm (longitudinal).
- Compression perpendiculaire : 10 mm (radial) x 10 mm (tangentiel) x 10 mm (longitudinal).

Le module d'élasticité dynamique a été déterminé pour chaque échantillon à l'aide d'ultrasons. Après l'évaluation non destructive, les échantillons ont été testés dans un essai de flexion statique, de compression parallèle et de compression perpendiculaire.

2.3.2 Mesure des propriétés mécaniques du bois

Afin d'analyser les propriétés mécaniques du bois suivant les coupes partielles, des essais de flexion, de compression parallèle et perpendiculaire ont été réalisés sur les échantillons avant et après les traitements; leur teneur en humidité moyenne était de l'ordre de 10 %. Cette procédure a été réalisée à l'aide de l'appareil d'essai universel Zwick/Roell Z20 (figure 2.3) et selon la norme ASTM D-143.

Figure 2.3 (a) Test de flexion trois points et de compression parallèle (b) à l'aide de l'appareil d'essai universel Zwick/Roell Z20.

- ✓ Un test de flexion statique trois points a été réalisé selon les spécifications de la norme ASTM D143. Les spécifications utilisées étaient légèrement différentes de celles de la norme afin de s'adapter aux petites dimensions des échantillons. La distance entre les appuis a été fixée à 130 mm et la vitesse de la presse a été établie à 0,51 mm/min. Les éprouvettes ont été disposées sur le banc de flexion avec les cernes orientés horizontalement et le côté de la moelle dirigé vers le haut.
- ✓ Pour le test de compression parallèle, la force est appliquée parallèlement au fil, soit selon l'axe longitudinal, et la vitesse de la presse est établie à 0,12 mm/min.
- ✓ Pour le test de compression perpendiculaire, la force est appliquée perpendiculaire au fil, soit selon l'axe radial de l'échantillon, et la vitesse de la presse est établie à 0,30 mm/min.

2.3.3 Propriétés acoustiques

Afin de déterminer le module d'élasticité dynamique (MOE_{dyn}) des échantillons, un test de mesure du temps de propagation des ondes d'ultrasons est fait en utilisant un appareil à ultrasons fabriqué par la compagnie Sonatest inc. (Texas, États-Unis). Le modèle utilisé est le Sonatest 380M, avec deux transducteurs à embouts mous de forme cylindrique.

Les transducteurs sont placés sur les extrémités de l'échantillon, un comme émetteur et l'autre comme récepteur. On applique une pression constante (afin d'obtenir une lecture constante du temps de propagation sur l'appareil). Le temps de transmission de l'ultrason sera affiché ensuite sur l'écran du Sonatest 380M (figure 2.4). Le poids et les dimensions sont aussi mesurés afin de calculer la masse volumique apparente. La teneur en humidité a été mesurée par la méthode de séchage et de pesage.

Le MOE_{dyn} (en Pa) est évalué en se basant sur la masse volumique apparente de l'échantillon (ρ_a), multipliée par la vitesse acoustique (en m/s) élevée au carré (V_b^2), selon l'équation ci-dessous.

$$MOE_{dyn} = \rho_a \times V_b^{\ 2} \tag{2.1}$$

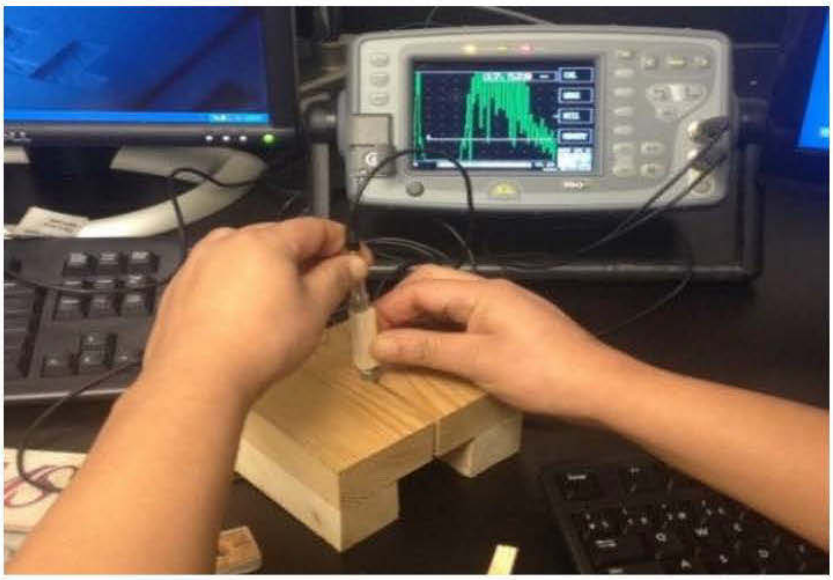

Figure 2.4 Test de vitesse de propagation du son à l'aide de l'appareil Sonatest 380M.

La masse volumique apparente est calculée selon la formule qui suit.

$$\rho_a = \frac{M_h}{V_h} \tag{2.2}$$

Où :

- M_h : La masse humide de l'échantillon.
- V_h : Le volume humide de l'échantillon.
- ρ_a : La masse volumique apparente du bois (kg/m^3).

La vitesse de propagation est calculée selon l'équation ci-dessous.

$$V_b = \frac{d_b}{t_b - F_c} \tag{2.3}$$

Où :

- V_b : La vitesse de propagation du son dans le bois (m/s).
- d_b : La distance mesurée de l'échantillon de bois (m).
- t_b : Le temps mesuré dans l'échantillon de bois (s).
- F_c : Le facteur de correction (s).

Le temps mis par l'onde pour traverser l'échantillon de bois inclut le temps de parcours du circuit électrique. Dans une première étape, avant d'effectuer le test sur nos échantillons, il faut donc établir un facteur de correction (F_c), qui est calculé en utilisant un échantillon de référence, le plexiglas.

Le temps de propagation du son est mesuré selon l'axe longitudinal, pour les échantillons du test de flexion et de compression parallèle, et selon la direction tangentielle, pour le test de compression perpendiculaire.

2.4 Analyse statistique des résultats

Les données ont subi une analyse de variance à l'aide d'un modèle linéaire à effets mixtes. Le choix de ce modèle est attribuable à la présence de données non équilibrées et manquantes. Le modèle inclut simultanément des effets fixes et des effets aléatoires. Notre base de données n'est pas balancée en fonction de la distribution des traitements parmi les sites. Tous les facteurs étudiés sont considérés comme fixes à l'exception de l'arbre, qui a été jugé comme aléatoire. Le seuil de

Rapport-Gratuit.com

signification de 0,05 (α = 0,05) a été utilisé pour déclarer l'effet d'un facteur, d'une interaction ou d'une covariable significative. Il faut noter que le nombre d'interactions incluses dans le modèle est limité par la taille de l'échantillonnage; ainsi, seules les interactions ayant une signification pratique ont été incluses dans les modèles.

L'équation 2.4 montre le modèle utilisé pour analyser les effets des coupes partielles sur les propriétés mécaniques du bois étudiées.

$$M_{ijklm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma + \delta_k + \theta_l + \sigma_m + (\theta.\delta)_{lk} + \varepsilon_{ijklm} \qquad (2.4)$$

Où :

- μ : La moyenne de la propriété.
- α_i : L'effet du site.
- β_j : L'effet du traitement.
- γ : L'effet attribuable à l'arbre.
- δ_k : L'effet du diamètre de l'arbre.
- θ_l : L'effet de la propriété avant traitement.
- σ_m : L'effet de la masse volumique de l'échantillon (après traitement).
- ε_{ijklm} : Le terme de l'erreur.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Statistiques descriptives

On présente dans le tableau 3.1 les valeurs moyennes pour la masse volumique apparente. On constate une faible variation de cette propriété entre les sites, soit de 531 à 573 kg/m^3, à 10 % d'humidité. La moyenne de la masse volumique trouvée dans la présente étude pour le bois d'épinette noire est plus élevée que celles rapportées par Braido dos Santos (2014), 437 kg/m^3, par Ourais (2012), 451 kg/m^3, par Vincent *et al.* (2011), 471-493 kg/m^3, et par Jessome (1977), 480 kg/m^3. Cet écart est attribuable à la différence entre la méthode de la mesure de cette propriété utilisée dans cette étude (mesure du poids et du volume) et celle employée dans les autres études (densitométrie à rayons X). De plus, les valeurs que nous rapportons sont celles des masses volumiques à une teneur en humidité de 10 %, alors que celles des études précédentes sont des masses volumiques basales.

Les valeurs moyennes pour les propriétés mécaniques en flexion trois points figurent dans le tableau 3.1. On y constate une légère variation intra-site, autant pour la contrainte (σ_{max}) que pour la contrainte à la rupture (σ_{rup}). La contrainte maximale varie entre 108 et 109 MPa, elle est supérieure à celle trouvée par Jessome (1977), 36,7 MPa. Quant à la σ_{rup}, pour le bois d'épinette noire, sa valeur moyenne varie entre 88 et 89 MPa, cette valeur est supérieure à celle trouvée par Jessome (1977),

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

62,7 MPa, et elle est inférieure à celle trouvée par Alteyrac (2005), 96,1 MPa, mesuré à la hauteur de 2,4 m. Pour ce qui est du MOE, on constate une faible variation de cette propriété entre les sites, sa valeur moyenne varie entre 9 222 MPa et 9 849 MPa. La moyenne du MOE trouvée dans la présente étude se compare à celles rapportées par Vincent *et al.* (2011), 9 630 MPa, et par Jessome (1977), 9 930 MPa, mais elle est supérieure à celle trouvée par Alteyrac (2005), 7 064 MPa.

Les résultats du tableau 3.1 montrent les propriétés mécaniques en compression parallèle de l'épinette noire au DHP. On constate une importante variation entre les sites du module d'élasticité en compression parallèle. Le MOE moyen varie de 3 385 MPa à 4 866 MPa, ce qui correspond à une variation de 43 %. La valeur moyenne du MOE des trois sites est de 3 893 MPa, cette valeur est inférieure à celle trouvée par Hanzouli (2013), 4 831 MPa, pour le bois d'épinette noire séché à l'air.

La valeur moyenne de la contrainte maximale en compression parallèle varie de 73 MPa à 107 MPa; cette valeur est supérieure à celle rapportée par Jessome (1977), 30,3 MPa. De la même façon, la contrainte à la rupture en compression parallèle varie entre les sites. La valeur moyenne de la contrainte à la rupture pour les trois sites est de 83 MPa; cette valeur est supérieure à celle rapportée par Hanzouli (2013), qui est de 54 MPa pour l'épinette noire.

La valeur moyenne pour le module d'élasticité en compression perpendiculaire varie de 31 MPa à 33 MPa (tableau 3.1), ce qui correspond à une variation de 12 %.Les résultats du tableau 3.1 montrent que la contrainte maximale varie entre les sites. La valeur la plus élevée de contrainte maximale est obtenue pour le site Cramolet, qui présente une légère différence de 6 % avec le site Muskuchii, alors que la différence avec le site Villars est la plus importante, soit de 28 %. La valeur moyenne de σ_{max} est de 33 MPa. Quant à la contrainte à la rupture, le site Cramolet possède la valeur la plus élevée, cette différence est de 48 % et de 18 % par rapport aux deux sites Villard et Muskuchii, respectivement.

Tableau 3.1

Valeurs moyennes[1], coefficients de variation (COV) (entre parenthèses) de la masse volumique et propriétés mécaniques en flexion trois points, en compression parallèle et en compression perpendiculaire de l'épinette noire au DHP, pour tous les traitements et les classes de DHP de trois peuplements en Abitibi-Témiscamingue

	Flexion trois points				**Compression parallèle**			**Compression perpendiculaire**		
Sites	Mv	MOE	σ_{max}	σ_{rup}	MOE	σ_{max}	σ_{rup}	MOE	σ_{max}	σ_{rup}
	(kg/m^3)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Muskuchii	531 (11)	9222 (20)	108 (16)	89 (19)	3428 (30)	75 (40)	73 (41)	33 (57)	8,73 (15)	5,65 (20)
Villars	513 (8)	9141 (16)	109 (15)	88 (18)	3385 (28)	73 (41)	72 (42)	31 (44)	7,22 (19)	4,51 (19)
Cramolet	573 (9)	9849 (22)	109 (16)	89 (14)	4866 (9)	107 (16)	106 (17)	35 (75)	9,29 (29)	6,68 (41)
Moyenne de tous les sites	539 (9)	9404 (19)	108 (14)	89 (17)	3893 (22)	85 (32)	83 (33)	33 (58)	8,41 (21)	5,61 (21)

[1] Valeurs moyennes de tous les échantillons prélevées de la moelle à l'écores (AP, AV1, AV2……etc.)

3.2 Variation radiale des propriétés mécaniques de l'épinette noire

Les variations radiales (en fonction de la position par rapport à la moelle) des MOE en flexion, en compression parallèle au fil et en compression perpendiculaire au DHP de 1,3 m en plus de la masse volumique. Les résultats ci-dessous présentent une moyenne des 8 arbres de la classe C3 (> 20,1 cm).

- Masse volumique

La figure 3.1 illustre la variation de la masse volumique apparente dans la direction radiale de la moelle à l'écorce de l'épinette noire à hauteur de poitrine (DHP) de 1,3 m. Ce profil est globalement similaire aux patrons de variations de la masse volumique des cernes trouvés pour l'épinette noire du milieu boréal (Alteyrac, 2005; Ourais, 2012; Braido dos Santos, 2014). Panshin et De Zeeuw (1980) ont rapporté que la variation de la masse du bois des conifères dans le sens radial augmente de la moelle à l'écorce. Dans notre cas, cette variation est caractérisée par une augmentation de la moelle à la position AV5, puis on constate que la valeur minimale de la masse volumique est atteinte dans la zone de transition du bois juvénile/bois mature (AV4). Par la suite, il y a une augmentation de la masse volumique de la position AV3 vers l'écorce dans la zone du bois mature (AV2 et AV1). Cette observation soutient l'idée que les premiers cernes sont caractérisés par une masse volumique élevée, qui diminue rapidement pour atteindre un minimum vers la zone de transition du bois juvénile au bois mature (Ourais, 2012). Koubaa *et al.* (2005) ont étudié la variation de la masse volumique du bois en fonction de l'âge cambial et ont constaté que la zone de transition du bois juvénile/bois mature est aussi entre 30 et 40 ans et que cette zone se démarque par une diminution de la masse volumique, suivie d'une augmentation qui caractérise le bois mature. La zone de transition

constitue donc la première source de variation de la masse volumique du bois (Koubaa *et al.,* 2005).

- Flexion trois points

Le profil du MOE en flexion montre une augmentation de la moelle vers l'écorce (figure 3.2). Ce patron concorde avec celui rapporté par Alteyrac (2005). La valeur moyenne du MOE en flexion est plus importante pour le bois mature que pour le bois juvénile (AV6 à AV4) (figure 3.2), ce qui est en accord avec le fait que le bois mature possède des propriétés mécaniques plus élevées que celles du bois juvénile (Bowyer *et al.,* 2007; Ross, 2010). Cette différence est importante : le MOE varie de 9 247 à 10 423 MPa en AV2 et en AP (bois mature) respectivement, comparativement à 8 056 MPa en AV6 et à 8 635 MPa en AV4 (bois juvénile).

En tenant compte du profil de variation du MOE en flexion (figure 3.2), on constate que la valeur minimale de MOE est atteinte dans la zone de transition entre le bois juvénile et le bois mature (AV3). Ces résultats mettent donc en évidence la forte ressemblance du profil de variation radiale du MOE en flexion (figure 3.2) avec le profil de variation radiale de la masse volumique (figure 3.1). Ce comportement peut être expliqué par la forte corrélation positive entre le MOE et la masse volumique (Bowyer *et al.,* 2007).

D'autre part, certains auteurs (Deresse, 1998; Lindström *et al.*, 2004) indiquent que l'augmentation avec l'âge du MOE en flexion est attribuée à l'augmentation de la masse volumique et à une diminution de l'angle des microfibrilles. Par contre, Alteyrac (2005) indique que seul l'angle des microfibrilles présente une forte relation avec le MOE en flexion, alors que la masse volumique et la largeur des cernes ne sont pas corrélées avec le MOE en flexion chez l'épinette noire.

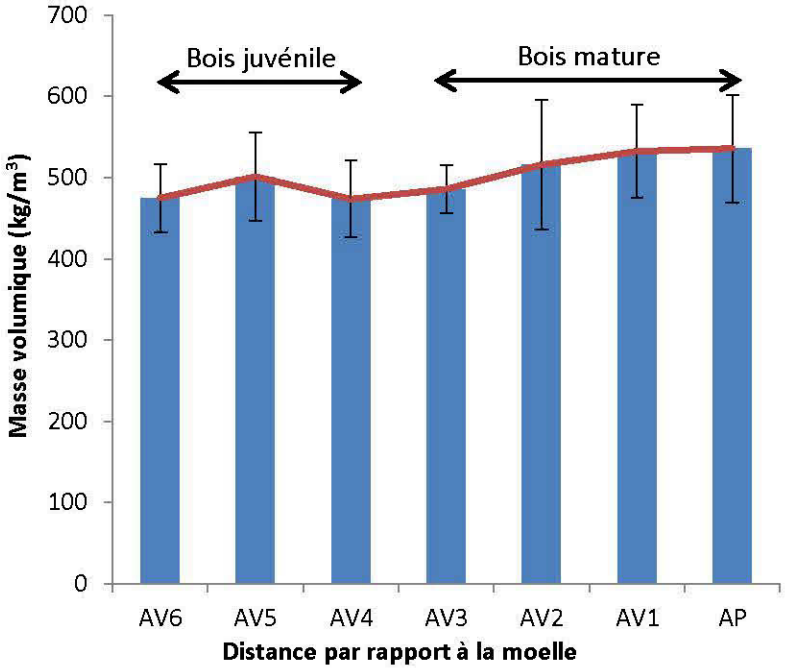

Figure 3.1 Variation de la masse volumique du bois de l'épinette noire en fonction de la position par rapport à la moelle au DHP de 1,3 m.

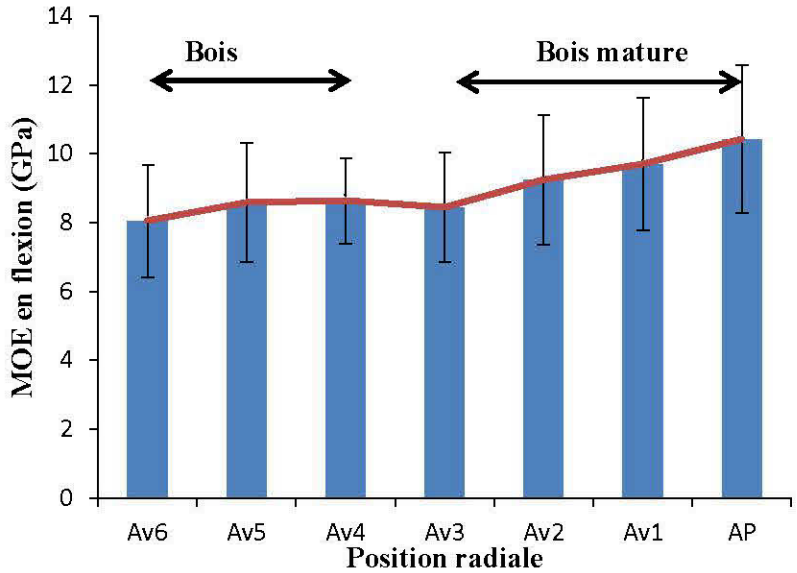

Figure 3.2 Variation radiale du module d'élasticité en flexion en fonction de la position par rapport à la moelle au DHP de 1,3 m.

