

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

POTENTIEL DES OUTILS NON-DESTRUCTIFS POUR L'ÉTUDE DES EFFETS DES COUPES
PARTIELLES SUR LA CROISSANCE ET LA MASSE VOLUMIQUE DU BOIS DE L'ÉPINETTE
NOIRE (*PICEA MARLANA* (MILL.) B. S. P.) À L'ÉCHELLE DES PEUPELEMENTS

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

EXTENSIONNÉE DE

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR

FATMA RZEM

MAI 2018



BIBLIOTHÈQUE

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

Mise en garde

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

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

Warning

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

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

REMERCIEMENTS

La présente étude fut réalisée grâce à la participation et le soutien de plusieurs collaborateurs que je tiens à remercier. J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Ahmed Koubaa, pour la confiance qu'il m'a accordé pour mener à bien ce travail de recherche, son soutien, sa patience ainsi que ses encouragements et sa précieuse aide. Je tiens également à remercier mon co-directeur Alain Leduc pour son apport précieux durant la partie terrain de mon projet. Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation des travaux de terrain à commencer par Marouan Rejeb, Alfred Coulombe, Dave Therrien et Cyriac Serge Mvolo, sans qui le présent travail n'aurait pas vu le jour. Je remercie également William Belhadef et Besma Bouslimi pour leurs conseils et leurs aides tout au long de mon parcours de maîtrise. Un grand merci au corps enseignant de la chaire de recherche sur les forêts (CAFD) d'avoir partagé leur expertise et de m'avoir apporté le soutien nécessaire pour parfaire ma formation. Je remercie également toute l'équipe de la Chaire de recherche du Canada sur la valorisation, la caractérisation et la transformation du bois (CRC-VACAT), mes collègues et amis. J'exprime ma gratitude au FQRNT et le CRSNG pour le soutien financier m'ayant permis de poursuivre mes recherches. Je tenais également à remercier les différents partenaires Ryam Gestion forestière, Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables ainsi que la Fondation Canadienne pour l'Innovation. Finalement, je tiens à remercier spécialement ma famille qui n'a cessé de m'encourager et de me motiver. Merci pour la confiance que vous m'accordez pour réussir cette belle expérience.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
RÉSUMÉ	x
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	1
CHAPITRE II	
REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
2.1 L'épinette noire.....	3
2.1.1 Description botanique.....	3
2.1.2 Description et anatomie du bois.....	5
2.1.3 Importance écologique.....	6
2.1.4 Importance économique.....	7
2.2 Traitements sylvicoles.....	7
2.3 Qualité du bois de l'épinette noire.....	10
2.3.1 Notion de qualité du bois.....	10
2.3.2 Les attributs de la qualité du bois étudiés.....	10

2.3.3 Effets des coupes partielles sur la qualité du bois	12
2.3.4 Autres facteurs influençant la qualité du bois	21
2.4 Utilisation des outils non-destructifs dans la caractérisation de la densité du bois des arbres sur pied	24
2.5 Objectifs de recherche.....	28
2.6 Hypothèses de travail.....	28
2.7 Analyse statistique des propriétés mesurées	30
CHAPITRE III	
MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	32
3.1 Sites expérimentaux	32
3.2 Traitements sylvicoles.....	36
3.3 Échantillonnage.....	36
3.4 Protocole expérimental	37
3.4.1 Le densitomètre à rayons X (Q.M.S).....	37
3.4.2 Le résistographe	39
CHAPITRE IV	
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	43
4.1 Validation des données du résistographe	43
4.1.1 Comparaison qualitative	43
4.1.2 Comparaison quantitative	46
4.2 Variation radiale intra-arbre de la croissance et la masse volumique : résistographe et densitomètre à rayons X	51
4.2.1 Mesures au densitomètre à rayons X	51
4.2.2 Comparaison des profils de variation radiale de la masse volumique et la croissance radiale résistographe et densitomètre à rayons X	56
4.3 Effets des coupes partielles sur la croissance et la masse volumique du bois à l'échelle du peuplement	61
4.3.1 Résultats obtenus par le densitomètre à rayons X	62
4.3.2 Évaluation de l'effet de la coupe partielle sur la qualité du bois par mesures au résistographe	74
4.4 Retombées du projet.....	78

CHAPITRE V	
CONCLUSION.....	81
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	84

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
2.1	Le résistographe et ses équipements.....	27
2.2	Profil de variation radiale de la résistance au perçage généré par le résistographe : Cas de l'épinette noire.....	27
3.1	Réseau des coupes partielles de l'Abitibi.....	32
3.2	Traitements sylvicoles appliqués dans chaque site d'étude.....	35
3.3	Représentation schématique du dispositif d'échantillonnage non destructif.....	37
3.4	Exemple de mesure d'un échantillon d'épinette noire par le densitomètre à rayons X.....	38
3.5	Exemples de profils radiaux de trois épinettes noires (1, 2 et 3).....	41
3.6	Relation entre la masse volumique du bois et le pourcentage de puissance de perçage du résistographe.....	42
4.1	Exemples du résultat de superposition de deux profils de variation radiale de la masse volumique (résistographe et DRX) en fonction de la longueur de l'échantillon allant de l'écorce jusqu'à la moelle (de gauche à droite).....	45
4.2	Corrélation entre les données de la densité moyenne du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000)	48
4.3	Corrélation entre les données de la densité maximale du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000).....	49
4.4	Corrélation entre les données de la densité minimale du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000)	49
4.5	Corrélation entre les données de la densité du bois initial du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000).....	50
4.6	Corrélation entre les données de la densité du bois final du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000)	50