- Compression parallèle

Le profil de variation du MOE en compression parallèle (figure 3.3) est caractérisé par une diminution constante dans la phase du bois juvénile, autrement dit, dans les premières années de croissance de l'arbre (AV6, AV5, AV4). Dans cette zone, la valeur moyenne du MOE en compression parallèle passe de 4 989 MPa à 4 881 MPa, ce qui représente une légère diminution de 2 %, laquelle ne semble pas être attribuable à la masse volumique du bois, car la tendance de variation de cette dernière dans cette zone (AV6, AV5, AV4) est caractérisée par une augmentation. Cette variation peut être causée par celle produite sur le plan des paramètres structurels du bois, tels que la longueur des trachéides, la proportion de lignine et la proportion de bois final (Gryc et Vavrčík, 2009).

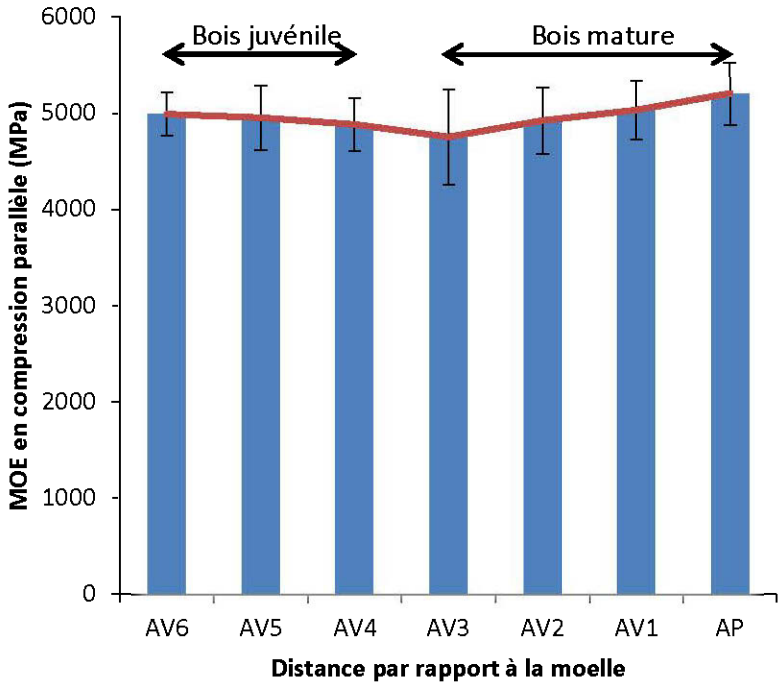

Figure 3.3 Variation radiale du module d'élasticité en compression parallèle en fonction de la position par rapport à la moelle, au DHP de 1,3 m.

À un âge plus avancé et dans la zone du bois mature (AV3, AV2, AV1, AP), le MOE en compression parallèle montre une tendance opposée par rapport au bois juvénile. Le MOE augmente linéairement avec la distance par rapport à la moelle et en allant vers l'écorce. L'étendue de variation de la valeur moyenne du MOE se situe entre 4 752 MPa et 5 203 MPa, ce qui correspond à une augmentation de 9 %. En effet, cette variation est plus importante que celle dans la zone du bois juvénile. Cette variation est similaire à celle rapportée ultérieurement pour la masse volumique et le MOE en flexion trois points dans la zone du bois mature. Ce résultat s'explique par la présence d'une forte relation entre la masse volumique et le MOE en compression parallèle dans la zone du bois mature. Il est relativement en accord avec celui de Guller (2007), qui indique l'existence d'une relation linéaire positive significative ($R^2 = 0,90$) entre la résistance en compression parallèle et la masse volumique du bois de pin de Calabre (*Pinus brutia Ten.*).

- Compression perpendiculaire

La figure 3.4 illustre la variation radiale du MOE en compression perpendiculaire. Dans la zone du bois juvénile, le patron de variation du MOE est différent de ceux des MOE en flexion et en compression parallèle (figure 3.1 et figure 3.2). Ainsi, il n'y a aucune ressemblance avec le profil de variation de la masse volumique dans la zone à proximité de la moelle indiquant l'absence d'une relation entre ces deux propriétés. L'orientation des cernes à côté de la moelle (légèrement inclinés) peut influencer le comportement du MOE en compression perpendiculaire et, par conséquent, le profil du MOE obtenu dans la zone du bois juvénile.

Ethington *et al.* (1996) ont souligné que la résistance de compression perpendiculaire dépend de l'orientation des cernes annuels de croissance, dans une forme approximativement quadratique. Dans la zone du bois mature, le profil du MOE en compression perpendiculaire devient presque constant, le MOE passe d'une valeur

moyenne de 38 MPa en AV2 à 40 MPa en AP. Ce résultat s'explique peut-être par la faible variation de la largeur du bois final avec l'âge cambial dans cette zone. En fait, Tabarsa et Chui (2001) suggèrent que la relation entre le comportement mécanique en compression radiale et la proportion de bois final est significative. Muller *et al.* (2003) ont montré que la résistance en compression perpendiculaire est fortement dépendante des caractéristiques anatomiques du bois chez l'épinette de Norvège (*Picea abies*).

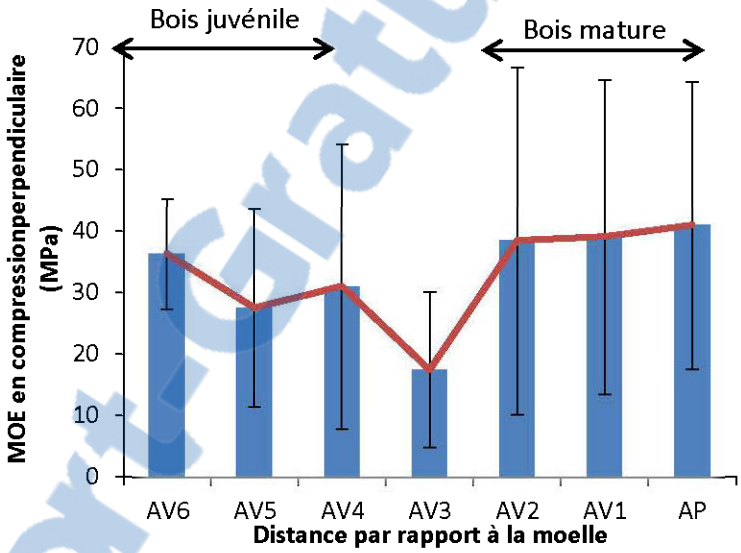

Figure 3.4 Variation radiale du module d'élasticité en compression perpendiculaire en fonction de la position par rapport à la moelle au DHP de 1,3 m.

3.3 Effet des coupes partielles sur les propriétés mécaniques de l'épinette noire

Les résultats présentés et discutés dans cette section concernent l'effet des coupes partielles sur les propriétés mécaniques du bois de l'épinette noire, en flexion trois points, en compression parallèle et en compression perpendiculaire, en plus de la masse volumique. Pour les trois peuplements étudiés, les effets des traitements des

Rapport-Gratuit.com

coupes partielles ont été étudiés dans le bois mature sur des arbres ayant un âge avancé. Les tableaux 3.2., 3.3 et 3.4 contiennent les résultats de l'analyse statistique de variance concernant l'effet des coupes partielles sur les propriétés mécaniques en flexion, en compression parallèle, en compression perpendiculaire et sur la masse volumique du bois. En plus des effets des traitements des coupes partielles, les effets du site et de la classe de diamètre ont été considérés dans l'analyse de variance comme étant des effets fixes. L'interaction du traitement avec les classes de diamètre a aussi été maintenue dans le modèle. Par contre, les autres interactions n'ont pas été retenues et ont été confondues avec le terme d'erreur, puisqu'elles n'étaient pas significatives. La propriété avant le traitement et la masse volumique de l'éprouvette après le traitement ont été introduite dans les modèles comme covariable. Quant à l'effet de l'arbre, il a été considéré comme aléatoire et il s'est avéré non significatif pour l'ensemble des propriétés mécaniques et physiques étudiées.

3.3.1 Effet des coupes partielles sur les propriétés en flexion

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le tableau 3.2 révèlent que le site n'a pas un effet significatif sur les propriétés étudiées (MOE, σ_{max}, σ_{rup} et masse volumique). Ces propriétés sont affectées par le traitement des coupes partielles, sauf pour la contrainte maximale (σ_{max}), qui est liée à la valeur avant le traitement et à la masse volumique après le traitement (tableau 3.2).

L'effet du traitement sur les masses volumiques est significatif, mais il est modulé par la classe de DHP de l'arbre. L'interaction significative entre le traitement et le DHP de l'arbre suggère que la réponse diffère d'une classe de DHP à l'autre. Ces résultats sont en accord avec ceux de Zhang *et al.* (2006), qui indiquent que l'effet de l'éclaircie sur la masse volumique dépend du diamètre de l'épinette noire. Ce résultat était déjà attendu, comme l'indique la variation de la masse volumique par rapport à

la position de la moelle (figure 3.1). Un résultat similaire d'interaction entre le traitement et le DHP a été rapporté par Braido dos Santos (2014) pour l'épinette noire. Le DHP à lui seul n'a pas d'effet significatif sur la masse volumique (tableau 3.2).

Tableau 3.2

Analyse de variance des effets fixes sur le module d'élasticité, la contrainte maximale, la contrainte à la rupture en flexion trois points et la masse volumique

Sources de variation	Mv		MOE		σ_{max}		σ_{rup}	
	F	P	F	P	F	P	F	P
	Tests des effets fixes de type III[a]							
Constante	17,94	**0,000****	2,01	0,159^{ns}	1,39	0,240^{ns}	0,01	0,92^{ns}
Site	2,97	0,055^{ns}	2,35	0,099^{ns}	1,24	0,292^{ns}	1,80	0,17^{ns}
Traitement	6,76	**0,002****	3,24	**0,042***	2,72	0,070^{ns}	4,40	**0,014***
Classe de DHP	2,38	0,096^{ns}	2,39	0,096^{ns}	2,43	0,092^{ns}	1,70	0,19^{ns}
Traitement x DHP	5,00	**0,001****	5,11	**0,001****	2,29	0,063^{ns}	0,66	0,62^{ns}
Propriété avant traitement†	45,92	**0,000****	2,93	0,089^{ns}	15,42	**0,000****	6,33	**0,013***
Masse volumique après traitement†	-	-	10,62	**0,001****	16,25	**0,000****	29,46	**0,00****
Estimations des paramètres de covariance [a]								
	P	**Z de Wald**	**P**	**Z de Wald**	**P**	**Z de Wald**	**P**	**Z de Wald**
Résidu	0,00**	8,06	0,00**	8,077	0,00**	7,81	0,00*	8,19
Arbre	0,85^{ns}	0,20	-0,26	1,126	0,40^{ns}	0,85	-	-

Selon la figure 3.5, pour la classe de DHP C1, une légère augmentation est observée pour les témoins dans la période après la coupe partielle, la même tendance est observée pour les deux traitements (modéré et fort). Cette augmentation est plus

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

importante pour un traitement d'intensité de prélèvement modérée, qui est de 8 %, que pour un traitement d'intensité de prélèvement forte, qui est de 4 %.

Tableau 3.3

Analyse de variance des effets fixes sur le module d'élasticité, la contrainte maximale, la contrainte à la rupture en compression parallèle

Sources de variation	MOE		σ_{max}		σ_{rup}	
	F	P	F	P	F	P
	Tests des effets fixes de type III[a]					
Constante	15,2	**0,00****	1,58	0,212	1,47	0,23
Site	8,06	**0,001****	3,68	**0,028***	2,43	0,09
Traitement	7,43	**0,001****	0,84	0,434	0,88	0,43
Classe de DHP	3,26	**0,04***	0,71	0,495	0,66	0,52
Traitement x DHP	7,38	**0,00****	3,19	**0,016***	3,58	**0,08***
Propriété avant traitement†	0,53	0,47^{ns}	0,27	0,602^{ns}	0,16	0,68^{ns}
Masse volumique après traitement†	266,57	**0,00****	360,72	**0,000****	387,87	**0,00****
Estimations des paramètres de covariance [a]						
	P	Z de Wald	P	Z de Wald	P	Z de Wald
Résidu	0,00**	7,90	0,00**	7,86	0,00**	7,75
Arbre	0,19^{ns}	1,31	0,26^{ns}	1,12	0,29^{ns}	1,05

Pour la classe de DHP C2, il y a une augmentation de la masse volumique moyenne pour les témoins ainsi que pour le traitement d'intensité de prélèvement forte; par contre, une faible diminution de la masse volumique est observée pour le traitement d'intensité modérée.de prélèvement Pour la classe de DHP C3, aucune tendance de diminution de la masse volumique n'est observée pour les témoins ni pour les deux traitements, modéré et fort. Il semble qu'une intensité de prélèvement forte est plus

intéressante pour les classes de DHP C2 et C3 ne pas avoir des effets négatifs sur la masse volumique après l'application d'une coupe partielle. La masse volumique avant le traitement, utilisée comme covariable dans ce modèle (tableau 3.2), a montré un effet significatif (p = 0,000). Ce résultat peut expliquer l'augmentation de la masse volumique des individus provenant des sites traités après la coupe partielle.

Tableau 3.4

Analyse de variance des effets fixes sur le module d'élasticité, la contrainte maximale, la contrainte à la rupture en compression perpendiculaire

Sources de variation	**MOE**		**σ_{max}**		**σ_{rup}**	
	F	**P**	**F**	**P**	**F**	**P**
	Tests des effets fixes de type III[a]					
Constante	3,12	0,08	0,57	0,453	0,038	0,85
Site	0,55	0,46	17,15	**0,000****	13,38	**0,001****
Traitement	2,83	0,10	28,79	**0,000****	14,27	**0,000****
Classe de DHP	2,23	0,12	1,378	0,261	1,67	0,20
Traitement x DHP	2,19	0,08	1,13	0,354	0,93	0,46
Propriété avant traitement†	8,31	**0,006***	4,79	**0,033***	3,17	0,08
Masse volumique après traitement†	1,748	0,191	2,881	0,095	1,442	0,235
Estimations des paramètres de covariance [a]						
	P	**Z de Wald**	**P**	**Z de Wald**	**P**	**Z de Wald**
Résidu	0,000**	5,19	0,000**	5,19	0,00**	5,14
Arbre	0,32^{ns}	1,00	0,27^{ns}	1,00	0,48^{ns}	0,70

ns Non significatif à $\alpha < 0,05$; * Significatif à $\alpha = 0,05$; ** Significatif à $\alpha = 0,01$.

a Variable dépendante : propriété après le traitement.

† Utilisé comme covariable dans le modèle - (propriété avant le traitement et masse volumique après le traitement).

Généralement, ces résultats sont en accord avec les résultats trouvés dans la littérature, qui indiquent qu'une augmentation de la croissance n'affecte pas négativement la masse volumique des tiges résiduelles à la suite d'une diminution de la densité d'un peuplement, dont l'épinette de Norvège (Mäkinen et Isomäki, 2004), l'épinette blanche (Gagné *et al.*, 2012), l'épinette de Sitka (Moore *et al.*, 2009) et l'épinette noire (Alteyrac, 2005; Tong *et al.*, 2009; Vincent *et al.*, 2009, 2011).

L'effet du traitement est significatif pour la σ_{rup} au niveau de probabilité ($p = 0{,}014$), mais indépendamment de la classe de DHP, comme l'indique l'interaction non significative DHP X Traitement (tableau 3.2). Pour la classe de DHP C1, la σ_{rup} des témoins augmente pour la période après le traitement; pour une intensité de prélèvement forte, on observe la même tendance d'augmentation. Par contre, pour une intensité de prélèvement modérée, on note une légère diminution de 4 % (figure 3.6). De la même façon, pour la classe de DHP C2, une légère diminution de 2 % est observée, mais seulement pour un traitement d'intensité modéré. Ces changements négatifs observés pour la même classe de DHP C2 pourraient être causés soit par un changement au niveau de la contrainte à la rupture (σ_{rup}) avant le traitement ($p = 0{,}013$), soit par la diminution de la masse volumique, comme l'indique la figure 3.5. Cependant, pour les arbres de la classe de DHP C3, aucun changement négatif n'est observé après le traitement, quelle que soit l'intensité de prélèvement. Ce changement positif ne peut donc pas être attribuable au traitement, mais il est relié à un changement positif au niveau de la masse volumique après le traitement ($p = 0{,}000$).

D'autre part, les résultats révèlent que la valeur de la contrainte à la rupture (σ_{rup}) après un traitement intense est plus élevée que celle après un traitement modéré (figure 3.5). Ces résultats sont en accord avec ceux de Zhang et Chauret (2001), qui indiquent que chez l'épinette noire, les arbres provenant d'un peuplement peu dense auraient du bois dont la contrainte à la rupture (σ_{rup}) serait plus faible que pour les

arbres récoltés dans des peuplements plus denses. Il semble d'une façon générale que les traitements des coupes partielles n'ont pas un effet négatif sur la σ_{rup}, indépendamment de la classe de diamètre et de l'intensité de la coupe partielle.

Ces résultats obtenus pour l'épinette noire sont en accord avec les résultats de Alteyrac (2005), qui a montré que la densité du peuplement de l'épinette noire n'a pas un effet significatif sur la σ_{rup} en flexion trois points.

L'effet du traitement sur le module d'élasticité (MOE) est significatif ($p = 0,042$). De plus, l'interaction entre le traitement et le DHP est forte ($p = 0,001$), comme l'indique le tableau 3.2. Selon la figure 3.7, un effet négatif des coupes partielles par rapport aux témoins est observé seulement pour la classe de DHP C2; cependant, ces changements sont faibles. Le MOE est diminué de 6,37 % pour un traitement modéré et de 1,27 % pour un traitement fort.

D'autre part, le MOE en flexion est étroitement lié à la masse volumique du bois. Par conséquent, l'augmentation de la valeur du MOE par rapport à la période avant le traitement pour les tiges de classe de DHP C1 et C3 pourrait être liée à l'augmentation de la masse volumique observée dans les années après la coupe partielle pour les deux traitements et à une amélioration par rapport au site témoin. Ceci pourrait être expliqué par les différentes caractéristiques des sites étudiés, même si aucun effet significatif n'est rapporté. On note aussi que la variation du module d'élasticité est indépendante de sa valeur avant le traitement, comme l'indique le tableau 3.2.

Les résultats obtenus pour les coupes partielles d'intensité légère et forte et pour les trois classes de DHP impliquent qu'une croissance accélérée dans les années après les coupes partielles n'a pas eu d'effets sur la résistance mécanique en flexion trois points, sauf pour les tiges de classe de DHP C2. Celles-ci ont diminué après un traitement d'intensité modérée. Le MOE pour cette classe de DHP suit le même

patron que celui de la masse volumique (DHP C2, figure 3.5). Les différentes réponses observées pour le MOE pour les trois classes de diamètre peuvent être attribuables aux différences relatives à l'âge moyen de chaque classe de DHP. On note que pour la classe de DHP C1, l'âge des arbres se situe entre 35 ans et 45 ans; pour C2, l'âge des arbres varie entre 45 ans et 55 ans; et pour C3, l'âge des arbres est supérieur à 60 ans.

D'une façon générale, il semblerait que les intensités des coupes partielles auraient une très faible influence ou n'auraient pas d'effets sur le MOE ni sur la σ_{rup}, selon la classe de diamètre. L'augmentation de ces deux propriétés pourrait être attribuable à la masse volumique et à l'évolution de l'âge cambial.

Ces résultats sont en accord avec les travaux d'Alteyrac (2005), qui ont affirmé que la densité de peuplement d'épinettes noires n'a pas d'impact significatif sur le MOE en flexion, ainsi qu'avec les travaux de Vincent *et al.* (2011), qui ont montré que le MOE en flexion n'est pas affecté par les traitements d'éclaircies.

Finalement, les résultats trouvés dans cette partie de notre étude sont similaires à ceux trouvés par Gagné *et al.* (2012), qui indiquent que l'éclaircie commerciale a un effet significatif sur l'accroissement en volume par tige, mais n'a pas pour conséquence de diminuer la masse volumique, le module d'élasticité, ni la contrainte à la rupture de l'épinette blanche (*Picea glauca)*.

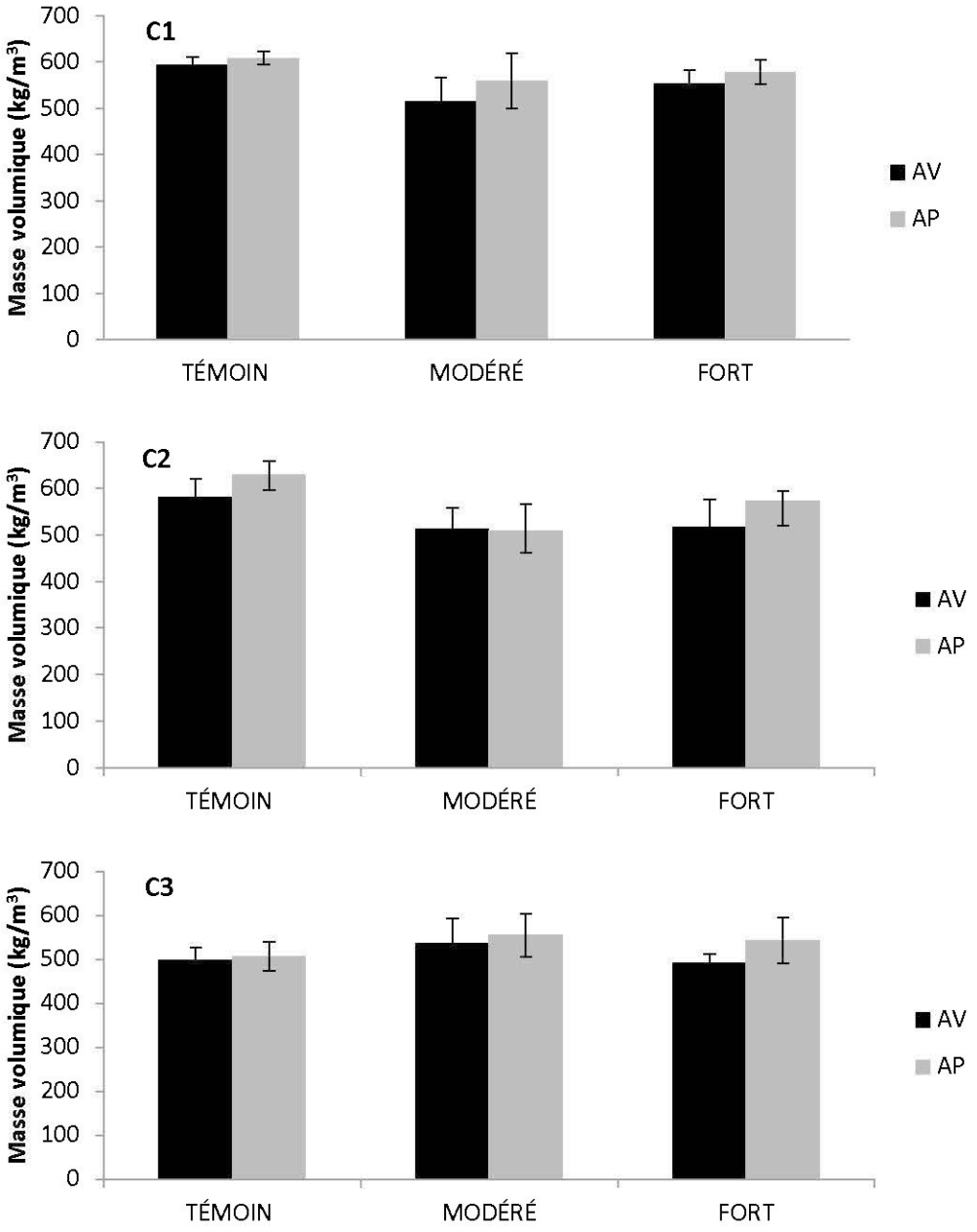

Figure 3.5 Variation de la masse volumique (kg/m^3) de l'épinette noire en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

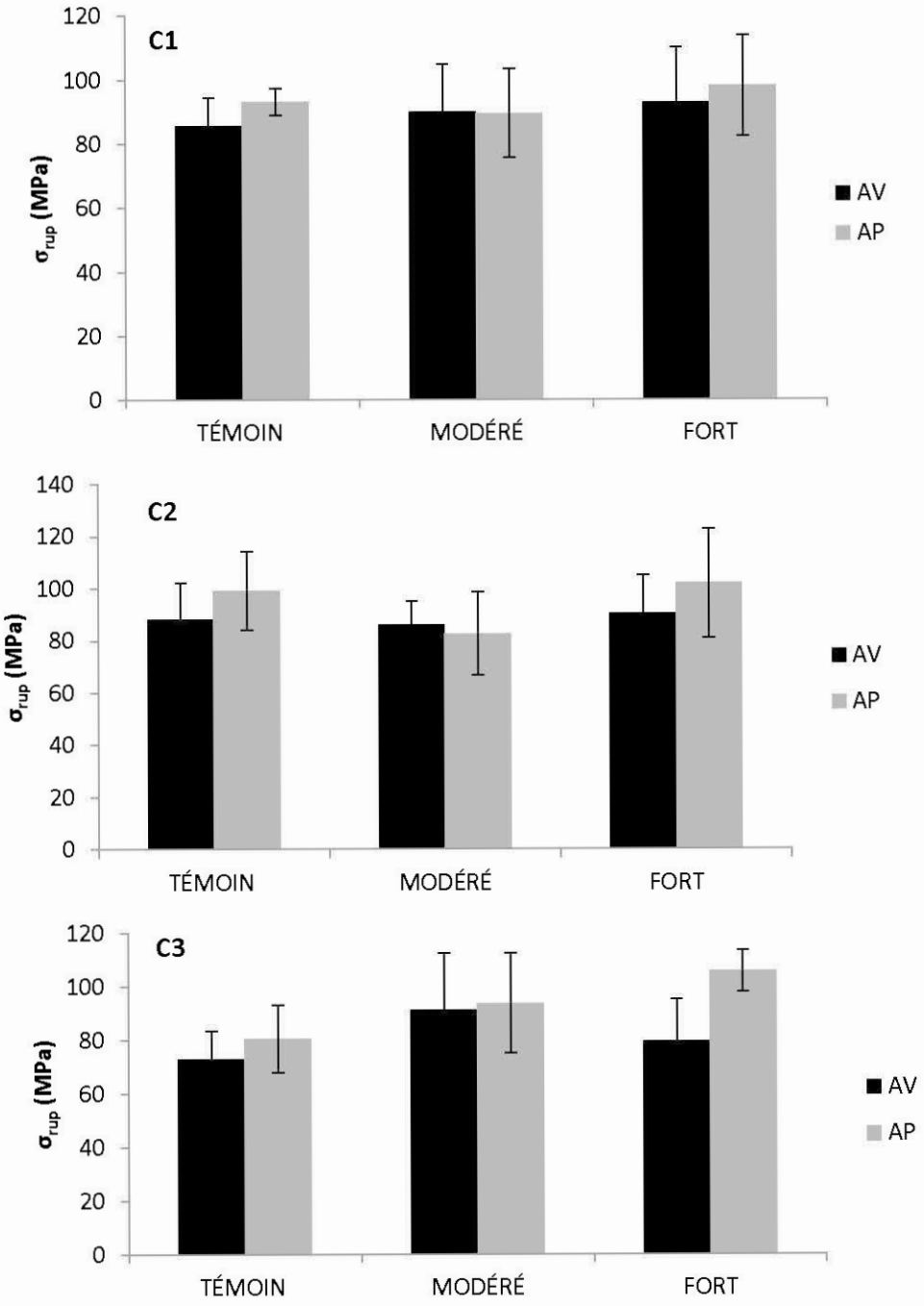

Figure 3.6 Variation de la contrainte à la rupture (MPa) en flexion trois points en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

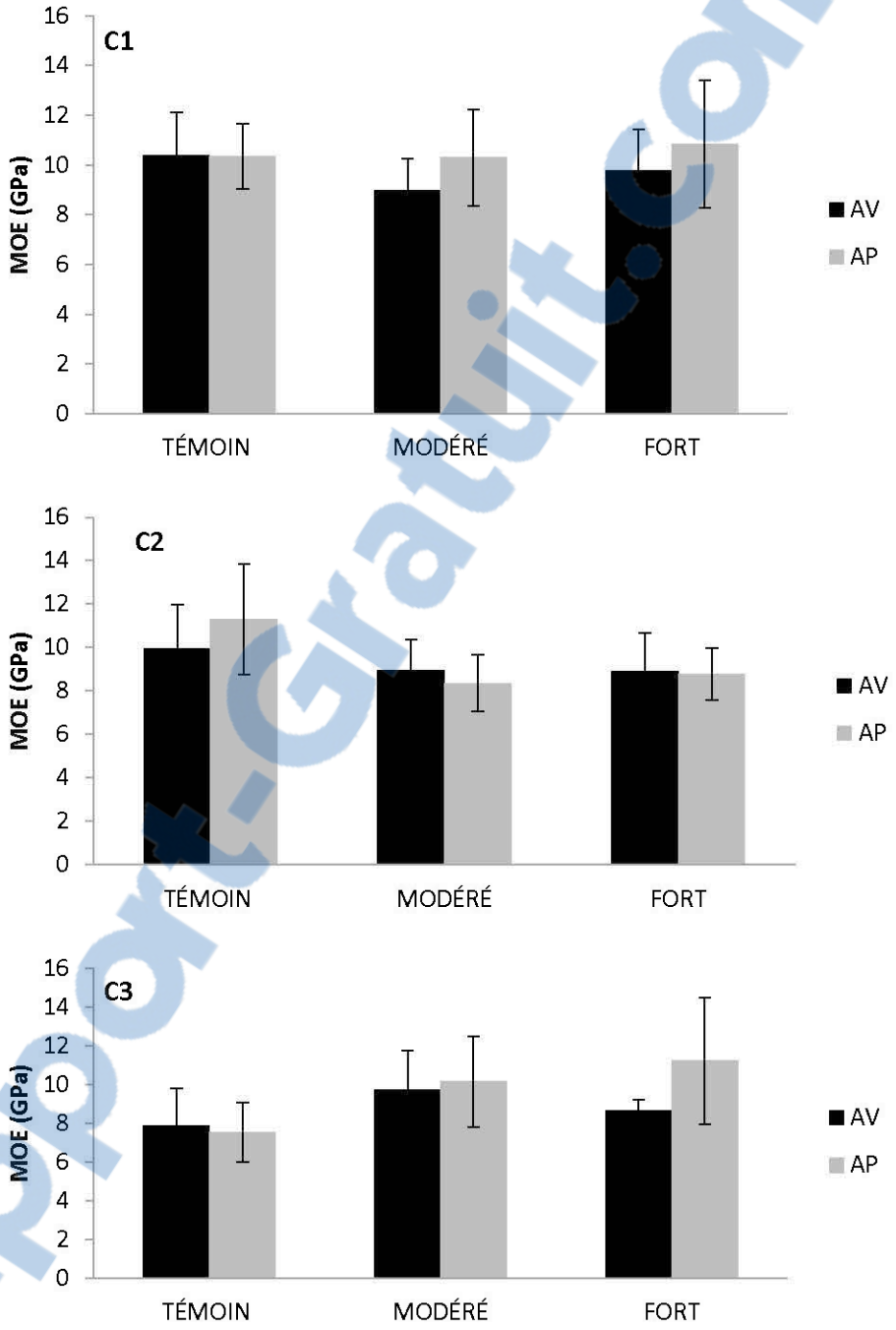

Figure 3.7 Variation du module d'élasticité (GPa) en flexion trois points en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

Rapport-Gratuit.com

3.3.2 Effet des coupes partielles sur les propriétés en compression parallèle

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le tableau 3.3 révèlent que le site avait un effet significatif sur les propriétés étudiées (MOE, σ_{max}), sauf pour la contrainte à la rupture. Le tableau 3.1 montre que les valeurs moyennes du MOE et de la σ_{max} pour le site Cramolet sont plus grandes de 40 % et de 45 %, respectivement, par rapport aux deux autres sites (Villard et Muskuchii). Ceci pourrait être expliqué par des différences de conditions de croissance entre les sites, le type de traitement présent dans chaque site, ainsi que les différents âges présents dans les peuplements (plage d'âge variant de 30 ans à plus de 90 ans).

L'effet du traitement sur la contrainte maximale (σ_{max}) n'est pas significatif, cette absence d'effet a été déjà observée dans le cas de flexion trois points. Par contre, l'interaction entre le traitement et le DHP est significative au niveau de probabilité ($p = 0,016$). Ce résultat révèle que la contrainte maximale en compression parallèle est affectée par les traitements des coupes partielles, mais cela diffère d'une classe de DHP à l'autre. La figure 3.9 montre qu'une légère diminution de σ_{max} est observée pour la classe de DHP C3 lorsque le traitement à forte intensité de prélèvement est appliqué. Pour les autres classes de DHP, aucun changement négatif n'est noté. Finalement, la contrainte maximale est liée à la masse volumique après le traitement ($p = 0,016$), comme l'indique le tableau 3.3. Tout changement positif observé est attribuable à une augmentation de la masse volumique.

L'effet du traitement sur la σ_{rup} n'est pas significatif. L'interaction traitement X DHP de l'arbre est significative sur la σ_{rup} en compression parallèle. Ce résultat s'explique par le fait que la réponse de la contrainte à la rupture (σ_{rup}) au traitement n'est pas la même pour les trois classes de DHP. Selon la figure 3.10, pour la classe de DHP C1 et C2, une augmentation de la valeur moyenne de σ_{rup} après les coupes partielles est observée autant pour les témoins que pour les deux traitements, modéré et fort. Ces

changements sont fortement liés à la masse volumique du bois après le traitement ($p = 0,000$), comme l'indique le tableau 3.3. Pour la classe de DHP C3, un changement négatif de σ_{rup} est observé pour une coupe partielle de forte intensité. Cette diminution est de 4 % pour la valeur moyenne de σ_{rup} par rapport à sa valeur avant le traitement.

Finalement, pour la classe de DHP C1 et C2, les deux traitements n'ont pas eu d'effet négatif sur la contrainte à la rupture en compression parallèle. Pour la classe de DHP C3, une tendance à la baisse de la valeur moyenne de la contrainte à la rupture a été observée pour une coupe partielle d'intensité forte. Ces résultats sont généralement en accord avec ceux trouvés par Guo *et al.* (2006), qui indiquent que la σ_{rup} en compression parallèle a augmenté après une éclaircie modérée et a diminué après une éclaircie forte.

La réponse aux traitements du MOE en compression parallèle varie d'une classe de diamètre à l'autre, comme l'indique l'interaction hautement significative entre le traitement et le DHP ($p = 0,000$). Pour la classe de DHP C1, une augmentation du MOE est observée tant sur les témoins que sur les arbres traités. On voit pour la classe C2 une diminution du MOE pour les témoins, et la même tendance est observée pour les arbres issus d'un traitement d'une intensité modérée. Ce changement n'est pas un effet direct de la coupe partielle, il pourrait s'expliquer par la diminution observée en ce qui concerne la masse volumique (figure 3.5). D'après l'analyse de variance, le MOE en compression parallèle est étroitement lié à la masse volumique du bois après le traitement. Ainsi, on observe pour la même classe de DHP C2 qu'un traitement de forte intensité n'a pas affecté négativement cette propriété. Quant à la classe C3, le MOE n'était pas affecté par un traitement modéré; par contre, une légère diminution du MOE de 1,5 % est observée pour les arbres issus d'un traitement d'une forte intensité.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

L'effet du diamètre de l'arbre est significatif sur le module d'élasticité au niveau de probabilité (p = 0,046), comme l'indique le tableau 3.3. La figure 3.8 illustre une différence significative de la valeur du MOE, surtout entre la classe C3 et les deux autres classes, C1 et C2. Ce résultat était déjà attendu, comme l'indique la figure 3.2, où l'on voit qu'il y a une augmentation du MOE en compression parallèle dans la zone du bois mature en allant vers l'écorce en raison de l'effet de l'âge.

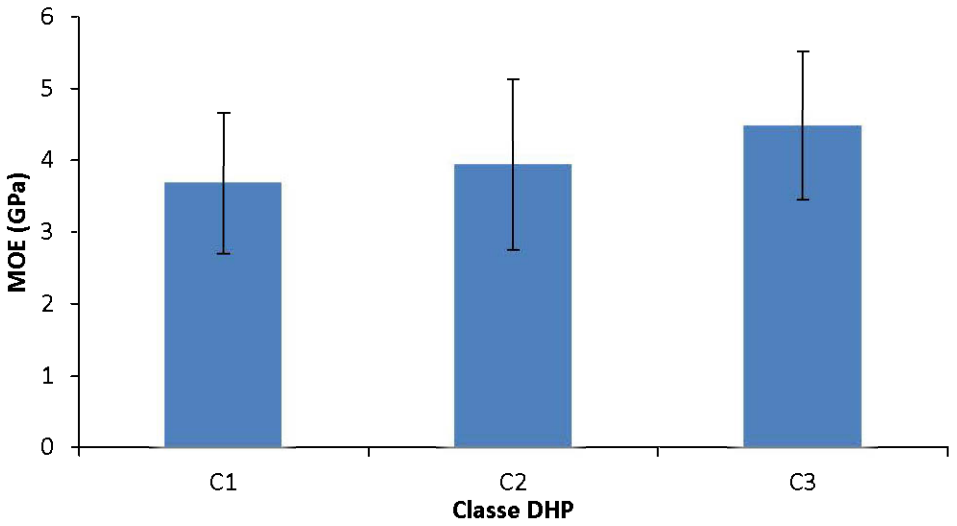

Figure 3.8 Variation du MOE en compression parallèle en fonction du DHP.

Globalement, la coupe partielle étudiée dans ce travail n'a pas pour effet de diminuer significativement le MOE en compression parallèle, bien qu'une légère tendance à la baisse soit observée pour les arbres de classe C3, lorsqu'une coupe partielle à forte intensité de prélèvement est appliquée. Des résultats relativement semblables ont été rapportés par Guller (2007); selon l'auteur, le MOE et la σ_{rup} en compression parallèle au fil du bois de pin de Calabre (*Pinus brutia Ten.*) n'étaient pas affectés par le traitement de l'éclaircie commerciale.