4.7	Variation radiale de la masse volumique du cerne.....	52
4.8	Variation radiale de la masse volumique du bois initial.....	52
4.9	Variation radiale de la masse volumique du bois final.....	53
4.10	Variation radiale de la largeur moyenne du cerne au DHP (1,3 m) en fonction du site et de la moyenne de tous les sites (les barres représentent les écarts-type)	54
4.11	Variation radiale de la largeur du bois initial au DHP (1,3 m) en fonction du site et de la moyenne de tous les sites (les barres représentent les écarts-type)	55
4.12	Variation radiale de la largeur du bois final au DHP (1,3 m) en fonction du site et la moyenne de tous les sites (les barres représentent les écarts-types).....	55
4.13	Comparaison de la variation radiale de la masse volumique du cerne pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X.....	57
4.14	Comparaison de la variation radiale de la masse volumique du bois initial pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X.....	57
4.15	Comparaison de la variation de la masse volumique du bois final pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X.....	58
4.16	Comparaison de la variation de la largeur moyenne du cerne pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X.....	60
4.17	Comparaison de la variation de la largeur du bois initial pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X.....	60
4.18	Comparaison de la variation de la largeur du bois final pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X.....	61
4.19	Variation de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final en fonction du site.....	63
4.20	Variation de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge de l'arbre.....	64
4.21	Effets de l'intensité du traitement sur la masse volumique moyenne du cerne en fonction de la classe d'âge de l'arbre.....	65
4.22	Variation de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de la classe de DHP.....	66
4.23	Effets de l'intensité du traitement sur la masse volumique moyenne du cerne en fonction du temps après coupe.....	67

4.24	Variation de la largeur du cerne, du bois initial et du bois final en fonction du site.....	69
4.25	Effets de l'intensité du traitement sur la largeur moyenne du cerne en fonction du temps après coupe.....	70
4.26	Variation de la largeur du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge de l'arbre.....	71
4.27	Effets de l'intensité du traitement sur la largeur moyenne du cerne en fonction de la classe d'âge de l'arbre.....	71
4.28	Variation de la largeur du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de la classe de DHP.....	73
4.29	Effets de l'intensité du traitement sur la largeur moyenne du cerne en fonction de la classe de DHP.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	Synthèse des effets de quelques traitements sylvicoles sur la qualité du bois.....	20
3.1	Caractéristiques des sites d'échantillonnage.....	33
3.2	Localisation GPS du peuplement d'épinette noire échantillonné.....	39
4.1	La relation entre les paramètres intra-arbre et intra-cernes mesurés par le DRX et le résistographe.....	47
4.2	Résultats de l'analyse de variance d'un modèle mixte pour interpréter l'effet des différentes variables explicatives sur la masse volumique du cerne et de ses composantes (Valeur de p pour un seuil de significativité $\alpha = 0,05$ ns : non significatif).....	62
4.3	Résultats de l'analyse de variance d'un modèle mixte pour interpréter l'effet des différentes variables explicatives sur la largeur du cerne et de ses composantes (Valeur de p pour un seuil de significativité $\alpha = 0,05$; ns : non significatif).....	68
4.4	Comparaison des résultats de l'analyse de variance d'un modèle mixte entre les mesures du densitomètre à rayons X et le résistographe pour interpréter l'effet des différentes variables explicatives sur la masse volumique et la largeur du cerne (Valeur de p pour un seuil de significativité $\alpha = 0,05$; ns : non significatif).....	75

RÉSUMÉ

L'épinette noire (*Picea mariana* Mill. B.S.P.), très répandue dans la forêt boréale, jouit d'une grande importance dans les plans d'aménagement sylvicole. La coupe partielle, une des pratiques sylvicoles les plus recommandées au Québec, assure à la fois la régénération du couvert forestier tout en garantissant un volume de bois marchand de bonne qualité. Afin d'évaluer l'impact de ce traitement sylvicole sur la qualité du bois, la caractérisation des attributs de la qualité du bois est une étape clé. La densité du bois est considérée comme le meilleur indicateur de la qualité du bois. L'estimation de cette propriété, nécessite un grand nombre d'échantillons faisant appel à des techniques fastidieuses et destructives comme l'abattage des arbres ou, dans une mesure moins dommageable, le carottage. Ces techniques présentent un coût élevé et un long processus d'analyses au laboratoire. Le résistographe, un outil non destructif, pourrait être une alternative aux outils conventionnels de mesure de la densité du bois grâce à des mesures instantanées de résistance au perçage converties en densité.