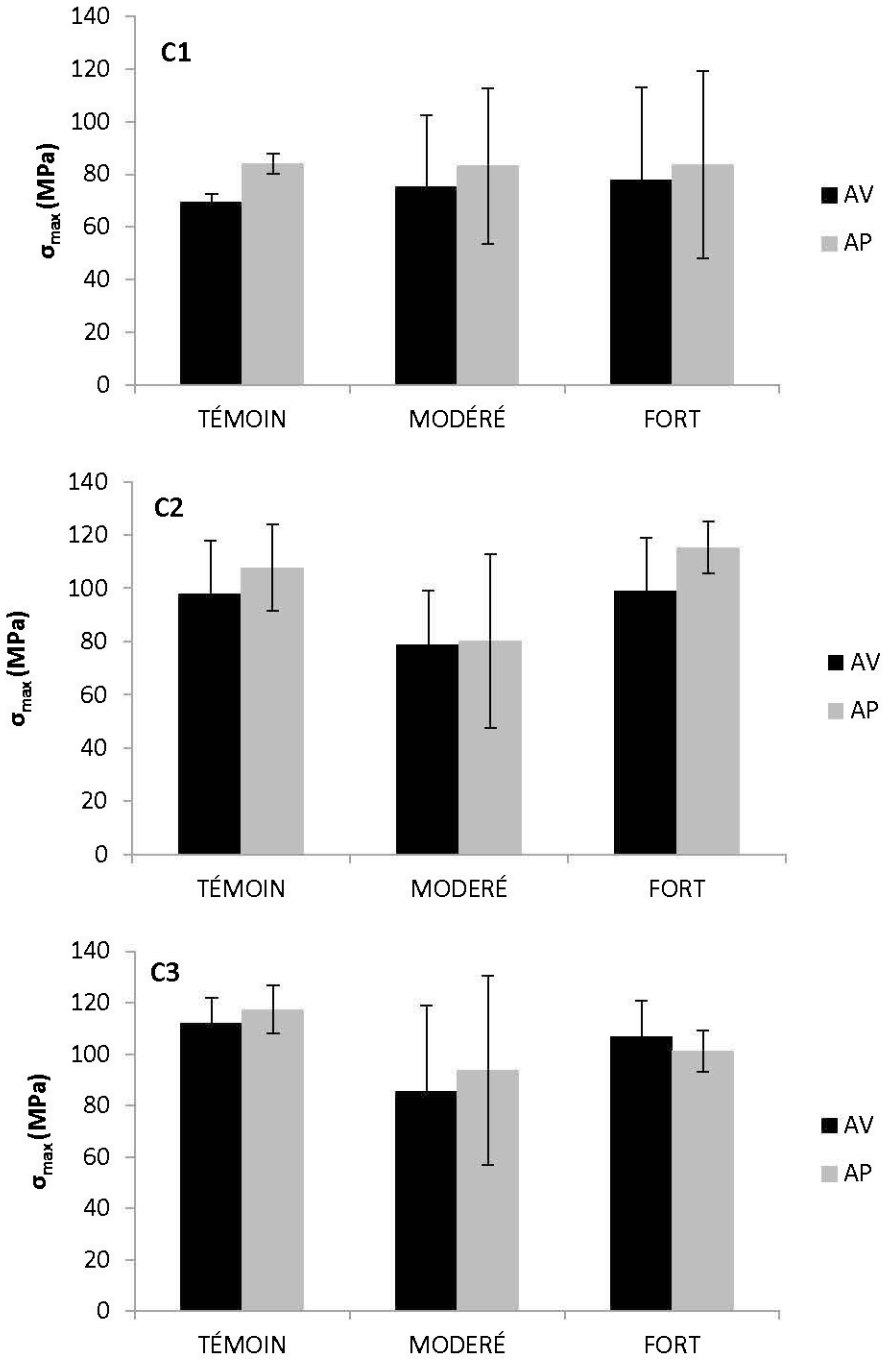

Figure 3.9 Variation de la contrainte maximale (MPa) en compression parallèle en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

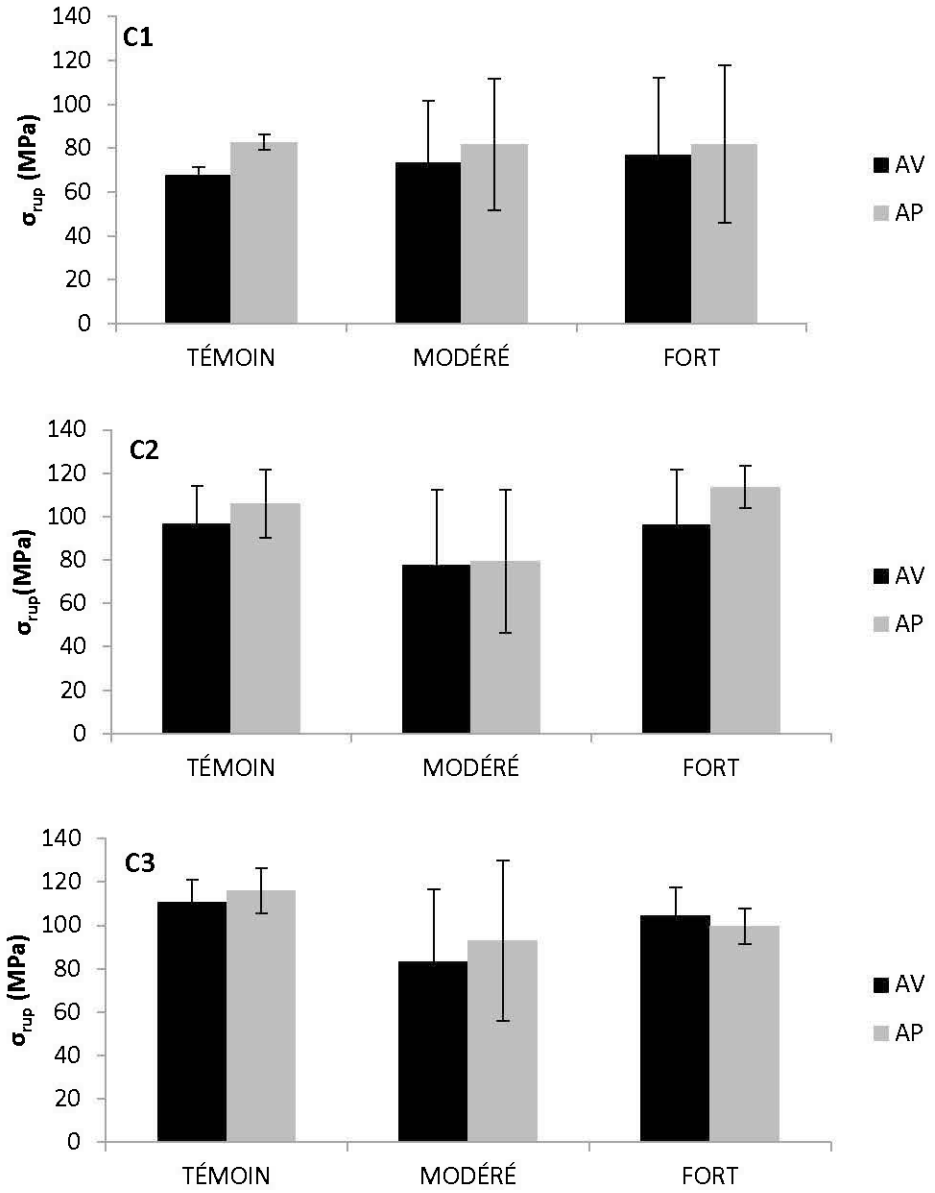

Figure 3.10 Variation de la contrainte à la rupture (MPa) en compression parallèle en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

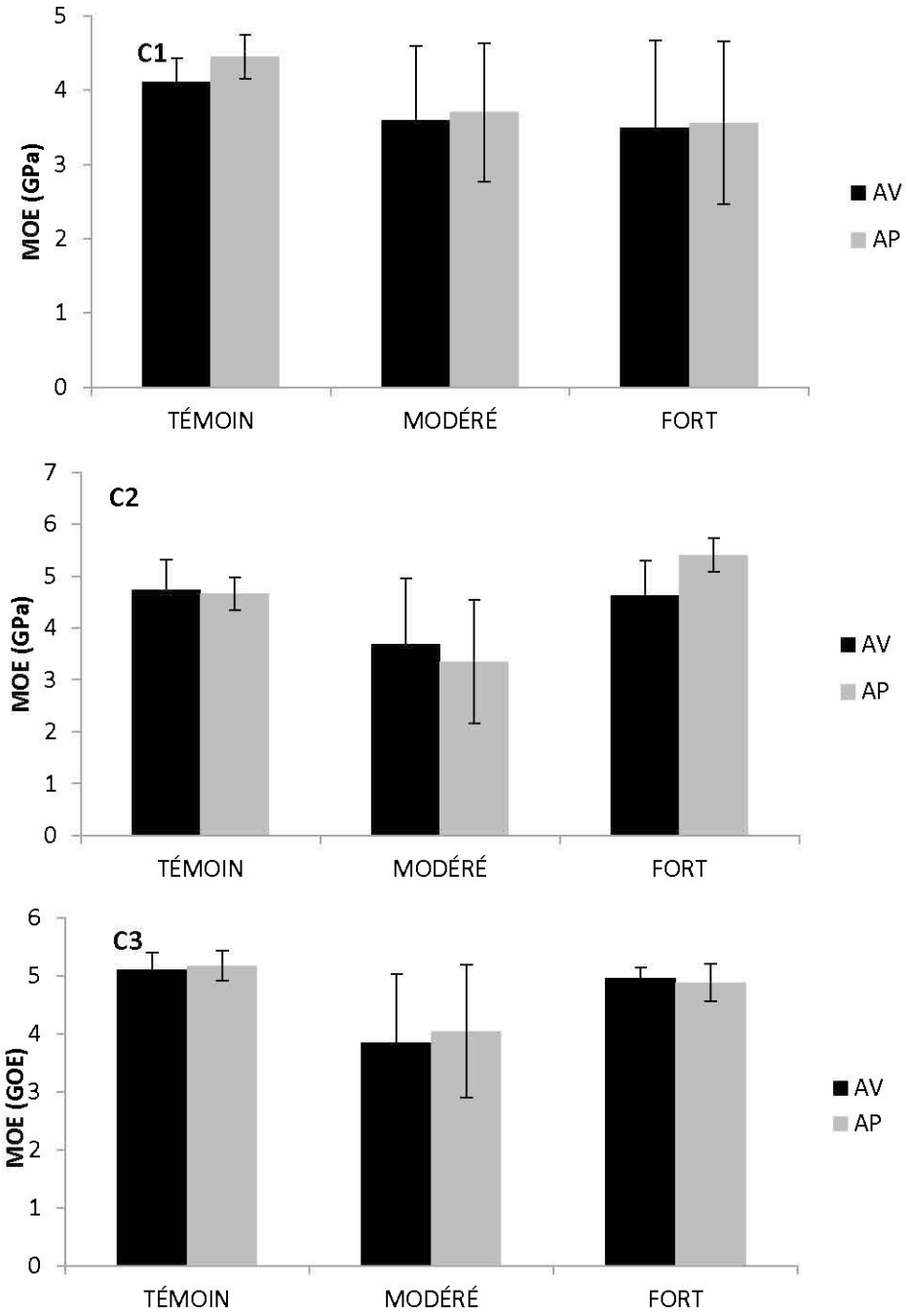

Figure 3.11 Variation du module d'élasticité (MPa) en compression parallèle en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

3.3.3 Effet des coupes partielles sur les propriétés en compression perpendiculaire

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le tableau 3.4 révèlent que le site avait un effet significatif sur les propriétés étudiées (σ_{rup}, σ_{max}), sauf pour le module d'élasticité (MOE). Le tableau 3.1 montre que les valeurs moyennes de la σ_{rup} et de la σ_{max} diffèrent d'un site à l'autre. Ceci pourrait être expliqué par plusieurs facteurs, à savoir les conditions de croissance, l'âge et la densité des peuplements.

D'autre part, l'analyse de variance montre que la masse volumique après le traitement, utilisée comme covariable dans ce modèle, n'a pas un effet significatif sur les propriétés mécaniques en compression perpendiculaire après la coupe partielle du bois de l'épinette noire. Contrairement à la flexion et à la compression parallèle, la variation des propriétés mécaniques en compression perpendiculaire est indépendante de la variation de la masse volumique après les coupes partielles.

L'effet du traitement sur la contrainte maximale en compression maximale est hautement significatif ($p = 0,000$). Par contre, l'interaction Traitement x DHP n'est pas significative. Selon la figure 3.12, une tendance à la baisse est observée pour les témoins, quelle que soit la classe de diamètre. Pour un traitement de prélèvement d'intensité modérée, une légère diminution de σ_{max} est observée dans la période après la coupe partielle, mais seulement pour la classe de DHP C3. Un traitement d'intensité de prélèvement forte n'avait aucun effet négatif sur la contrainte maximale σ_{max}, quelle que soit la classe de DHP. D'après l'analyse de variance, la valeur de σ_{max} après le traitement en compression perpendiculaire est liée à sa valeur avant le traitement ($p = 0,033$). Ceci peut expliquer le changement positif produit après le traitement, malgré la diminution observée chez les témoins.

L'effet du traitement sur la σ_{rup} est significatif ($p = 0,000$), indépendamment de la classe de DHP. Une baisse de la contrainte à la rupture est observée pour les témoins

de toutes les classes de DHP (C1, C2 et C3). Pour un traitement d'intensité de prélèvement modérée, une variation négative est observée dans la période après la coupe partielle pour les arbres des classes de DHP C1 et C2, cette légère diminution est de 0,4 et de 3 % respectivement. Par contre, pour la classe C3, ce traitement n'a pas eu d'effet négatif sur la σ_{rup}. Un traitement de forte intensité n'entraîne aucun changement négatif sur la σ_{rup} pour les trois classes de diamètre. Selon la figure 3.13, la valeur moyenne de σ_{rup} pour les individus provenant des sites traités est plus élevée que celle des témoins. D'autre part, les résultats statistiques montrent une absence de relation fonctionnelle entre la σ_{rup} et sa valeur avant le traitement, de même qu'avec la masse volumique de l'échantillon. Finalement, on se permet de conclure que la contrainte à la rupture (σ_{rup}) en compression perpendiculaire a été affectée par un traitement d'intensité de prélèvement modérée; cependant, un traitement d'intensité de prélèvement forte n'avait aucun effet nuisible sur cette propriété.

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le tableau 3.4 révèlent que les traitements des coupes partielles, la classe de DHP, l'interaction entre le traitement et le DHP ainsi que la masse volumique de l'échantillon après le traitement n'avaient pas d'effet significatif sur le MOE en compression perpendiculaire. La variation de cette propriété après la coupe partielle observée à la figure 3.14 est liée à sa valeur avant le traitement ($p = 0,006$), comme l'indique le tableau 3.4.

Contrairement aux deux autres propriétés étudiées (flexion et compression parallèle), la compression perpendiculaire présente un patron de variation particulier. En effet, cette propriété s'avère indépendante de la variation de la masse volumique, de la classe de diamètre et de l'interaction entre le traitement et le DHP. Cette indépendance peut s'expliquer par le fait qu'en compression perpendiculaire, les contraintes mécaniques sont principalement dépendantes de l'ultrastructure de la paroi cellulaire (Muller *et al.,* 2003).

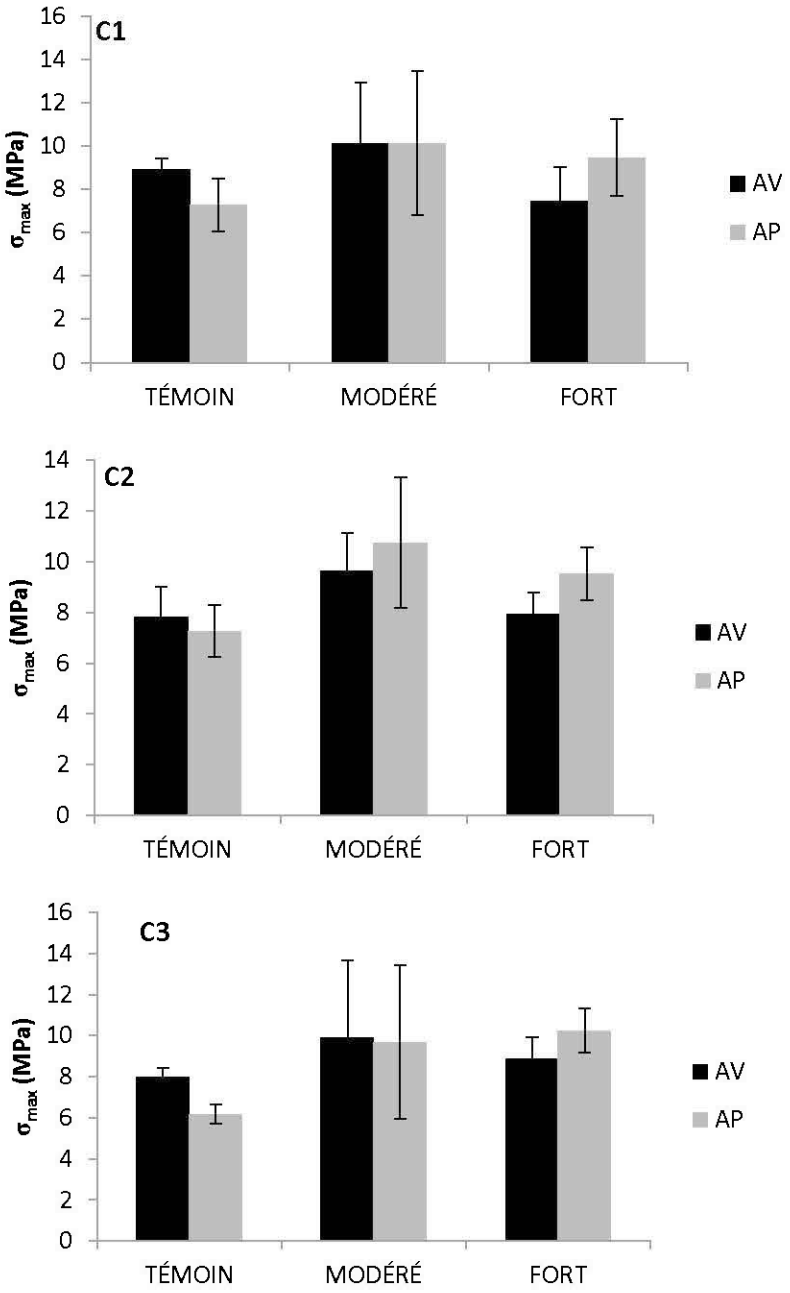

Figure 3.12 Variation de la contrainte maximale (MPa) en compression perpendiculaire en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

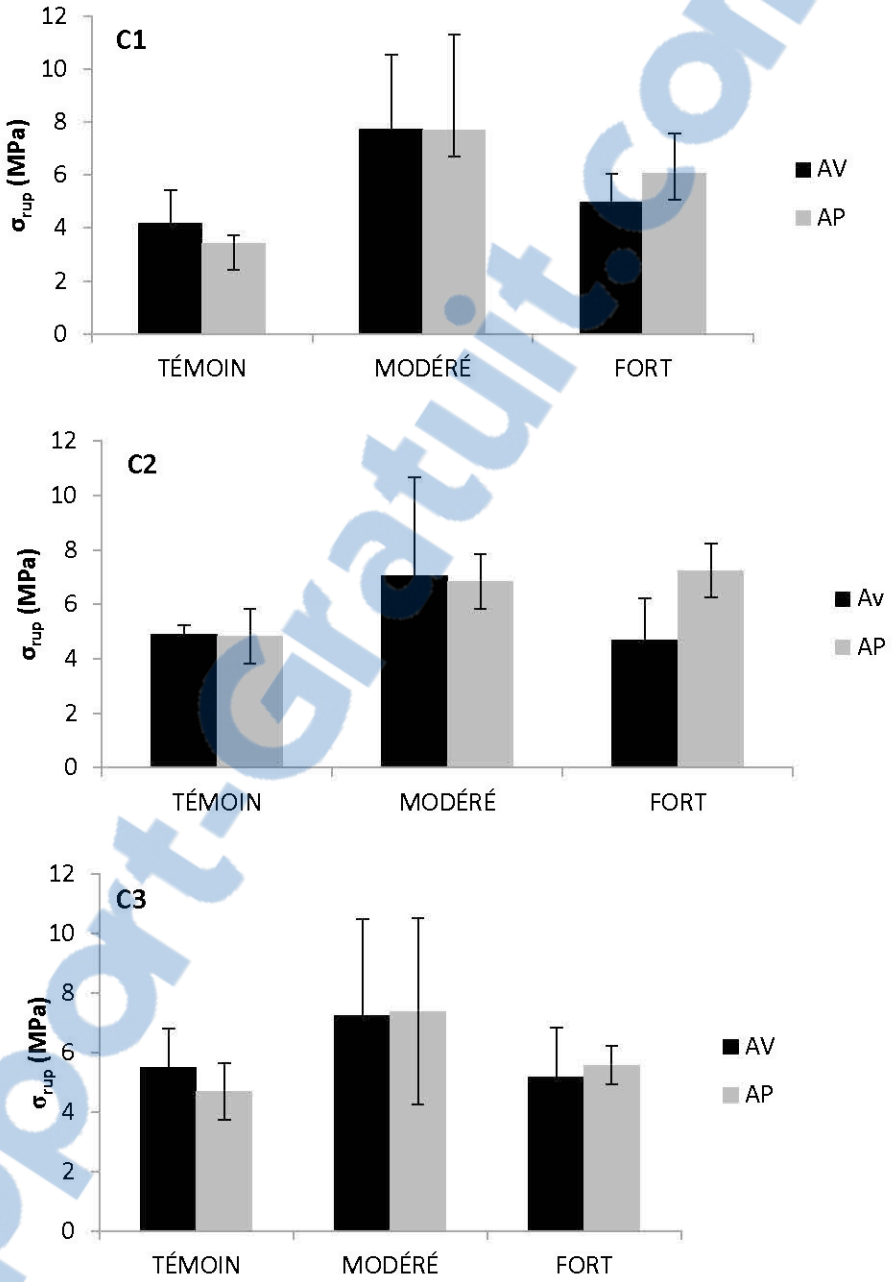

Figure 3.13 Variation de la contrainte à la rupture (MPa) en compression perpendiculaire en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

Rapport-Gratuit.com

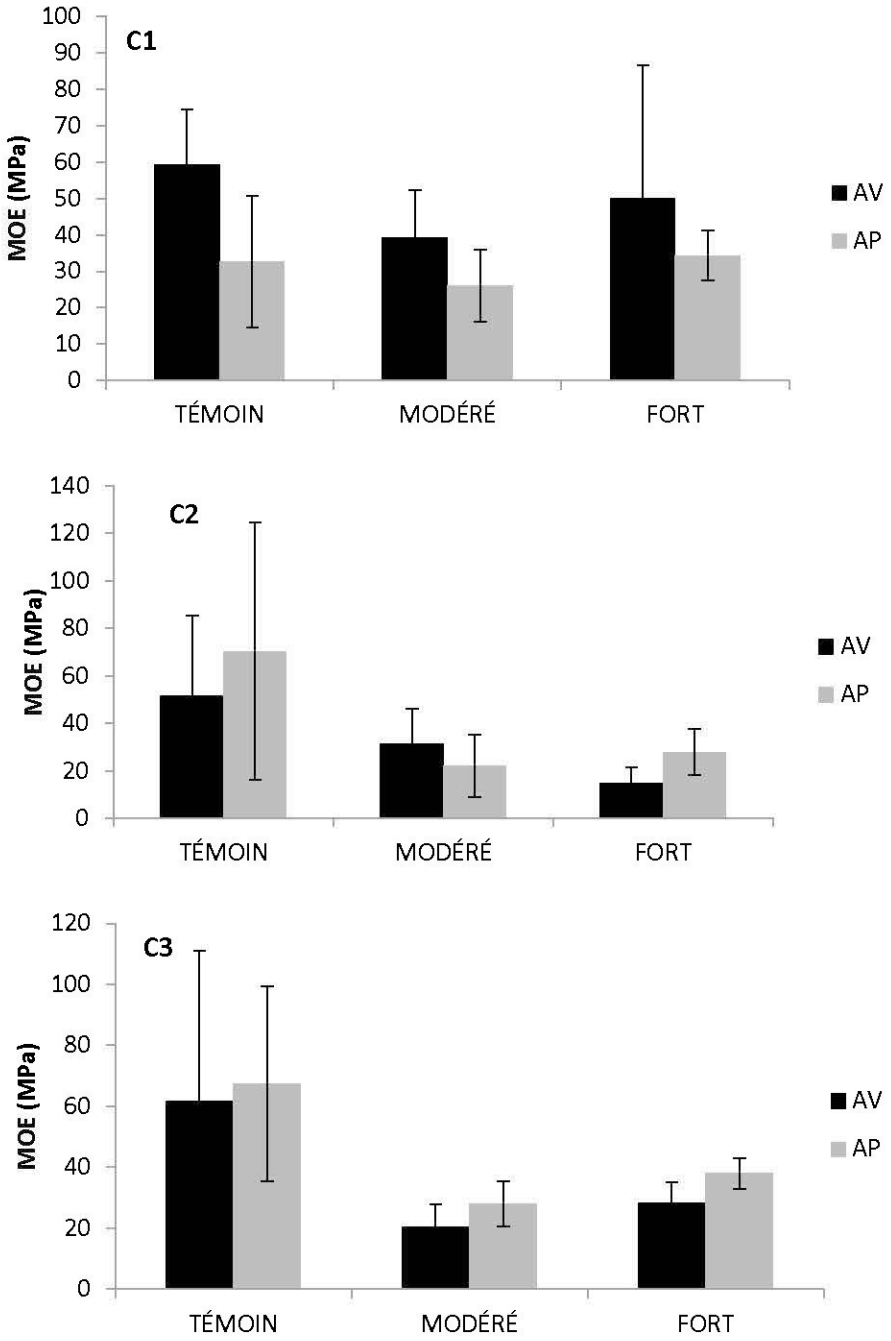

Figure 3.14 Variation du module d'élasticité (MPa) en compression perpendiculaire en fonction du traitement (témoin, modéré et fort) et de la classe de diamètre des arbres (C1, C2 et C3).

3.4 Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique

Dans cette partie, nous avons utilisé 24 arbres pour étudier les propriétés acoustiques de l'épinette noire. Parmi ceux-ci, 7 arbres de la classe C3 (> 20,1 cm) ont servi à étudier les variations en fonction de la position par rapport à la moelle du MOE_{dyn} dans les deux sens de propagation de l'onde acoustique, soit le sens longitudinal et le sens tangentiel (perpendiculaire au fil) au DHP de 1,3 m.

3.4.1 Variation radiale des propriétés acoustiques de l'épinette noire

Le tableau 3.5 montre les valeurs moyennes et les coefficients de variation des essais non destructifs par ultrasons dans la direction longitudinale du bois à côté de la moelle et de l'écorce. Les valeurs moyennes de la vitesse longitudinale de l'onde ultrasonore obtenues dans ce travail étaient très proches de celles rapportées par d'autres chercheurs, soit de 4 000 m/s à 6 000 m/s (Chiu *et al.*, 2012; Haines *et al.*, 1996; Halabe *et al.*, 1997; Hassan *et al.*, 2013; Sandoz *et al.*, 2000; Wang et Ko, 1998). On constate que les valeurs moyennes de vitesse de propagation des ondes ultrasonores des échantillons à côté de l'écorce sont plus élevées que celles près de la moelle. Cette différence correspond à 4 %; c'est la même observation pour la masse volumique, qui est plus élevée de 3,36 %. Ceci s'explique par le fait que le bois mature à côté de l'écorce a un pourcentage plus élevé que le bois final, des fibres plus épaisses et il est de plus en plus dense, offrant une plus grande vitesse des ondes ultrasonores (Bucur, 2006). L'inverse se produit avec le bois juvénile. Plusieurs chercheurs ont effectué des études sur la relation entre la vitesse de l'onde ultrasonore et la masse volumique du bois (De Oliveira et Sales, 2006; Haines *et al.*, 1996). Ces études indiquent que la vitesse des ultrasons tend à augmenter avec l'augmentation de la masse volumique. Il semble que cette variation a un effet sur la variation du MOE dynamique. Selon l'équation 2.1, le module d'élasticité dynamique évalué à partir de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

la propagation d'ultrasons varie en fonction de la vitesse d'ultrason et de la masse volumique du bois.

D'après la figure 3.16, on constate que la valeur moyenne du MOE_{dyn} augmente de la moelle vers l'écorce. Dans la zone du bois proche de la moelle (AV6, AV5, AV4), la valeur moyenne du MOE_{dyn} est 15 % plus faible que celle des échantillons proches de l'écorce (AP, AV1, AV2, AV3). Ainsi, le profil du MOE_{dyn} présente une pente positive de croissance entre AV6 et AV4 et une augmentation relativement constante dans la zone entre AV3 et AP.

D'après le tableau 3.5, les valeurs de coefficient de variation (COV) du bois proche de la moelle sont plus élevées que celles du bois proche de l'écorce. Ceci est expliqué par la structure anatomique du bois juvénile, caractérisé par une faible masse volumique et une résistance mécanique plus faible, par rapport à celle du bois mature, caractérisé par des propriétés physiques et mécaniques plus stables (Alteyrac, 2005).

La figure 3.15 est obtenue en reliant la valeur moyenne de la masse volumique et du module d'élasticité dynamique à différentes distances par rapport à la moelle. Cette figure montre que la masse volumique peut expliquer 78 % de la variation du MOE_{dyn}. Cette observation indique l'existence d'une relation fonctionnelle entre ces paramètres. Ceci est en accord avec Ilic (2003), qui a évalué le module d'élasticité dynamique pour 55 essences de bois (feuillus et résineux). Les résultats indiquent que les conifères présentent un MOE dynamique plus élevé que celui des feuillus. Cette différence est attribuable à l'effet de leur masse volumique, qui est relativement élevée, et n'est pas causée par la vitesse de propagation.

Ces résultats nous permettent de conclure que, comme pour le MOE statique, le MOE dynamique peut être affecté par la proportion du bois juvénile et mature. Il y a une forte ressemblance entre le profil du MOE_{dyn} et le profil de masse volumique (figure 3.16 et figure 3.4), ainsi qu'entre le profil du MOE_{dyn} et du MOE_{stat}

(figure 3.16 et figure 3.1). Ceci est en accord avec les résultats de Karlinasari *et al.* (2008), qui ont indiqué que l'effet de la position d'un échantillon à l'intérieur d'un arbre peut être déterminé par la vitesse de l'onde ultrasonore. L'auteur a aussi rapporté que le MOE_{dyn} a suivi une tendance similaire au MOE et au MOR.

Tableau 3.5

Les valeurs de la masse volumique, de la vitesse de propagation des ondes d'ultrasons et du module d'élasticité dynamique mesuré dans le sens longitudinal près de la moelle et l'écorce pour les échantillons de bois

	Bois proche de la moelle (AV4, AV5, AV6)				**Bois proche de l'écorce (AP, AV1, AV2, AV3)**			
	Min	**Max**	**Moy**	**CV (%)**	**Min**	**Max**	**Moy**	**CV (%)**
Mv (kg/m^3)	425	589	494	8,1	437	671	512	7,8
V (m/s)	4022	5961	5329	9,7	4365	6185	5592	6,8
MOE_{dyn} (MPa)	8165	20903	14220	22,4	9027	25154	16200	17,9

Cependant, d'autres auteurs montrent que le MOE_{dyn} peut dépendre d'autres paramètres, tels que l'angle des microfibrilles (couche S2). Ilic (2003) a indiqué que l'angle des microfibrilles permet de contrôler la propagation de l'onde acoustique dans le bois. Ceci peut représenter une source de variation du MOE_{dyn} dans le bois juvénile par rapport au bois mature, puisque le bois juvénile a un angle de microfibrilles plus grand dans la couche de la paroi cellulaire S2.

Krauss et Kúdela (2011) rapportent que les variations du module d'élasticité dynamique dans le sens parallèle au fil du bois du pin sylvestre sont déterminées par l'angle des microfibrilles. Il existe une corrélation négative claire ($R^2 = 0,74$) entre le module d'élasticité dynamique du bois et l'angle des microfibrilles.

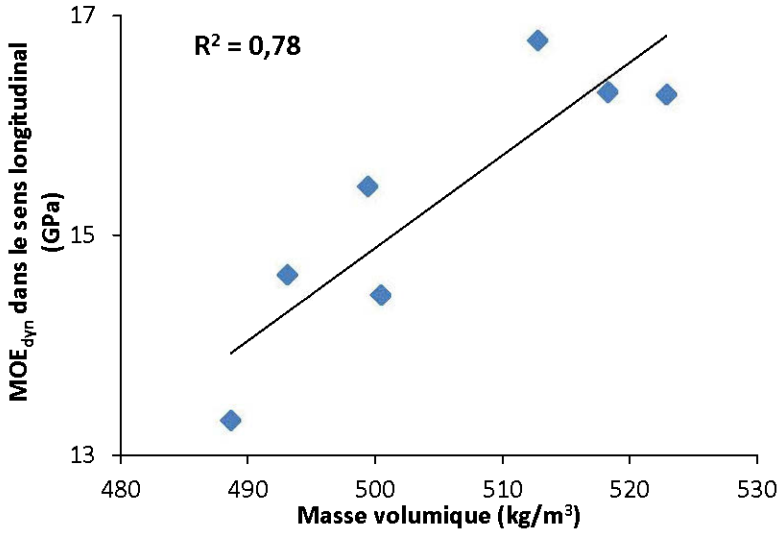

Figure 3.15 Relation entre les valeurs moyennes de la masse volumique et du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal de différentes distances par rapport à la moelle au DHP.

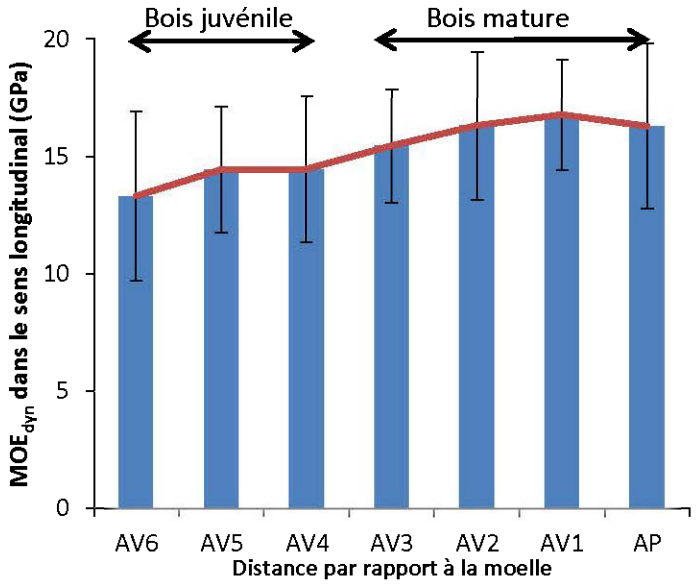

Figure 3.16 Variation de la valeur moyenne du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal en fonction de la position par rapport à la moelle.

Le tableau 3.6 montre les valeurs moyennes et les coefficients de variation des essais non destructifs par ultrasons dans la direction tangentielle (perpendiculaire au fil) du bois à côté de la moelle et de l'écorce. Les valeurs moyennes de la vitesse de l'onde ultrasonore (900 m/s à 2 000 m/s) et du MOE_{dyn} (400 MPa à 2 000 MPa) obtenues dans ce travail sont dans la même plage que celles rapportées par Feio (2006). On observe qu'il existe une différence entre ces valeurs et celles obtenues pour la propagation de l'onde ultrasonore dans le sens longitudinal. Cette différence pourrait être expliquée par la structure du bois par rapport à la direction dans le bois (Mishiro, 1996). Selon Halabe *et al.* (1996), la vitesse d'une onde ultrasonore dépend du mode de vibration (dans les directions longitudinales et transversales) et des propriétés du matériau.

Tableau 3.6

Les valeurs de la masse volumique, de la vitesse de propagation des ondes d'ultrasons et du module d'élasticité dynamique mesuré dans le sens longitudinal près de la moelle et de l'écorce pour les échantillons de bois

	Bois proche de la moelle (AV4, AV5, AV6)				**Bois proche de l'écorce (AP, AV1, AV2, AV3)**			
	Min	**Max**	**Moy**	**CV (%)**	**Min**	**Max**	**Moy**	**CV (%)**
Mv (kg/m^3)	409	636	489	10,1	416	694	528	11,5
V (m/s)	947	2050	1591	15,7	1300	1972	1656	3,7
MOE_{dyn} (MPa)	491	2041	1257	19,9	812	2097	1370	4,3

La dissipation d'énergie de l'onde d'ultrasons (méthode directe) dans la direction perpendiculaire au fil se produit dans la limite des couches du bois initial/bois final; une partie est réfléchie et la partie restante est transmise à la couche suivante, en fonction de l'impédance acoustique (Feio, 2006). De ce fait, la propagation de l'onde ultrasonore est plus rapide dans la direction longitudinale et passe plus facilement à

travers les cellules du bois que dans le sens perpendiculaire au fil (Hassan, 2013). Dans la présente étude, la valeur moyenne de la vitesse d'ultrason dans le sens longitudinal est supérieure de trois fois à celle mesurée dans le sens tangentiel.

La variation du module d'élasticité dynamique mesuré dans le sens perpendiculaire à la fibre en fonction de la distance par rapport à la moelle est illustrée dans la figure 3.17. On observe une diminution du MOE_{dyn} avec une pente négative dans la zone du bois juvénile. La valeur moyenne du MOE_{dyn} pour le bois proche de la moelle (AV6, AV5, AV4) est plus faible de 6 % en comparaison aux échantillons proches de l'écorce (AP, AV1, AV2, AV3) (tableau 3.6). À partir de la zone de transition du bois juvénile/mature, on observe une augmentation de la valeur du MOE_{dyn} avec une pente positive pour atteindre un maximum en AV1, ensuite une diminution en allant vers l'écorce (AP).

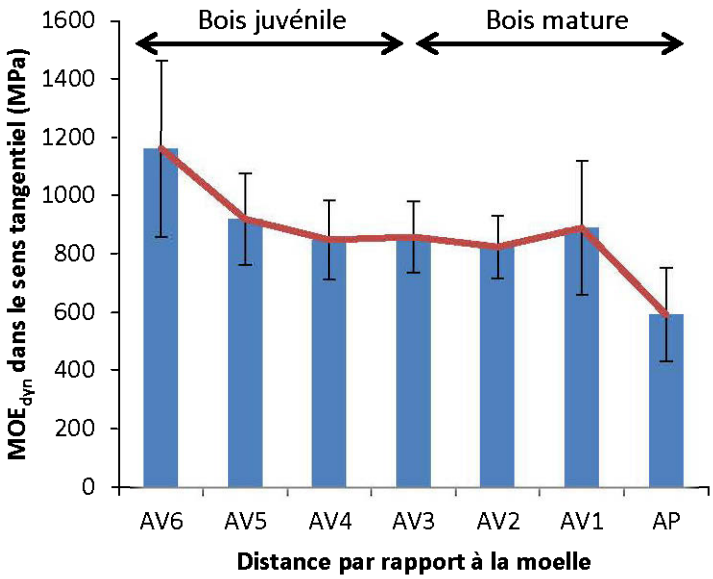

Figure 3.17 Variation de la valeur moyenne du MOE_{dyn} mesuré dans le sens tangentiel en fonction de la position par rapport à la moelle.

D'autre part, la figure 3.17 présente une allure différente par rapport au profil du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal (figure 3.16). Ainsi, on n'observe aucune ressemblance avec le profil de la variation de la masse volumique (figure 3.1).

Il semble que la variation du MOE_{dyn} mesuré dans le sens perpendiculaire à la fibre (le sens tangentiel) n'est pas liée à la variation de la masse volumique, de même que le MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal. Comme le montre la figure 3.18, ceci est confirmé par le coefficient de détermination de la corrélation entre ces deux paramètres ($R^2 = 0,10$), ce qui indique l'absence d'une relation fonctionnelle. Ceci illustre aussi que la masse volumique du bois n'est pas responsable de cette variation, mais probablement qu'elle est attribuable à une variation produite dans l'ultrastructure de la paroi cellulaire entre le bois juvénile et le bois mature.