Cette étude vise à évaluer l'impact des coupes partielles sur la croissance et la masse volumique du bois de l'épinette noire à l'échelle des peuplements en se basant sur une comparaison de deux outils de mesure (résistographe et densitomètre à rayons X). Le dispositif expérimental se situe dans la ceinture d'argile de l'Abitibi au nord-ouest du Québec et comprend trois sites. Pour les fins d'analyses des mesures du densitomètre à rayons X (DRX), 10 carottes d'arbres de 4 classes de diamètres (C1 (5,1-9 cm), C2 (9,1-15 cm), C3 (15,1-20 cm) et C4 (>20,1 cm) selon 4 intensités de traitements ont été prélevées (témoin, faible (>0%, <50%), modérée (>50%, <75%) et fort (>75%, <100%). Pour les analyses du résistographe, 60 épinettes noires ont été échantillonnées à partir de deux sites. Dans chaque site, un prélèvement de carottes suivi d'une mesure à l'aide du résistographe ont été effectués pour étudier la variation radiale de la densité et de la largeur des cernes par les deux outils.

Les résultats des mesures au densitomètre à rayons X montrent que la coupe partielle n'a pas d'impact sur la densité du bois de l'épinette noire. Quant au potentiel de l'utilisation du résistographe, les résultats montrent que cet outil est performant pour mesurer les paramètres intra-arbres de la densité du bois. Ceci dit, les mesures de la croissance et de la densité intra-cerne dépendent de plusieurs facteurs liés à l'environnement, à l'opérateur et particulièrement à la largeur des cernes. Pour les

cernes de croissance assez larges, le résistographe permet de déterminer avec précision le point de transition du bois initial au bois final. Par contre, pour les cernes de croissance très étroits et où la transition n'est pas distincte, le résistographe perçoit un faible signal de résistance menant à une perte d'information sur quelques cernes de croissance. Ceci suggère que le résistographe pourrait donner des mesures fiables pour les études sur les arbres à forte croissance et/ou ceux qui répondent bien en terme de croissance suite aux traitements sylvicoles dont les coupes partielles. Par contre, pour les arbres à faible croissance et/ou ceux qui ne répondent pas bien aux traitements, le résistographe ne dispose pas d'une résolution assez fine pour détecter les variations dues aux traitements. Le potentiel du résistographe fut testé pour l'évaluation de l'impact de la coupe partielle sur la qualité du bois de l'épinette noire. Les résultats de comparaison montrent que l'outil de mesure non destructif est capable de fournir l'information à un degré de précision comparable à celui du densitomètre à rayons X conventionnellement utilisé. Ce constat suggère que le résistographe offre une alternative intéressante pour un échantillonnage peu coûteux et moins fastidieux.

Mots clés : Épinette noire, coupe partielle, qualité du bois, résistographe, densitomètre à rayons X, masse volumique, outil non destructif.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

L'économie québécoise repose particulièrement sur les ressources forestières. Ce secteur est l'un des plus importants dans la balance commerciale de la province (MFFP, 2009) et répond à une forte demande en matières ligneuses avec l'utilisation du bois dans diverses applications. Cette pression de consommation en ascension, a poussé les responsables gouvernementaux à instaurer des restrictions au niveau des aires de coupes et des terres allouées à l'exploitation par les industries. La commission Coulombe d'étude sur la gestion des forêts publiques au Québec (CEGFPQ) a évoqué la nécessité d'établir une stratégie sylvicole qui tient compte de l'aménagement forestier durable (AFD). Cette commission insiste sur l'importance de mettre au point des techniques sylvicoles adaptées permettant de répondre à la fois aux exigences de productivité tout en préservant la diversité des espèces forestières (CEGFPQ, 2004). Dans ce contexte, les coupes partielles, représentent une alternative intéressante aux coupes totales permettant la réalisation de ces objectifs de productivité. Ceci dit, en absence de plus amples connaissances, de nombreux forestiers continuent à marginaliser ce type de coupe et demeurent relativement septiques quant à sa rentabilité économique dans les peuplements résineux en forêt boréale en comparaison avec la coupe totale. Il paraît ainsi impératif d'étudier l'effet de la coupe partielle sur la biodiversité et sur les attributs de qualité du bois.

L'effet de divers traitements sylvicoles sur la croissance des tiges résiduelles a déjà été étudié pour différentes espèces appartenant à des peuplements purs et/ou mixtes. Dans la plupart des cas, ces études démontrent qu'une diminution de la densité du peuplement

favorise la croissance des tiges résiduelles (Zhang et Chaurret 2001 ; Alazard 1994 ; Laplante 2009 ; Mayor et Rodà 1993 et Ourais 2012).