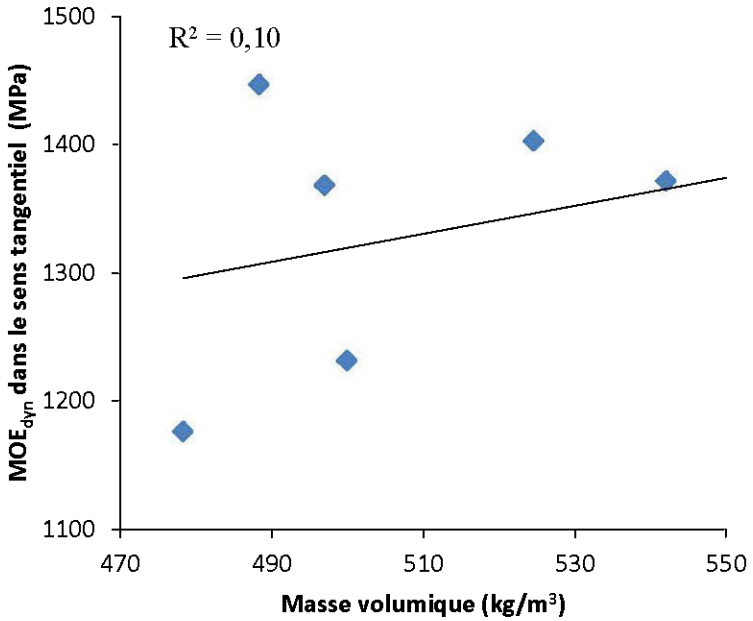

Figure 3.18 Relation entre les valeurs moyennes de la masse volumique et du MOE_{dyn} mesuré dans le sens tangentiel de différentes distances par rapport à la moelle au DHP.

D'autre part, les résultats peuvent être affectés par l'orientation des cernes, qui influe sur la déviation de l'énergie de l'onde d'ultrason (Bucur, 2006). Feio (2006) a indiqué que, pour la méthode directe d'ultrason appliquée dans la direction perpendiculaire au fil, l'orientation des cernes influe sur la vitesse d'ultrason et doit être prise en compte pour ce type d'essai.

3.4.2 Relation entre le MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal et le MOE_{stat} mesuré en flexion trois points

Cette partie vise à caractériser la relation entre le MOE_{stat} en flexion trois points et le MOE_{dyn} obtenu par la mesure de la vitesse d'ultrason dans le sens longitudinal pour les échantillons de 150 mm x 10 mm x 10 mm. La masse volumique moyenne des pièces est de 544 kg/m^3 à 10 % d'humidité (tableau 3.7).

Tableau 3.7

Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens longitudinal et de la résistance en flexion trois points pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce pour les 24 arbres

	Moyenne	**Écart type**	**COV (%)**
Mv (kg/m^3)	544	55	10,2
V (m/s)	5531	482	8,8
MOE_{dyn} (GPa)	16,7	3,4	20,1
MOE_{stat} (GPa)	9,2	2,1	22,6

Les résultats indiquent que la valeur moyenne du MOE_{dyn} est de 16,7 GPa, avec un écart type de 3,4 GPa (tableau 3.7). La valeur moyenne du MOE_{stat} en flexion trois points est de 9,2 GPa, avec un écart type de 2,1 GPa. Ces résultats sont obtenus pour 421 échantillons prélevés de la moelle à l'écorce, à partir d'une planche centrale de

chacun des 24 arbres. On peut constater que la méthode non destructive a généré des valeurs plus élevées par rapport à la méthode statique en flexion trois points. Cela indique que le MOE dynamique obtenu par la technique NDT (technique d'ultrason) est plus élevé que celui des essais statiques, comme prévu dans la littérature. Ces résultats sont similaires à ceux des études menées par Wang *et al.* (2008), Chiu *et al.* (2012) et Haines *et al.* (1996), qui ont rapporté que la valeur moyenne du module d'élasticité déterminé par la méthode ultrasonore dans le sens longitudinal dépasse le MOE_{stat} en flexion d'environ 17 à 22 % lorsqu'aucune correction n'est faite sur le MOE_{stat}. Wang *et al.* (2007) et Haines *et al.* (1996) indiquent que ce comportement est attribuable à la nature viscoélastique du bois. Lorsqu'une force est appliquée pendant une très courte durée, le bois se comporte comme un solide élastique, comme dans le cas d'un test non destructif, tandis que pour une plus longue durée, la réaction est semblable à celle d'un liquide visqueux. Cette manifestation est plus importante pour les essais statiques de flexion. Par conséquent, le module d'élasticité dynamique est généralement plus élevé que le MOE en flexion statique (Halabe *et al.,* 1996).

D'autre part, cette différence n'est pas seulement attribuable à la valeur du MOE_{dyn}, qui est généralement élevée et supérieure au MOE_{stat}, car l'essai de flexion trois points fournit un module d'élasticité sous-estimé par rapport à l'essai de flexion en quatre points (Haines *et al.,* 1996). En effet, l'essai de flexion trois points ne tient pas compte de la valeur de la déflexion du cisaillement au centre du chargement. Cette différence peut être réduite en corrigeant la valeur du module d'élasticité statique en flexion trois points (Baar *et al.*, 2015). Hassan *et al.* (2013) ont constaté une diminution de 30 à 19,4 % entre la valeur moyenne du module d'élasticité mesuré par la méthode ultrasonique et celle du module d'élasticité mécanique corrigé.

Les valeurs du MOE_{dyn} et du MOE_{stat} en flexion trois points de tous les échantillons (421 échantillons) prélevés de la moelle à l'écorce des 24 arbres sont combinées pour étudier la corrélation entre la mesure non destructive par ultrasons et la mesure de la

Rapport-Gratuit.com

résistance du bois par flexion trois points. La corrélation entre les deux modules d'élasticité montre que le coefficient de détermination de la relation est de 0,62 (figure 3.19).

Plusieurs chercheurs indiquent que l'utilisation de l'outil ultrason a donné des corrélations significatives entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat} en flexion (Chiu *et al.*, 2012; Haines *et al.*, 1996; Liang et Fu, 2007). Le coefficient de détermination trouvé par la présente étude n'est pas loin de celui trouvé par Hassan *et al.* (2013), qui ont réalisé une étude en utilisant 40 échantillons (20 mm x 60 mm x 500 mm) de pin sylvestre. Ces résultats montrent un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,73$ entre le MOE_{stat} en flexion (valeur sans correction) et le MOE_{dyn} déterminé par la technique d'ultrason, ce qui indique une bonne corrélation.

Karlinasari *et al.* (2008) ont examiné l'utilité de l'ultrason pour évaluer la rigidité et la résistance mécanique du bois de *Gmelina arborea* en utilisant 72 échantillons (50 mm x 50 mm x 760 mm) à plusieurs positions dans l'arbre. Il y avait une forte corrélation avec un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,92$.

La différence entre le nombre des échantillons utilisés dans ces deux études et dans cette partie de notre travail pourrait expliquer la faiblesse relative du coefficient trouvé dans notre cas. Comme le montre le tableau 3.7, l'utilisation des 421 échantillons a généré des coefficients de variation (COV) élevés de la masse volumique, de la vitesse de l'ultrason et du MOE_{dyn}, qui peuvent être attribuables à la différence entre les caractéristiques mécaniques et physiques entre le bois juvénile et le bois mature, comme c'est décrit dans la section précédente (paragraphe 3.4.1).

Dans cette partie, nous nous proposons de réduire le nombre de points utilisés pour caractériser la relation entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat} en reliant les valeurs moyennes de ces paramètres sur le plan de la planche centrale de chaque arbre (la moyenne arithmétique inclut toutes les éprouvettes de la moelle vers l'écorce) (tableau 3.8).

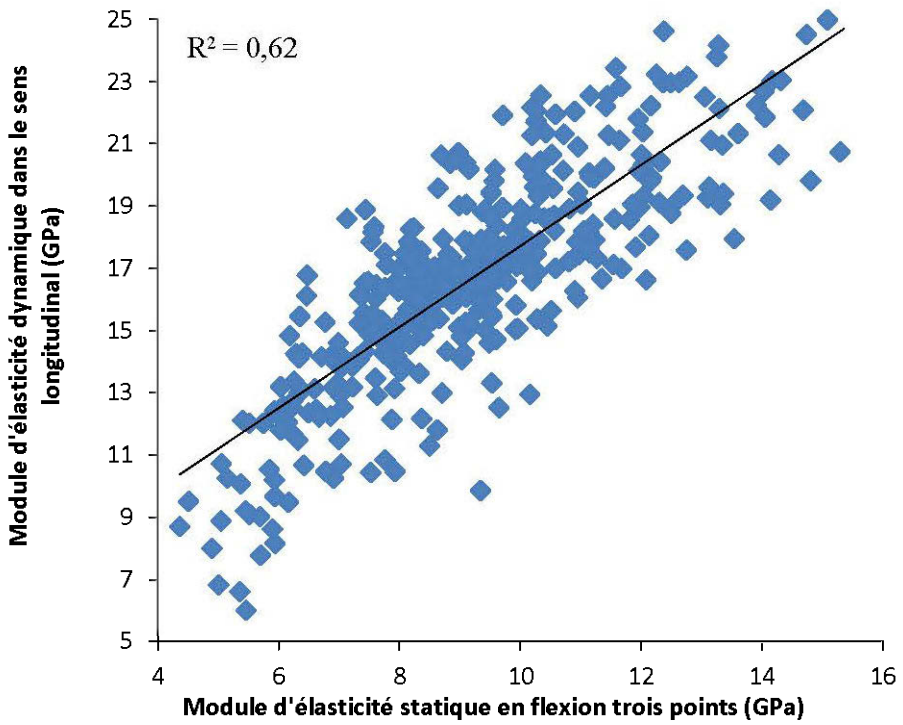

Figure 3.19 Relation entre le MOE_{dyn} dans le sens longitudinal et le MOE_{stat} en flexion trois points pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce des 24 arbres.

Les résultats montrent que la relation devient plus forte et le coefficient de détermination de la relation est passé de $R^2 = 0,62$ à $R^2 = 0,87$, comme l'indique la figure 3.20. Un résultat similaire a également été rapporté par Paradis (2011), qui a trouvé un coefficient de détermination de $R^2 = 0,87$ pour l'épinette noire en utilisant la méthode de l'onde mécanique et de la flexion quatre points pour mesurer respectivement le MOE_{dyn} et le MOE_{stat}, de la planche centrale de 26 arbres au DHP.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 3.8

Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens longitudinal et de la résistance en flexion trois points pour les 24 arbres

	Moyenne	**Écart type**	**COV (%)**
Mv (kg/m^3)	552	43	7,8
V (m/s)	5528	277	5
MOE_{dyn} (GPa)	17,0	2,4	13,9
MOE_{stat} (GPa)	9,3	1,3	13,5

En premier lieu, dans le cas des mesures individuelles des échantillons (420 échantillons), il semble que la variation de la masse volumique entre le bois final et le bois initial engendre une variation sur le plan des paramètres utilisés pour le calcul du MOE_{dyn}. En effet, le bois initial de l'épinette noire présente une masse volumique de 383 kg/m^3, qui est moins élevée que celle du bois final, 658 kg/m^3 (Ourais, 2012). Lors d'un essai non destructif par ultrasons, les deux couches de bois final/bois initial sont parallèles à la direction de transmission de l'onde ultrasonore. Le bois final, dont la masse volumique est plus élevée, est probablement la région où les ondes ultrasonores se propagent à la vitesse la plus élevée (Bucur, 1983). De ce fait, il semble que le MOE_{dyn} de l'échantillon est la résultante des deux MOE_{dyn}; le premier est relatif au bois final et le deuxième est relatif au bois initial. En allant de la moelle à l'écorce, la proportion du bois initial/bois final varie d'une façon importante, ce qui cause un coefficient de variation élevé du MOE_{dyn} (tableau 3.7).

En deuxième lieu, pour 24 arbres, l'effet de la variabilité entre le bois initial et le bois final a été réduit grâce à l'utilisation des valeurs moyennes du MOE_{stat} et du MOE_{dyn}, qui tiennent compte des propriétés de l'ensemble de la planche centrale de chaque arbre (tableau 3.8). Ceci pourrait expliquer l'amélioration observée pour la corrélation.

Finalement, il semble que la connaissance de la variation du MOE_{dyn} en fonction de la variation de la masse volumique du bois initial/bois final est bien importante pour analyser les corrélations qui existent entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat}.

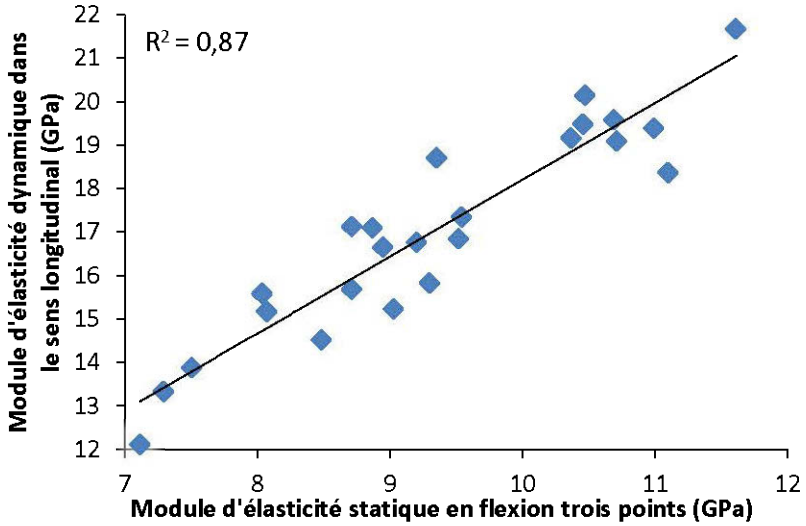

Figure 3.20 Relation entre les valeurs moyennes du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal et du MOE_{stat} mesuré en flexion trois points de la planche centrale des 24 arbres.

En se basant sur les résultats ci-dessus, le module d'élasticité dynamique mesuré dans le sens longitudinal s'avère un paramètre représentatif pour prédire la résistance mécanique en flexion trois points de l'épinette noire dans notre cas. Généralement, les résultats obtenus par d'autres chercheurs soulignent que les méthodes non destructives basées sur la mesure de la vitesse de l'onde d'ultrason sont appropriées pour évaluer les modules d'élasticité dynamique et ont une bonne relation avec le test destructif en flexion (trois et quatre points). La force de la relation dépend surtout de l'espèce du bois et de la méthode utilisée (Ilic, 2003; Karlinasari *et al.,* 2008; Liang et Fu, 2007; Paradis, 2011). Il semble que le nombre d'échantillons ainsi que la variabilité de la masse volumique entre le bois initial et le bois final soient aussi des paramètres déterminants.

3.4.3 Relation entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat} mesurés en compression parallèle

De la même manière, nous avons refait les mêmes calculs pour le MOE_{stat} et le MOE_{dyn} en compression parallèle. Suivant la même démarche, nous avons essayé en premier lieu de déterminer la relation entre ces deux paramètres sur l'ensemble des échantillons avant d'affiner le coefficient de détermination sur la moyenne des échantillons de la planche centrale de chaque arbre.

Cette partie vise à caractériser la relation entre le MOE_{stat} en compression parallèle et le MOE_{dyn} obtenus par la mesure de la vitesse d'ultrason dans le sens longitudinal des échantillons de 40 mm x 10 mm x 10 mm. La masse volumique moyenne des pièces est de 537 kg/m^3 à 10 % d'humidité (Tableau 3.9).

Les résultats indiquent que la valeur moyenne du MOE_{dyn} est de 16 GPa, avec un écart type de 2,8 GPa (Tableau 3.9). La valeur moyenne du MOE_{stat} est de 4,5 GPa, avec un écart type de 0,8 GPa, pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce de chaque planche centrale des 24 arbres. On peut constater que la méthode non destructive a généré des valeurs plus élevées pour le module d'élasticité que pour la méthode statique. Ainsi, on observe que la valeur moyenne du MOE_{dyn} de des échantillons de compression parallèle est inférieure de 4,3 % par rapport à celle des échantillons de flexion trois points.

Les valeurs du MOE_{dyn} dans le sens longitudinal et du MOE_{stat} en compression parallèle de l'ensemble des échantillons (389 échantillons) sont combinées pour étudier la corrélation entre les deux modules d'élasticité (figure 3.21). Le coefficient de détermination de la relation entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat} en compression parallèle est $R^2 = 0,64$. Cette valeur est proche des valeurs obtenues par d'autres études (Feio, 2006; Machado *et al.,* 2003).

Tableau 3.9

Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens longitudinal et de la résistance en compression parallèle pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce de chaque planche centrale des 24 arbres

	Moyenne	**Écart type**	**COV (%)**
Mv (kg/m^3)	537	59	10,9
V (m/s)	5446	590	10,8
MOE_{dyn} (GPa)	16	2,8	17,3
MOE_{stat} (GPa)	4,5	0,8	10,6

Tableau 3.10

Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens longitudinal et de la résistance en compression parallèle pour 24 arbres

	Moyenne	**Écart type**	**COV (%)**
Mv (kg/m^3)	545	44	8,0
V (m/s)	5403	320	5,9
MOE_{dyn}(GPa)	15,9	1,8	8,7
MOE_{stat} (GPa)	4,8	0,3	6,2

Feio (2006) a trouvé un coefficient de détermination de $R^2 = 0,61$, qui a été obtenu par la mesure du MOE_{dyn} avec la méthode d'ultrason indirecte et la mesure du MOE_{stat} en compression parallèle pour 94 échantillons du bois de Castanea. Pour l'essai non destructif, les dimensions sont de 50 x 50 x 300 mm; le test mécanique a été effectué avec des échantillons de 50 x 50 x 100 mm.

Machado *et al.* (2003) ont rapporté que pour le bois de pin maritime, le coefficient de détermination était de $R^2 = 0,76$, lequel a été obtenu par la mesure du MOE_{dyn} avec la méthode d'ultrason. Les échantillons utilisés dans cette étude étaient au nombre de 30 et les dimensions étaient de 25 mm x 25 mm x 200 mm.

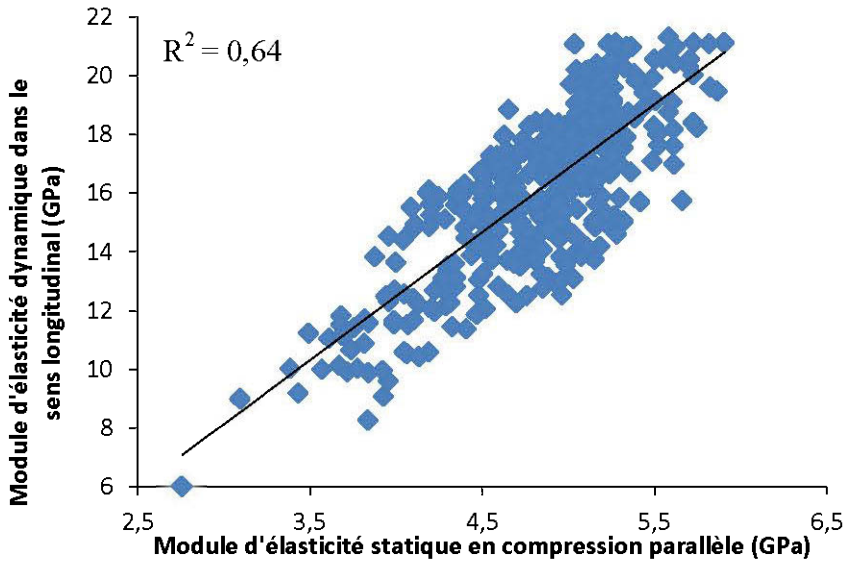

Figure 3.21 Relation entre le MOE_{dyn} dans le sens longitudinal et le MOE_{stat} en compression parallèle pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce des 24 arbres.

En reliant les valeurs moyennes du MOE_{dyn} et du MOE_{stat} de chaque planche centrale des 24 arbres, comme avec la flexion trois points, les résultats montrent que la force de la relation devient plus forte; le coefficient de détermination de la relation est passé de $R^2 = 0,64$ à $R^2 = 0,79$ (figure 3.22). Cette amélioration pourrait être expliquée par le petit nombre d'échantillons utilisés pour tracer la figure 3.22 (24 arbres). En effet, les résultats montrent que l'utilisation d'un grand nombre d'échantillons prélevés de la moelle à l'écorce engendre une importante variabilité, qui est observée sur le plan du MOE_{dyn}. Ceci pourrait être expliqué par la différence

entre la masse volumique du bois initial et du bois final; ainsi, une faible corrélation est obtenue. Cependant, l'utilisation des valeurs moyennes du MOE_{dyn} et du MOE_{stat} des 24 arbres a diminué cette variabilité pour ces deux paramètres. En plus, ce résultat est en accord avec la discussion de la section précédente (paragraphe 3.4.2).

À notre connaissance, aucune étude analysant la relation entre le MOE_{stat} en compression parallèle et le MOE_{dyn} mesuré par ultrasons n'a été menée pour l'épinette noire. La corrélation trouvée dans cette étude pourrait être considérée comme positive et encourageante pour lancer d'autres études qui traiteront du même volet.

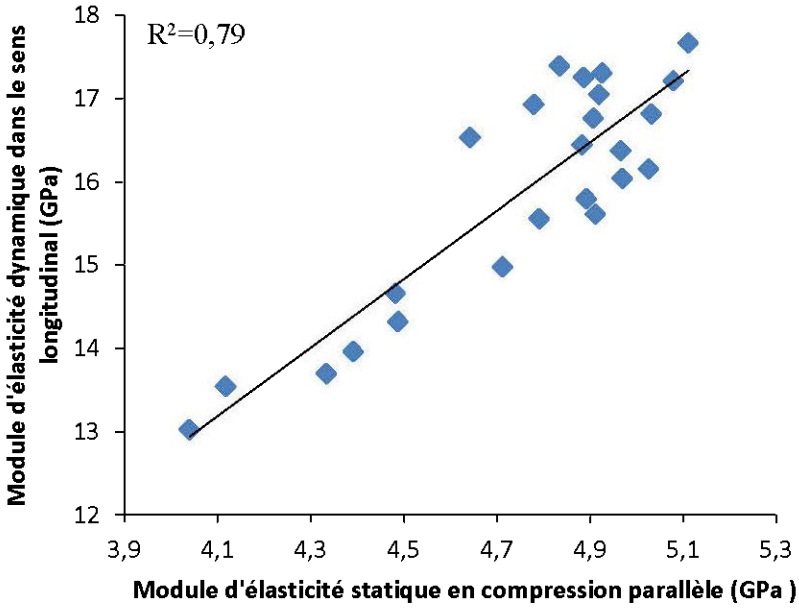

Figure 3.22 Relation entre les valeurs moyennes du MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal des fibres et celles du MOE_{stat} mesuré en compression parallèle de la planche centrale des 24 arbres.

3.4.4 Relation entre le MOE_{dyn} et le MOE_{stat} mesuré en compression perpendiculaire

Cette partie vise à caractériser la relation entre le MOE_{stat} en compression perpendiculaire et le MOE_{dyn} obtenus par la mesure de la vitesse d'ultrason dans le sens tangentiel des échantillons de 10 mm x 10 mm x 10 mm. La masse volumique moyenne des pièces est de 548 kg/m^3 à 10 % d'humidité (tableau 3.11).

Les résultats indiquent que la valeur moyenne du MOE_{dyn} est de 1 468 MPa, avec un écart type de 377 MPa (tableau 3.11). La valeur moyenne du MOE_{stat} est de 37 MPa et un écart type de 27 MPa pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce de chaque planche centrale des 24 arbres. On observe que la valeur moyenne du MOE_{dyn} mesuré dans le sens tangentiel est environ le 1/10 de celui en dans le sens longitudinal.

Tableau 3.11

Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens tangentiel et de la résistance en compression perpendiculaire pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce de chaque planche centrale des 24 arbres

	Moyenne	**Écart type**	**COV (%)**
Mv (kg/m^3)	548	61	11,3
V (m/s)	1636	215	13,2
MOE_{dyn} (MPa)	1468	377	25,7
MOE_{stat} (MPa)	37	27	74,3

Les valeurs du MOE_{dyn} dans le sens tangentiel et du MOE_{stat} en compression perpendiculaire de tous les échantillons (375 échantillons) sont combinées pour étudier la corrélation entre la mesure non destructive par ultrasons et la mesure de la

résistance par compression perpendiculaire. La corrélation entre les deux modules d'élasticité montre que le coefficient de détermination est $R^2 = 0{,}30$ (figure 3.23). Selon le tableau 3.11, les COV sont trop élevés, surtout pour le MOE_{dyn} (25 %) et le MOE_{stat} (74 %). Ceci peut être une des causes qui ont affaibli la corrélation trouvée.

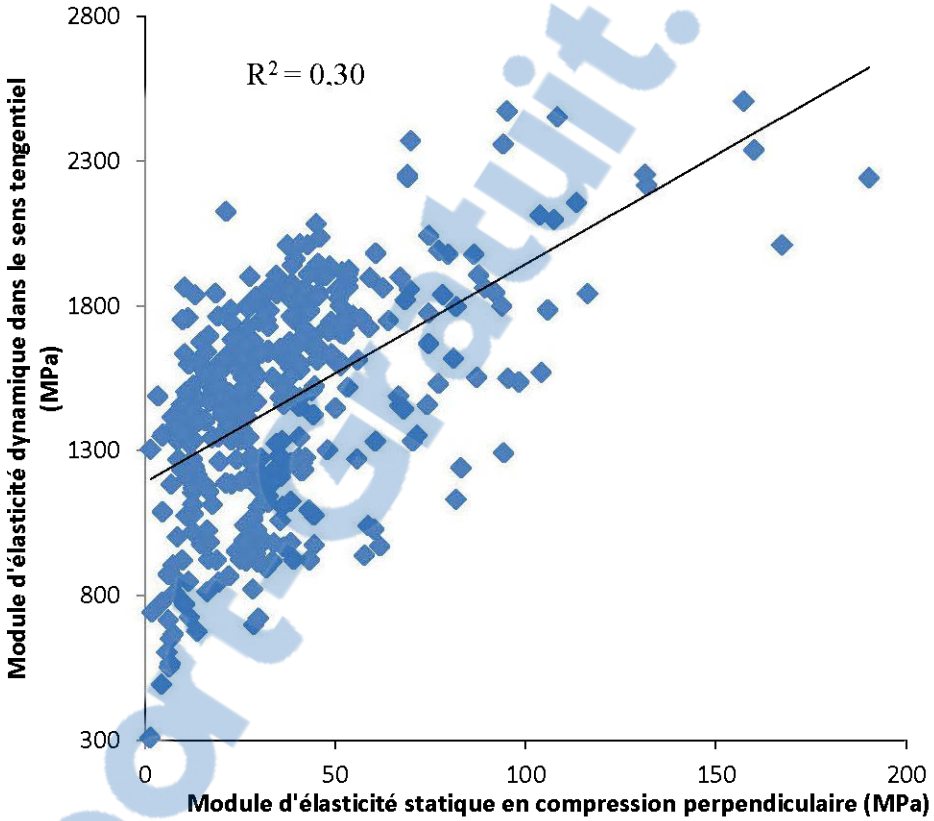

Figure 3.23 Relation entre le MOE_{dyn} dans le sens tangentiel et le MOE_{stat} en compression perpendiculaire pour l'ensemble des échantillons prélevés de la moelle à l'écorce des 24 arbres.

Peu d'études ont analysé la relation entre le MOE_{dyn} mesuré dans le sens perpendiculaire par la méthode d'ultrason directe et le MOE_{stat}. Les résultats de Feio (2006) ont montré qu'une bonne relation existe entre les deux modules, avec un coefficient de détermination de $R^2 = 0{,}69$ pour 164 échantillons de bois de Castanea, dont les dimensions sont de 50 x 50 x 300 mm. La différence entre les deux études

Rapportgratuit.com

peut être expliquée par la méthode non destructive et l'essence de bois utilisée. Ainsi, l'auteur indique que la relation entre le module d'élasticité dynamique et celui d'élasticité statique dans le cas d'une compression perpendiculaire peut dépendre de la relation entre le bois final et le bois initial.

Pour faire la comparaison avec l'épinette noire, aucune étude analysant la relation entre le MOE_{stat} en compression perpendiculaire et le MOE_{dyn} mesuré par ultrasons dans le sens radial n'a été menée, à notre connaissance, pour cette espèce de bois.

En reliant les valeurs moyennes du MOE_{dyn} et du MOE_{stat} de tous les échantillons prélevés de la moelle à l'écorce de chaque planche centrale des 24 arbres, les résultats montrent que la force de la relation devient plus grande et que le coefficient de détermination de la relation est passé de $R^2 = 0,30$ à $R^2 = 0,48$ (figure 3.24).

Tableau 3.12

Variabilité des paramètres utilisés dans le calcul du module d'élasticité dynamique dans le sens tangentiel et de la résistance en compression perpendiculaire pour 24 arbres

	Moyenne	**Écart type**	**COV (%)**
Mv (kg/m^3)	556	43	7,7
V (m/s)	1644	112	6,8
MOE_{dyn} (MPa)	1507	225	16,0
MOE_{stat} (MPa)	37	17	45

Le coefficient de variation (COV) pour le MOE_{stat} est passé de 75 % à 45 % et, par conséquent, l'effet de la variabilité des caractéristiques mécaniques du bois de la moelle à l'écorce est réduit (tableau 3.12).

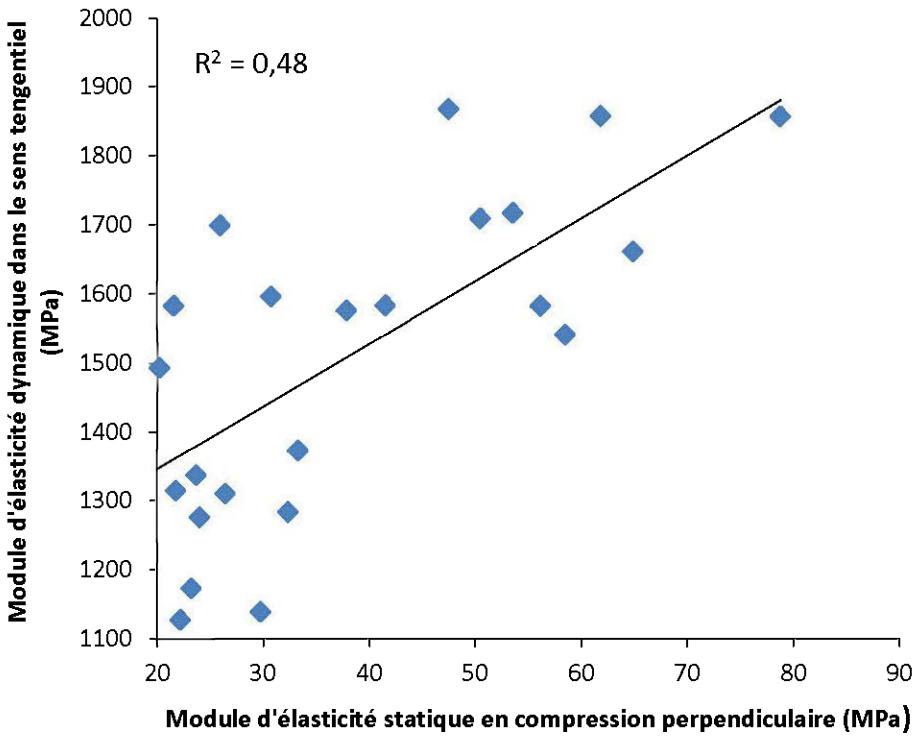

Figure 3.24 Relation entre les valeurs moyennes du MOE_{dyn} obtenu par la mesure de la vitesse acoustique dans le sens radial et du MOE_{stat} mesuré en compression perpendiculaire pour les 24 arbres.

On constate une faible corrélation pour les échantillons de compression perpendiculaire par rapport à celle pour les échantillons de flexion trois points et de compression parallèle. En effet, dans le sens longitudinal, les propriétés acoustiques du bois sont contrôlées par les mêmes mécanismes qui déterminent le comportement statique (Jayne, 1959). En plus, la longueur d'onde et la longueur de la cellule sont à l'échelle de millimètres (Bucur, 2006). Pour cela, une bonne relation entre les deux propriétés du bois était prévue.

Cependant, la propagation de l'onde d'ultrason dans le sens perpendiculaire au fil est beaucoup plus complexe que celle dans le sens longitudinal. Les longueurs d'onde

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

dépassent de manière significative les dimensions moyennes de la cellule. Dans ce cas, la propagation a lieu probablement au sein du régime de diffusion Rayleigh (Bucur, 2006), tandis que pour l'essai statique dans le sens perpendiculaire au fil, la région qui contrôle le comportement élastique est située dans le bois final (Tabarsa et Chui, 2001). La détermination des propriétés acoustiques et statiques dans ce cas est régie par deux mécanismes différents, ce qui peut probablement expliquer la différence entre les corrélations trouvées dans les deux sens de propagation de l'onde ultrasonore.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail était d'évaluer l'effet des coupes partielles à trois intensités de prélèvement (témoin, modéré et fort) sur les propriétés mécaniques en flexion trois points, en compression parallèle et en compression perpendiculaire chez l'épinette noire en milieu boréal. Les variations intra-arbre de ces propriétés étaient également étudiées. Pour ce faire, un échantillonnage destructif sur 38 arbres issus de trois sites, dans la ceinture d'argile du Québec, a été réalisé. Des mesures mécaniques ont été faites en prélevant des éprouvettes, avant et après les coupes partielles, sur trois classes de diamètre à hauteur de poitrine (DHP). Ces travaux nous ont permis de tirer les conclusions qui suivent.

Les variations radiales des propriétés étudiées ont été plus prononcées en flexion trois points et en compression parallèle. De plus, les variations radiales ont été plus importantes dans la phase juvénile du bois.

Cette étude confirme que l'augmentation d'accroissement de l'épinette noire n'a pas d'effet négatif sur la masse volumique; cette réponse varie selon l'intensité du traitement utilisé.

Une croissance accélérée de l'épinette noire après la coupe partielle n'a pas eu des effets négatifs sur les propriétés mécaniques en flexion trois points ni en compression parallèle (MOE, σ_{rup}, σ_{max}). Il n'y a pas eu, non plus, de différence significative entre les intensités de traitement. Toutefois, l'augmentation des valeurs des propriétés mécaniques dans les années après les coupes partielles pourrait être liée à l'augmentation de la masse volumique ou être simplement attribuable à l'évolution de l'âge de l'arbre.

Une réponse différente a cependant été observée pour les propriétés mécaniques en compression perpendiculaire à la suite d'une coupe partielle. La variation du module d'élasticité était reliée seulement à sa valeur avant le traitement. Quant au la contrainte à la rupture, un changement négatif a été observé à la suite d'un traitement de prélèvement d'intensité modérée; cependant, un traitement de prélèvement d'intensité forte n'avait aucun effet nuisible sur cette propriété. Le nombre limité de sites expérimentaux (seulement 3 parmi 11 et en plus les sites sont concentrés dans une seule région, la Ceinture d'Argile d'Abitibi-Témiscamingue).nous empêche de confirmer les résultats de la présente étude.

En effet, les propriétés mécaniques du bois peuvent dépendre de plusieurs paramètres. Étudier l'effet des coupes partielles sur ces propriétés seules n'est pas suffisant pour répondre aux divers questionnements qui en relèvent. D'autres études supplémentaires sur d'autres paramètres, comme la pente du fil, la proportion du bois juvénile et l'angle des microfibrilles, pourraient fournir des informations complémentaires concernant la variation des propriétés mécaniques du bois à la suite d'une coupe partielle. De plus, une plus longue période après l'intervention des coupes partielles serait également appropriée pour recueillir plus d'informations et voir à quel moment les coupes partielles peuvent avoir des effets nuisibles sur les propriétés mécaniques du bois de l'épinette noire.

La deuxième partie de ce travail portait sur l'étude acoustique de l'épinette noire. Cette nouvelle façon de caractériser le bois fournit une contribution scientifique importante et nous a permis d'obtenir les résultats ci-dessous.

La propagation des ultrasons dans le sens longitudinal est sensible à la présence du bois juvénile et du bois mature. Cette différence nous a permis de visualiser la variation du MOE_{dyn} en fonction de la distance par rapport à la moelle. Ces résultats ont montré que le MOE_{dyn} mesuré dans le sens longitudinal variait avec la variation de la masse volumique de l'épinette noire. Par contre, le patron de variation du

MOE_{dyn} mesuré dans le sens perpendiculaire n'était pas lié à la variation de la masse volumique.

La valeur du module d'élasticité dynamique du bois de l'épinette noire obtenue à partir de l'utilisation de la méthode non destructive (ultrason) dans les deux sens de propagation (longitudinal et tangentiel) était plus élevée que celle du module d'élasticité statique mesuré en flexion trois points et en compression (parallèle et perpendiculaire).

Le MOE_{dyn} dans le sens longitudinal était bien corrélé avec le MOE_{stat} mesuré en flexion trois points et en compression parallèle; cependant, dans le sens perpendiculaire au fil, une faible corrélation a été obtenue. Cette étude propose que l'efficacité de l'outil ultrason pour l'évaluation non destructive des propriétés mécaniques de l'épinette noire varie selon la direction des fibres du bois.

En se basant sur ces résultats, cette recherche suggère que des applications industrielles de l'outil ultrason sont possibles. Il semble que cette méthode est prometteuse et fiable en vue de prédire les propriétés mécaniques du bois clair sans défauts de l'épinette noire, une espèce d'importance économique dans l'industrie du bois au Québec, en particulier dans le domaine des produits structuraux, dans lequel le module d'élasticité et le module de rupture sont les critères de choix les plus importants. Par conséquent, cette méthode permet l'augmentation de la qualité et de la compétitivité de cette essence dans ce domaine.

Cette technique est encore naissante au Canada par rapport à d'autres pays, malgré les progrès technologiques survenus dans ce domaine. Cependant, il est nécessaire de comprendre le phénomène de propagation des ondes ultrasonores dans le matériau bois en établissant des relations entre les différentes variables concernées sur des échantillons de dimensions différentes. Il importe aussi de développer d'autres techniques pour optimiser l'utilisation de ces méthodes.

BIBLIOGRAPHIE

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.

Auty, D. et Achim, A. (2008). The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry, 81(4)*, 475-487.

Baara, J., Tippnerb, J. et Rademacherc, P. (2015). Prediction of mechanical properties-modulus of rupture and modulus of elasticity of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas-Cienc Tecnologia, 17(2)*, 239-252.

Barbour, R. J., Fayle, D. C., Chauret, G., Cook, J., Karsh, M. B. et Ran, S. (1994). Breast-height relative density and radial growth in mature jack pine (Pinus banksiana) for 38 years after thinning. *Canadian Journal of Forest Research, 24(12)*, 2439-2447.

Barnett, J. et Jeronimidis, G. (2009). *Wood quality and its biological basis.* Oxford : John Wiley & Sons.

Beall, F. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology, 36(3)*, 197-212.

Bendtsen, B. A. (1978). Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal, 28(10)*, 61-72.

Bergeron, Y., Gauthier, S., Kafka, V., Lefort, P. et Lesieur, D. (2001). Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Canadian Journal of Forest Research, 31(3)*, 384-391.

Bodig, J. et Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and woodcomposites.* New York : Van Nostrand Reinhold Company.

Bois, Guylaine (2009). *Impacts à moyen et long terme des éclaircies commerciales sur le lièvre d'Amérique en forêt boréale.* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal.

Boucher, D., De Grandpré, L. et Gauthier, S. (2003). Development of a stand structure classification systems and comparison of two lichen-spruce woodlands in Quebec. *Forestry Chronicle, 79(2)*, 318-328.

Bouffier, L., Raffin, A., Rozenberg, P., Meredieu, C. et Kremer, A. (2009). What are the consequences of growth selection on wood density in the French maritime pine breeding programme? *Tree Genetics & Genomes, 5(1)*, 11-25.

Bowyer, J. L., Schmulsky, R. et Haygreen, J. G. (2007). *Forest product and wood science* (5e éd.). Oxford : Blackwell Publishing.

Braido dos Santos, D. (2014). *Variations intra-arbre de la croissance radiale, de la masse volumique et de la morphologie des trachéides du bois d'épinette noire (Picea mariana [Mill.] BSP) avant et après traitement de coupes partielles.* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal.