Les effets des éclaircies intensives sur les propriétés anatomiques des fibres peuvent également s'avérer néfastes pour la qualité et la valeur des produits du bois (Joza et Middleton 1997 ; Dutilleul et *al.* 1998 ; Mäkinen et *al.* 2002b ; Youngberg et *al.*, 1963) et Posey 1965).

À ce jour, peu d'études portent sur l'effet d'une intervention sur les attributs de qualité du bois dans des peuplements purs d'épinettes noires. La plupart de ces études ont été réalisées sur des peuplements issus de coupes totales ou d'éclaircies commerciales en forêt boréale. Peu d'études documentent l'évolution de ces propriétés suite à des coupes partielles opérées dans des peuplements ayant atteint la maturité commerciale et dans lesquels la densité variait entre 1200 et 1500 tiges/ha. Ce projet a pour but d'évaluer l'effet de la coupe partielle sur des attributs de la qualité du bois de l'épinette noire à l'échelle des peuplements. Les résultats de ce projet serviront comme une référence d'aide à la décision pour juger de la viabilité économique de la coupe partielle en pessière à mousses.

Certes, la préservation de la biodiversité et du patrimoine forestier en forêt boréale est fortement liée aux choix des pratiques sylvicoles, mais elle est également associée aux techniques d'échantillonnage utilisées. En effet, les différentes recherches menées dans le but ultime de proposer des solutions optimales à l'exploitation des forêts, nécessitent la plupart du temps un échantillonnage intensif. Un grand nombre d'échantillons est à l'origine d'un investissement important en termes de moyens, de temps et d'énergie). Dans ce contexte, le recours aux outils de mesure non destructifs est fortement préconisé. Parmi ces outils figure le résistographe dont l'avantage est de permettre un diagnostic rapide de l'arbre sur pieds (Rinn, 1994). Ses performances dans la caractérisation de la qualité du bois a fait l'objet de très peu d'études. De même, son utilisation dans l'étude des effets des traitements sylvicoles est peu documentée. Cette

étude vise à obtenir des informations précieuses pour les forestiers et les industriels. La validation des données du résistographe va permettre un gain de temps et une réduction de coûts considérables dans les travaux de caractérisation du bois (Acuna *et al.*, 2011). Elle offre également un appui dans les programmes d'aménagement forestier comme un outil d'aide à la décision, peu coûteux et dont les performances se compareraient à celles des outils conventionnels comme le densitomètre à rayons X.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 L'épinette noire

2.1.1 Description botanique

L'épinette noire, *Picea mariana*, Mill. B.S.P., est un conifère à longue longévité pouvant vivre de 175 à 200 ans (maximum 250 ans) (Burns et Hankala, 1990). Dans des conditions sans aménagement et dans les bonnes stations, l'épinette noire atteint une hauteur moyenne de 12 à 20 m et un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) d'environ 20 cm. Lorsque les conditions sont défavorables, sa hauteur et son diamètre sont diminués respectivement à 8 m et 13 cm (Viereck et Johnston, 1990). Cet arbre présente un feuillage persistant petit et dressé sous forme d'aiguilles courtes (de 6 à 15 mm) insérées autour du rameau, un tronc pyramidal droit et une cime pointue composée de petites branches compactes et tombantes. La partie supérieure de la cime est souvent très dense et comprend de nombreux cônes mâles petits et cylindriques ainsi que des cônes femelles de forme oblongue ou cylindrique (Lessard et *al.*, 2010). Ses fruits sont de petits cônes rigides, presque ronds ou ovoïdes, font de 2 à 4 cm de long, de couleur rouge foncé à violet lorsqu'ils sont jeunes et deviennent bruns violacés foncés plus tard. Les cônes restent attachés à l'arbre pendant plusieurs années. Les graines sont de couleur brun foncé et ailées faisant environ 2 mm de long. Son système racinaire est étalé et peu profond (environ 20 cm). Elle présente une écorce brun-grisâtre mince (6 à 13 mm). Les écailles sont minces avec des bords dentés et irréguliers (Lessard et *al.*, 2010).

2.1.2 Description et anatomie du bois

Le bois de l'épinette noire présente une couleur claire allant d'un blanc presque parfait à un brun jaunâtre pâle et ne présente ni odeur ni goût caractéristique. Le bois de cœur n'est pas distinct. Son bois varie de modérément léger et tendre à modérément tendre. Les cernes de croissance du bois de l'épinette noire sont marqués par le contraste entre le bois final (fin et foncé) et le bois initial (plus clair et épais). La transition du bois initial au bois final est abrupte, donc bien visible à l'œil nu. Dans un cerne de croissance, la proportion du bois final est moindre que celle du bois initial (Dnenyer et *al.*, 1966).

L'épinette noire est une essence résineuse qui se caractérise par une structure anatomique peu complexe (en comparaison avec les feuillues). Sa structure microscopique est caractérisée par des trachéides orientées longitudinalement (représentent environ 90 % du volume du bois) de longueur et diamètre respectifs de 3 à 4,5 mm et 20 à 40 μm . La longueur des trachéides du bois ainsi que l'épaisseur des parois cellulaires dans le bois final sont supérieures à celles du bois initial (Koran, 1967). Les trachéides ont pour fonction le support mécanique de l'arbre ainsi que la conduction de la sève. Sur le plan radial, on observe des ponctuations se situant à leurs extrémités assurant la connexion inter-trachéides et le passage de la sève. Les ponctuations peuvent être de deux types : picéoïdes au niveau des champs de croisement (2 à 4 par champ de croisement) ou aréolées situées sur la face radiale des trachéides du bois initial (Marguerie et *al.*, 2000).

Le bois de l'épinette noire comprend également de nombreux rayons ligneux et unisériés qui assurent le stockage et la distribution de réserves de nutriments sur le plan radial (Core et *al.*, 1979). On retrouve les canaux résinifères formant de fines lignes sur le plan longitudinal ou inclus dans un rayon appelé rayon fusiforme dans le plan transversal. Les rayons fusiformes sont dispersés, comprenant un à deux canaux

résinifères transversaux et font 16 cellules de haut, ou plus (Panshin et De Zeeuw, 1980).

2.1.3 Importance écologique

L'épinette noire est l'une des cinq essences du genre *Picea* les plus répandues au Canada (Farrar, 1995). Il s'agit d'un conifère abondant dans le nord du continent américain et dominant la forêt boréale à l'est du continent. En effet, les plus grands massifs de pessière à épinette noire se situent en Ontario, au Québec et à Terre-Neuve (Lessard et al., 2010). Le domaine de la pessière noire à mousses est le plus vaste domaine forestier de la province du Québec ayant une superficie totale de 28 % du territoire québécois et forme une bande d'environ 300 km de largeur traversant la province d'ouest en est. Au nord, on peut localiser la ceinture de pessière à épinette noire et lichens limitée un peu plus au nord par la toundra forestière caractérisée par la présence de petites épinettes toutes rabougries et très éparées (Lessard et al., 2010).

L'épinette noire est l'espèce la plus utilisée pour le reboisement à l'Est du Canada (> 10 000 ha /an) malgré un rendement annuel moyen faible en considérant des stations de qualité moyenne (4,1 m³/ha/an). L'épinette noire se distingue des autres essences par son accommodation à une grande diversité de stations, tolère plusieurs types de sol et pousse à l'ombre. Son habitat est généralement mal drainé au sud de son territoire, que ce soit dans les peuplements purs ou mixtes. Au nord, elle pousse d'habitude sur des sols humides et organiques dans de grands peuplements purs ou dans des peuplements mixtes (Little, 1979). Comparée à d'autres espèces résineuse, l'épinette noire présente la meilleure croissance sur les sols fertiles, de textures fine à moyennes et qui sont bien à modérément drainés (Gagnon et Morin, 2001).

L'épinette noire est présente sous forme de peuplements purs mais peut également s'associer à d'autres espèces dont principalement : le pin gris (*Pinus banksiana*), l'épinette blanche (*Picea glauca*), le sapin baumier (*Abies balsamea*), le peuplier faux-

tremble (*Populus tremuloides*), le bouleau à papier (*Betula papyrifera*) et le mélèze laricin (*Larix laricina*) (Zhang et Koubaa, 2009). Cette essence est sensible à un insecte destructeur des peuplements de conifères de l'Amérique du Nord appelé la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*). Cette essence peut être affectée également par des agents de rouilles des aiguilles ainsi que des champignons causant une défoliation et une réduction de sa vigueur (Viereck et Johnston, 1990).

2.1.4 Importance économique

Au Canada, le bois de l'épinette est principalement prisé par les industries de pâtes et papiers et les industries de sciage (le bois d'œuvre) (Burns et Hankala, 1990) pour la qualité de sa fibre qui lui confère une résistance aux insectes et aux maladies (Beaulieu et al., 1989). De nos jours, les applications du bois de l'épinette noire sont de plus en plus diverses. En effet, on le retrouve dans le domaine de la construction ainsi que la fabrication de produits à valeur ajoutée (Alteyrac, 2005).

En raison de sa grande valeur économique et d'un volume de bois chiffré à 1,084 milliard de m³ solide (Lessard et al., 2010), l'épinette noire figure dans de nombreux programmes d'amélioration génétique tenant compte de diverses caractéristiques telles que sa forme, sa croissance et sa capacité d'adaptation aux sites.

2.2 Traitements sylvicoles

La sylviculture a pour fonctions fondamentales la régénération, l'éducation ou la récolte du peuplement. Pour assurer la cohérence des interventions, ces dernières sont organisées en systèmes sylvicoles, qui traditionnellement sont définis en fonction de la méthode de récolte et de la régénération. Les systèmes sylvicoles de la coupe totale et de la plantation, des coupes progressives et du jardinage sont parmi les systèmes les plus répandus. Un scénario sylvicole comporte une ou plusieurs interventions, ordonnées de manière logique dans le temps en fonction du développement du peuplement. Le choix du système sylvicole se fait en fonction des caractéristiques

écologiques des peuplements et en fonction des objectifs d'aménagement et des contraintes opérationnelles (Lussier, 2015).

En forêt boréale, le cycle de feu joue un rôle important dans la dynamique et la structure des peuplements forestiers. Lorsque les cycles de feux sont longs, les forêts ayant survécus aux perturbations sévères subissent un vieillissement de leur structure d'où la formation de trouées jouant en faveur de l'épinette noire par la création de structures irrégulières. Un aménagement écosystémique adapté à des forêts ayant de telles caractéristiques, devrait se baser sur une sylviculture s'inspirant des perturbations naturelles (Bergeron et Harvey, 1997) et dont les interventions se situent dans les limites de la variation naturelle des écosystèmes (Hunter, 1990) tout en visant une meilleure production en volume de bois. Dans ce contexte, la coupe partielle semble être en adéquation avec les objectifs de maintien de la structure irrégulière des vieilles forêts.

Autrefois, l'exploitation des forêts boréale reposait essentiellement sur la pratique de la coupe totale (Conseil Canadien des Ministres des Forêts, 2002) qui fut interdite au Québec depuis le début des années 1990 (Manuel de foresterie, 2003) et s'est vue substituée par la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS). Cette coupe est la plus utilisée en forêt boréale québécoise (Groot et *al.*, 2005) et s'adapte aux peuplements purs de sapins contrôlés naturellement par des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) (Bélanger, 1993; Bergeron et *al.*, 1999). Elle consiste en une récolte totale des tiges marchandes dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à 1,3 m du sol) est supérieur à 9,0 cm. Elle reproduit certains éléments associés au passage de feux de forêt, en particulier ceux associés à l'élimination du couvert forestier, mais diverge pour certains autres comme le maintien de l'humus et de la strate arbustive et la plus faible abondance de chicots (Bergeron et *al.*, 1999; Ruel et *al.*, 2007). La CPRS permettrait une exploitation forestière qui s'assure de protéger la régénération préétablie et minimise les

perturbations du sol. Néanmoins, la quantité de bois récoltée par l'application d'une CPRS ne suffit pas à combler les besoins des industries qui se voient de plus en plus restreints quant à l'exploitation des forêts destinées à la production de fibres de bois (Coulombe et *al.*, 2004). De plus, cette pratique sylvicole cause la récolte d'un bon nombre de tiges, qui bien qu'elles aient une valeur commerciale, pourraient bénéficier d'une croissance plus importante si elles sont épargnées de la coupe et ceci sous l'effet d'un dégagement de la cime et donc une diminution de la compétitivité des tiges résiduelles. D'où le recours à des coupes partielles qui permettraient de concilier à la fois les objectifs de maintien du couvert forestier et la récolte de la matière ligneuse tenant compte de la quantité et la qualité de la fraction résiduelle du bois conservée sur pied qui s'accroît sous l'effet d'une diminution de la compétition entre les individus rémanents du peuplement. Il existe plusieurs types de coupes partielles telles que les éclaircies (commerciales et pré-commerciales), la coupe de jardinage, la coupe progressive (irrégulière et régulière) et la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM). Cette dernière, est expérimentée au Québec depuis 1997 et s'applique à certaines forêts à dominance résineuse où la structure diamétrale est irrégulière. Sa modalité de récolte repose principalement sur le DHP des tiges à préserver (Riopel et *al.*, 2010). La récolte concerne 70 et 90 % du volume marchand néanmoins, les tiges ayant un DHP 1,1 à 9,0 cm ainsi que celles de DHP 9,1 à 15,0 cm sont protégées et continuent à se développer et former la strate dominante du nouveau peuplement qui serait récolté sur une période de révolution raccourcie (Ministère des ressources naturelles, de la faune et des parcs du Québec, 2003).

Le recours aux coupes partielles est conditionné par plusieurs paramètres notamment son impact à long terme, l'adaptabilité et la productivité optimale du peuplement en réponse à un type de coupe donné ainsi que le temps optimal d'intervention en relation avec l'âge du peuplement. Comme celles-ci sont peu pratiquées en forêt boréale, la dynamique des peuplements traités par coupe partielle est encore méconnue, notamment au niveau de la qualité du bois des tiges résiduelles protégées.

2.3 Qualité du bois de l'épinette noire

2.3.1 Notion de qualité du bois

La qualité du bois est une notion définie dépendamment du service ou domaine d'application du bois. Qu'il s'agisse de forestiers, de manufacturiers ou de consommateurs des produits de bois, un bois de qualité devrait être en mesure de satisfaire les exigences liées à l'utilisation à laquelle il est destiné (Briggs et Smith, 1986). Certaines propriétés du bois peuvent être plus recherchées pour une application finale donnée que d'autres propriétés relativement facultatives (Dickson et Walker, 1997). Ainsi, Zhang (1997) considère que la qualité du bois consiste en toutes les caractéristiques et les propriétés du bois qui affectent la valeur de la filière et la durabilité des produits. La qualité du bois est sous l'influence d'un ensemble de facteurs écologiques, environnementaux et génétiques qui conditionnent l'expression d'indicatifs intrinsèques et extrinsèques (Zobel et Van Buijtenen, 1989).

2.3.2 Les attributs de la qualité du bois étudiés

Certaines caractéristiques du bois constituent une base pour renseigner sur son application future. Elles peuvent être reliées à la génétique de l'espèce mais aussi tributaires du choix du traitement sylvicole. L'anatomie et la composition chimique sont des critères indispensables pour déterminer la structure du matériau et par conséquent définir la qualité d'un bois (Dickson et Walker, 1997).

Chez l'épinette noire, la densité de bois, déterminée par le rapport entre la masse volumique du bois et la masse volumique de l'eau (1 g/cm^3), est considérée comme un critère déterminant de sa qualité car elle influence les propriétés mécaniques du bois (Barbour et *al.*, 1996) et le rendement en fibres (Zhang, 1997). La longueur des trachéides ainsi que l'épaisseur des parois sont des critères importants car ils influencent le procédé de fabrication des pâtes et papiers (Law et Valade, 1997).

2.3.2.1 Masse volumique

La masse volumique est un paramètre déterminant de la qualité du bois (Jyske, 2008 ; Koubaa et *al.*, 2002) par lequel s'exprime ses caractéristiques physiques (stabilité dimensionnelle, durabilité, imprégnabilité) et mécaniques (rigidité, résistance) (Jozsa et Middleton, 1997; Zobel et Van Buijtenen, 1989). La masse volumique du bois est une variable dépendante de plusieurs facteurs, à savoir l'âge (Erickson et Harrison 1974 ; Haygreen et *al.*, 2007 et DeBell et *al.*, 2002), l'espèce, les conditions de croissance, le type de bois, la position sur le plan longitudinal et la teneur en humidité du bois (Panshin et De Zeeuw 1980; Hacke et *al.*, 2001; Roderick et Berry, 2001; Gartner, 2006 et Swenson et Enquist, 2007).

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

À l'état vert, l'épinette a une masse volumique de 762 kg/m^3 et une masse volumique basale moyenne de 406 kg/m^3 (Jessome, 2000 et Barbour et *al.*, 1996). Les masses volumiques du bois de cœur (430 kg/m^3) et de l'aubier (438 kg/m^3) de l'épinette noire ne sont pas statistiquement différentes (Hernández et Lessard, 1997). Au niveau d'un cerne de croissance, la masse volumique est proportionnelle à l'épaisseur de la paroi cellulaire des cellules du bois final. En effet, à une teneur en humidité de 12%, la masse volumique est plus élevée dans le bois final ayant des parois plus épaisses (569 à 623 kg/m^3) que dans le bois initial (375 à 396 kg/m^3) à parois cellulaires minces (Koubaa et *al.*, 2000 et Zhang et *al.*, 1996). Ainsi, l'augmentation de la proportion du bois final entraîne une augmentation de la masse volumique intracernes (De Kort et *al.*, 1991).

2.3.2.2 Propriétés des fibres

Les trachéides sont des cellules qui constituent presque la totalité de la masse du bois résineux. Elles ont pour rôle la conduction de l'eau et des éléments nutritifs mais aussi confèrent au bois ses propriétés de résistance (Haygreen et *al.*, 2007). La fibre de bois se caractérise par plusieurs paramètres à savoir la longueur, l'épaisseur et le diamètre. La longueur des trachéides est un indicateur important de la qualité du bois (Burns et Honkala, 1990) puisque les fibres longues permettent de produire du papier de meilleure qualité et confèrent une plus grande résistance aux déformations des poutres en bois (Mäkinen et al, 2002a). La longueur des trachéides varie chez les conifères selon le type de bois. En effet, les trachéides du bois juvénile sont plus courtes et leur longueur augmente progressivement en allant de la moelle vers l'écorce (Mäkinen et *al.*, 2008). Durant les premières années de la croissance radiale, la longueur et le diamètre des fibres manifestent un accroissement rapide et non linéaire qui tend à être graduel lors du passage au bois mature et ce jusqu'à atteindre une taille maximale (Mvolo et *al.*, 2015; Zhang et Koubaa, 2009).

2.3.3 Effets des coupes partielles sur la qualité du bois

Les interventions sylvicoles permettent de diminuer la densité d'un peuplement offrant un meilleur accès à la lumière (Sheedy et Bertrand, 1997) et de rendre les ressources naturelles plus disponibles en faveur des individus rémanents (Aussenac et *al.*, 1995). L'amélioration des conditions de croissances induisent une augmentation de la croissance et de la productivité des arbres. L'augmentation de la croissance provoque des changements notables sur les propriétés anatomiques des arbres. En effet, une diminution de la densité du peuplement induit une augmentation des caractéristiques extrinsèques (diamètre du tronc, taille du houppier et diamètres des branches) (Zhang et Chauret, 2001), mais aussi peuvent affecter des caractéristiques intrinsèques (longueur, épaisseur et diamètre des fibres et des vaisseaux) (Kang et *al.*, 2004). Ces variations peuvent s'avérer négatives (Alteyrac et *al.*, 2005) et affectent les propriétés

de la fibre (Jaakkola et *al.*, 2005a), la masse volumique du bois (Mäkinen et *al.*, 2002a; Zhang et Chauret, 2001; Johansson, 1993) et le diamètre des nœuds (Mäkinen et Hein, 2006) et par conséquent pourraient affecter négativement les propriétés mécaniques et la qualité de la pâte à papier (Barbour et *al.*, 1994).

Le recours aux coupes partielles tient compte de la composition du peuplement en raison de la dominance de certains types de peuplements par rapport à d'autres mais également de l'intensité de coupe optimale qui permet d'augmenter la croissance sans engendrer des effets néfastes sur les attributs de qualité du bois (Bourgeois et *al.*, 2004).

2.3.3.1 Effet sur la croissance radiale

Plusieurs études ont essayé de quantifier la croissance chez différents peuplements issus d'une intervention sylvicole. Il a été mis en évidence que la magnitude de croissance diffère dépendamment de l'espèce, de l'âge cambial (Mvolo, 2015), du type et de l'intensité du traitement (Barbour et *al.*, 1991). En effet, une étude menée par Montaña (2013), visant à déterminer la réaction de la régénération préétablie du sapin baumier et d'épinette noire à la coupe avec protection de la régénération des sols en forêts boréales irrégulières, a mis en évidence que la quantité de luminosité disponible était en lien étroit avec l'intensité du prélèvement équivalent à une moyenne de $63,7\% \pm 5,04$ chez l'épinette noire. Les mesures de la croissance diamétrale (5 ans après coupe) ont permis de constater que les croissances cumulées les plus importantes de l'épinette noire après la coupe ont été observées avec la coupe CPRS (en comparaison avec la CPPTM et la coupe de jardinage).

Dans une étude visant à étudier le taux d'accroissement radial chez l'épinette rouge 15 ans après l'installation d'un dispositif d'éclaircie commerciale (Barbour et *al.*, 1991), la croissance radiale a été significativement plus importante dans les parcelles traitées en comparaison avec les témoins et ce à différentes hauteurs de l'arbre.

Au Nouveau Brunswick, une étude a été menée par Zhang et Koubaa en 2009 visant à évaluer l'impact de différentes intensités d'éclaircie pré-commerciale sur un peuplement naturel de pin gris. Sur un terme de 34 années, il a été constaté que, plus l'intensité de l'éclaircie n'augmente plus la largeur de la cime, le diamètre des branches, le défilement du tronc et la croissance du pin gris augmentent (Zhang et al., 2006). Cette tendance s'est avérée inversement proportionnelle quand il s'agit de certaines propriétés mécaniques mesurées (module d'élasticité et module de rupture). Quant au volume marchand du bois, les plus hautes valeurs ont été observées dans les peuplements témoins et ceux issus de la plus forte intensité d'éclaircie (2,1 m x 2,1 m). Ceci suggère que le choix entre un plus haut volume de bois marchand et celui d'un bois de sciage de qualité conditionne l'intensité d'éclaircie à opérer.

Plusieurs auteurs ont étudié l'impact de différentes intensités de coupes partielles sur des espèces telles que le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* (L.)) (Peltola et al., 2002), l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.) (Pape, 1999), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) (Schneider et al., 2008), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) (Raulier et al., 2003; Bourgeois et al., 2004) et sur des peuplements mixtes de sapin baumier avec l'épinette noire (Liu et al., 2007a). Ces études démontrent que la croissance des tiges résiduelles augmente avec la réduction de la densité du peuplement. En effet, des peuplements purs d'épinettes noires ont une croissance d'autant plus faible et une densité du bois et des propriétés mécaniques plus élevées lorsque la densité des tiges est plus grande (Alteyrac, 2005; Larocque et Marshall, 1995). De même, l'éclaircie des peuplements naturels accélère la croissance mais diminue la densité et les propriétés mécaniques du bois de l'épinette (Zhang, 1997). Bien que l'étude de Vincent (2010) confirme cette augmentation sous réserve de tenir compte des caractéristiques des arbres résiduels et de leurs compétiteurs, il a été mis en évidence que l'éclaircie commerciale n'entraîne aucune variation significative du module d'élasticité (MOE) et de la densité.

La croissance des tiges résiduelles de l'épinette noire est également influencée en partie par le diamètre initial des tiges avant coupe (Hernández et Bégin, 2008). En effet, suite à une Coupe avec Protection des Petites Tiges Marchandes, les résultats obtenus au bout de deux années montrent que les plus petites tiges s'adaptent mieux au nouvel environnement généré par la coupe que les plus grosses. L'accroissement initial diminue considérablement avec l'augmentation du diamètre