Brancheriau, L. (2013). *Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites.* (Thèse de doctorat). Université Montpellier 2.

Brashaw, B. K., Bucur, V., Divos, F., Goncalves, R., Lu, J. et Meder, R. (2009). Nondestructive testing and evaluation of wood: a worldwide research update. *Forest Products Journal, 59(3)*, 7-14.

Brazier, J. (1986, septembre). *Growth features and structural wood performance.* Communication présentée au 18e IUFRO World Congress, Lubiana, Yougoslavie.

Briggs, D. et Smith, W. (1986). Effects of silvicultural practices on wood properties of conifers: A review. Douglas fir: Stand management for the future. *Institute of Forest Resources Contribution, 55*, 108-117.

Bucur, V. (1983). Vers une appréciation objective des propriétés des bois du violon. *Revue forestière française, 35*, 130-137.

Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood.* New York : CRC Press.

Buongiorno, J. (2004). *Rapport détaillé du comité scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité forestière.* Québec : Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs.

Bustos, C. (2003). *Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire.* (Thèse de doctorat). Université Laval.

Chiu, C.-M., Lin, C.-H. et Yang, T.-H. (2012). Application of nondestructive methods to evaluate mechanical properties of 32-year-old Taiwan incense cedar (Calocedrus formosana) wood. *BioResources, 8(1)*, 688-700.

Cregg, B., Dougherty, P. et Hennessey, T. (1988). Growth and wood quality of young loblolly pine trees in relation to stand density and climatic factors. *Canadian Journal of Forest Research, 18(7)*, 851-858.

De Oliveira, F. G. R. et Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, *97(18)*, 2443-2446.

De Oliveira, F. G. R., Candian, M., Lucchette, F. F., Luis Salgon, J. et Sales, A. (2005). A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (Goupia glabra). *Building and Environment*, *40(2)*, 297-300.

Deresse, T. (1998). *The influence of age and growth rate on selected properties of Maine-grown red pine*. (Thèse de doctorat). Université du Maine.

Dhubhain, A. N., Evertsen, J. et Gardiner, J. (1988). The influence of compression wood on the strength properties of Sitka spruce. *Forest Products Journal*, *38*, 67-69.

Emerson, R. N., Pollock, D. G., Kainz, J. A., Fridley, K. J., McLean, D. et Ross, R. J. (1998, août). *Nondestructive evaluation techniques for timber bridges*. Communication présentée au 5e World Conference on Timber Engineering, Montreux, Suisse.

Environnement Canada (2004). Dans D. Braido dos Santos, *Variations intra-arbre de la croissance radiale, de la masse volumique et de la morphologie des trachéides du bois d'épinette noire [Picea mariana (Mill.) BSP] avant et après traitement de coupes partielles*. (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal.

Erikson, R. G., Gorman, T. M., Green, D. W. et Graham, D. (2000). Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodge-pole pine, ponderosa pine, and grand fir trees from northern Idaho. *Forest Products Journal*, *50(7/8)*, 59-65.

Rapport-Gratuit.com

Ethington, R. L., Eskelsen, V. et Gupta, R. (1996). Relationship between compression strength perpendicular to grain and ring orientation. *Forest Products Journal, 46(1)*, 84-86.

FAA (Federal Aviation Administration). (2014). *Supporting information ultrasonic inspection, Resource for aviation engineers, Non-destructive evaluation.* Récupéré le 14 juillet 2015 de http://www.cnde.iastate.edu/faa-casr/engineers/Supporting%20Info /Supporting%20Info%20Pages/Ultrasonic%20Pages/Ultra-principles.html

Feio, A. (2006). *Inspection and diagnosis of historical timber structures: NDT correlations and structural behaviour*. (Thèse de doctorat). Université du Minho.

Fenton, N. J., Imbeau, L., Work, T., Jacobs, J., Bescond, H. et Drapeau, P. (2013). Lessons learned from 12 years of ecological research on partial cuts in black spruce forests of northwestern Québec. *The Forestry Chronicle, 89(3)*, 350-359.

Filion, J. et Morin, H. (1996). Distribution spatiale de la régénération de l'épinette noire 8 ans après un feu en forêt boréale (Québec). *Canadian Journal of Forest Research, 26(4)*, 601-610.

Forget, E. et Nolet, P. (2005). *Évaluation de la croissance et de la mortalité des érablières de la région de Lanaudière après jardinage : une approche dendrochronologique*. Québec : Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue.

Gagné, L., Lavoie, L. et Binot, J.-M. (2012). Croissance et propriétés mécaniques du bois après éclaircie commerciale dans une plantation d'épinette blanche (Picea glauca) âgée de 32 ans. *Canadian Journal of Forest Research, 42(2)*, 291-302.

Gagnon, R. et Morin, H. (1992, septembre). Establishment period of black spruce (Picea mariana) after fire. Dans T. S. Bartholin, B. E. Berglund, D. Eckstein et F. H. Schweingruber (dir.). *International Dendrochronological Symposium, Tree rings and environment, Lundqua Report 34*. Actes du colloque, les 3-9 septembre 1990 à Ystad (p. 112-114). Lund : Université de Lund.

Glossaire forestier. (2014). *Le glossaire forestier a été conçu dans le but de clarifier et de préciser la signification de termes propres au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs , et de d'autres termes dont l'usage prête à confusion.* Récupéré le 25 juillet 2015 de http://glossaire-forestier.mffp.gouv.qc.ca/Terme.aspx?id=0

Grabianowski, M., Manley, B. et Walker, J. (2006). Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. *Wood Science and Technology*, *40(3)*, 205-216.

Gryc, V. et Vavrčík, H. (2009). Variability of spruce (Picea abies [L.] Karst.) compression strength with present reaction wood. *Journal of Forest Science*, *55(9)*, 415-422.

Guller, B. (2007). The effects of thinning treatments on density, MOE, MOR and maximum crushing strength of Pinus brutia Ten. wood. *Annals of Forest Science*, *64(4)*, 467-475.

Guo, M.-H., Chen, G.-S., Wang, J.-M. et Zhao, X.-P. (2006). Effects of silviculatural treatments on mechanical properties of Pinus sylvestris var. mongolica plantations. *Journal of Forestry Research*, *17(2)*, 157-159.

Haines, D. W., Leban, J.-M. et Herbé, C. (1996). Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*, *30(4)*, 253-263.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Halabe, U. B., Bidigalu, G. M., GangaRao, H. V. et Ross, R. J. (1997). Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. *Materials Evaluation, 55(9)*, 1013-1018.

Halabe, U. B., GangaRao, H. V., Petro, S. H. et Hota, V. R. (1996). Assessment of defects and mechanical properties of wood members using ultrasonic frequency analysis. *Materials Evaluation, 54(2)*, 314-322.

Hanzouli, A. (2013). *Évaluation du potentiel des micro-ondes pour le traitement phytosanitaire du bois*. (Thèse de doctorat). Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Hassan, K. T., Horáček, P. et Tippner, J. (2013). Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonictechniques. *BioResources, 8(2)*, 1634-1645.

Hernández, R. E., Koubaa, A., Beaudoin, M. et Fortin, Y. (1998). Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones. *Wood and Fiber Science, 30(2)*, 138-147.

Hu, Y., Wang, F., Gu, J., Liu, Y. et Nakao, T. (2005). Nondestructive test and prediction of modulus of elasticity of veneer-overlaid particleboard composite. *Wood Science and Technology, 39(6)*, 439-447.

Ilic, J. (2003). Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh- und Werkstoff, 61(3)*, 167-172.

Jayne, B. (1959). Indices of quality: vibrational properties of wood. *Forest Products Journal, 9(11)*, 413-416.

Jessome, A. (1977). *Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada.* (Rapport technique de foresterie n° 21). Ottawa : Laboratoire des produits forestiers de l'Est.

Jones, T. G. et Emms, G. W. (2010). Influence of acoustic velocity, density, and knots on the stiffness grade outturn of radiata pine logs. *Wood and Fiber Science, 42(1)*, 1-9.

Josza, L. A. et Middleton, G. R. (1994). *Les caractéristiques déterminant la qualité du bois : nature et conséquences pratiques.* (Publication spéciale n° 34). Sainte-Foy : Forintek Canada.

Karlinasari, L., Wahyuna, M. E. et Nugroho, N. (2008). Non-destructive ultrasonic testing method for determining bending strength properties of gmelina wood (Gmelina arborea). *Journal of Tropical Forest Science, 20(2)*, 99-104.

Karsulovic, J. T., León, L. A. et Gaete, L. (2000). Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in Pinus radiata lumber. *Wood and Fiber Science, 32(3)*, 278-286.

Kawamoto, S. et Williams, R. S. (2002). *Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites.* (General technical report FPL-GTR-134). Madison : Forest Products Laboratory.

Kennedy, R. W. (1968). Wood in transverse compression – Influence of some anatomical variables and density on behavior. *Forest Products Journal, 11(5)*, 109-121.

Kinra, V. K. (1994). *Brevet américain n° 5,305,239.* Washington, D.C. : U.S. Patents and Trademark Office.

Kliger, R. (2000, juillet-août). *Mechanical properties of timber products required by end-users*. Communication présentée au World Conference on Timber Engineering, Whistler, Canada.

Koga, S. et Zhang, S. (2002). Relationships between wood density and annual growth rate components in balsam fir (Abies balsamea). *Wood and Fiber Science, 34(1)*, 146-157.

Koga, S., Oda, K., Tsutsumi, J. et Fujimoto, T. (1997). Effect of thinning on the wood structure in annual growth rings of Japanese larch (Larix leptolepis). *Iawa Journal, 18*, 281-290.

Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S. Y., Beaulieu, J. et Bousquet, J. (2005). Transition from juvenile to mature wood in black spruce (Picea mariana [Mill.] BSP). *Wood and Fiber Science, 37(3)*, 445-455.

Koubaa, A., Zhang, S. T. et Makni, S. (2002). Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of Forest Science, 59(5-6)*, 511-518.

Krauss, A. et Kúdela, J. (2011). Ulrasonic wave propagation and young's modulus of elasticity along the grain of scots pine wood (pinus sylvestris l.) varying with distance from the pith. *Wood Research, 56(4)*, 479-488.

Kretschmann, D. E. (1997, août). Effect of juvenile wood on shear parallel and compression perpendicular-to-grain strength for loblolly pine. Dans Forintek Canada (dir.). *CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop*. Actes du colloque, les 18-22 août 1997 à Québec (p. 23-30). Québec : Forintek Canada.

Lefebvre, J.-P., Lasaygue, P., Potel, C. et De Belleval, J.-F. (2004). L'acoustique ultrasonore et ses applications (1re partie). *Acoustique & techniques, 36*, 4-11.

Lemay, A. (2012). *Croissance et qualité du bois de l'épinette noire et du sapin baumier après une coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM)*. (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Chicoutimi.

Liang, S.-Q. et Fu, F. (2007). Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber. *Journal of Forestry Research, 18(4)*, 309-312.

Lindström, H., Harris, P., Sorensson, C. et Evans, R. (2004). Stiffness and wood variation of 3-year old Pinus radiata clones. *Wood Science and Technology, 38(8)*, 579-597.

Liu, C., Ruel, J.-C. et Zhang, S. (2007). Immediate impacts of partial cutting strategies on stand characteristics and value. *Forest Ecology and Management, 250(3)*, 148-155.

Mcdonald, P.M. (1976b) Shelterwood cutting in a young-growth, mixed-conifer stand in north central California. USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California. Research Paper PSW-117. 16 p.

Macdonald, E. et Hubert, J. (2002). A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry, 75(2)*, 107-138.

Machado, J. S., Costa, D. et Cruz, H. (2003, septembre). *Evaluation of pine timber strength by drilling and ultrasonic testing*. Communication présentée au International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, Allemagne.

Machek, L., Militz, H. et Sierra-Alvarez, R. (2001). The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests. *Wood Science and Technology*, *34(6)*, 467-472.

Mäkinen, H. et Isomäki, A. (2004). Thinning intensity and growth of Norway spruce stands in Finland. *Forestry*, *77(4)*, 349-364.

Maun, K. (1991). *Sitka spruce for construction timber: the relationship between wood growth characteristics and machine grade yields of Sitka spruce.* (Note n° 212). Edimbourg : Forestry Commission Information, Research Division.

McComb, W. C., Spies, T. A. et Emmingham, W. H. (1993). Douglasfir forests: managing for timber and mature forest habitat. *J-For*, *91*, 31-42.

Mishiro, A. (1996). Effect of density on ultrasonic velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi*, *42(9)*, 887-894.

Moore, J., Achim, A., Lyon, A., Mochan, S. et Gardiner, B. (2009). Effects of early re-spacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber. *Forest Ecology and Management*, *258(7)*, 1174-1180.

Moschler, W. W., Dougal, E. F. et McRae, D. D. (1989). Density and growth ring characteristics of Pinus taeda L. following thinning. *Wood and Fiber Science*, *21(3)*, 313-319.

MRNF (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune). (2003). *Manuel d'aménagement forestier*. Charlesbourg : Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs.

Muller, U., Gindl, W. et Teischinger, A. (2003). Effects of cell anatomy on the plastic and elastic behaviour of different wood species loaded perpendicular to grain. *Iawa Journal*, *24(2)*, 117-128.

Ourais, M. (2012). *Variations intra-arbres de la largeur du cerne, de la masse volumique du bois et des propriétés morphologiques des trachéides de l'épinette noire (Picea Mariana [Mill.] B.S.P.) avant et après traitements sylvicoles.* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Panshin, A. J. et De Zeeuw, C. (1980). *Textbook of wood technology: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada, vol. 1* (4e éd.). New York : McGraw-Hill Book Co.

Paradis, N. (2011). *Relations entre les propriétés mécaniques du bois et les vitesses acoustiques mesurées à trois étapes du processus de transformation du bois.* (Mémoire de maîtrise). Université Laval.

Park, A. et Wilson, E. R. (2007). Beautiful plantations: can intensive silviculture help Canada to fulfill ecological and timber production objectives? *The Forestry Chronicle, 83(6)*, 825-839.

Pnevmaticos, S., Jaeger, T. et Perem, E. (1972). Factors influencing the weight of black spruce and balsam fir stems. *Canadian Journal of Forest Research, 2(4)*, 427-433.

Polge, H. (1964). Le bois juvénile des conifères. *Revue forestière française, 86*, 473-505.

Poulin, J. (2013). Éclaircie commerciale. Dans Bureau du forestier en chef, *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018, fascicule n° 3.5* (p. 95-98). Roberval : Gouvernement du Québec.

Riopel, M., Bégin, J. et Gingras, J. (2000). Une option pour la récolte en forêt boréale : la coupe avec protection des petites tiges marchandes. *FERIC Avantage, 1(17)*, 8.

Ross, R. J. et Pellerin, R. F. (1994). *Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review*. (General technical report FPL-GTR-70). Madison : Forest Products Laboratory.

Ross, R. J., Brashaw, B. et Pellerin, R. F. (1998). Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal, 48(1)*, 14-19.

Ross, R. J., Geske, E. A., Larson, G. et Murphy, J. F. (1991). *Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer*. (General technical report FPL-RP-502). Madison : Forest Products Laboratory.

Ross, R. J., Zerbe, J. I., Wang, X., Green, D. W. et Pellerin, R. F. (2005). Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores. *Forest Products Journal, 55(3)*, 90-94.

Ross, R.J. (ed.) (2010) Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. USDA Forest Products Laboratory, General Technical Report No FPL-GTR-19. Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, Madison, Wisconsin.

Sandoz, J. L., Benoit, Y. et Demay, L. (2000, septembre). *Wood testing using acousto-ultrasonic*. Communication présentée au 12e International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron, Hongrie.

Schneider, R., Zhang, S., Swift, D. E., Begin, J. et Lussier, J.-M. (2008). Predicting selected wood properties of jack pine following commercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research, 38(7)*, 2030-2043.

Shmulsky, R. et Jones, P. D. (2011). *Forest products and wood science, an introduction* (6e éd.). Oxford : John Wiley & Sons.

Swamy, N. et Rigby, G. (1971). Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. *Matériaux et construction*, *4(1)*, 13-40.

Tabarsa, T. et Chui, Y. H. (2000). Stress-strain response of wood under radial compression. Part I. Test method and influences of cellular properties. *Wood and Fiber Science*, *32(2)*, 144-152.

Tabarsa, T. et Chui, Y. H. (2001). Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression. Part II. Effect of species and loading direction. *Wood and Fiber Science*, *33(2)*, 223-232.

Thorpe, H., Thomas, S. et Caspersen, J. (2007). Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (Picea mariana) boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, *37(9)*, 1563-1571.

Timoshenko, S., Young, D. H. et Weaver, W. Jr. (1974). *Vibration problems in engineering* (4e éd.). New York : John Wiley & Sons.

Tong, Q.-J., Fleming, R. L., Tanguay, F. et Zhang, S. (2009). Wood and lumber properties from unthinned and precommercially thinned black spruce plantations. *Wood and Fiber Science*, *41(2)*, 168-179.

Vary, A. (1988). The acousto-ultrasonic approach. Dans J. C. Duke (dir.), *Acousto-ultrasonics: Theory and application* (p. 1-21). New York : Plenum Press.

Viereck, L. A. et Johnston, W. F. (1990). Black spruce (Picea mariana [Mill.] BSP). *Silvics of North America*, *1*, 11.

Rapport-Gratuit.com

Vincent, M., Krause, C. et Koubaa, A. (2011). Variation in black spruce (*Picea mariana* [Mill.] BSP) wood quality after thinning. *Annals of Forest Science, 68(6)*, 1115-1125.

Vincent, M., Krause, C. et Zhang, S. (2009). Radial growth response of black spruce roots and stems to commercial thinning in the boreal forest. *Forestry, 82*, 557-571.

Wang, S.-Y. et Ko, C.-Y. (1998). Dynamic modulus of elasticity and bending properties of large beams of Taiwan-grown Japanese cedar from different plantation spacing sites. *Journal of Wood Science, 44(1)*, 62-68.

Wang, S.-Y., Chen, J.-H., Tsai, M.-J., Lin, C.-J. et Yang, T.-H. (2008). Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. *Journal of Materials Processing Technology, 208(1)*, 149-158.

Wang, X., Carter, P., Ross, R. J. et Brashaw, B. K. (2007). Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials: a path to increased profitability. *Forest Product Journal, 57(5)*, 6-14.

Wang, X., Ross, R. J., Mattson, J. A., Erickson, J. R., Forsman, J. W. et Geske, E. A. (2001). *Several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs*. Madison : Forest Products Laboratory.

Yang, J. et Evans, R. (2003). Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh-und Werkstoff, 61(6)*, 449-452.

Zaturecky, I., Saravi, A., Chiu, I. et Lam, F. (2006). *Stress-wave technology for defect detection and classification of mountain pine beetle infested logs and lumber*. (UBC-004-06). Vancouver : Foresry Innovation Investment Ltd.

Zhang, S. (1995). Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology*, *29(6)*, 451-465.

Zhang, S. (1997). Wood specific gravity-mechanical property relationship at species level. *Wood Science and Technology*, *31(3)*, 181-191.

Zhang, S. et Chauret, G. (2001). *Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (Picea mariana)*. (Project Report). Sainte-Foy : Forintek Canada Corp.

Zhang, S. et Koubaa, A. (2009). Les résineux de l'Est du Canada : écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. Dans FPInnovations (dir.), *Publication spéciale SP-526E* (p. 1-28). Québec : FPInnovations-Forintekdivision.

Zhang, S., Chauret, G., Swift, D. E. et Duchesne, I. (2006). Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, *36(4)*, 945-952.

Zhang, S., Gosselin, R. et Chauret, G. (1997, août). *Wood quality: its definition, impact, and implications for value-added timber management and end uses*. Communication présentée au Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value, CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop, Québec, Canada.

Zobel, B. (1992). Silvicultural effects on wood properties. *IPEF International Piracicaba*, *2*, 31-38.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES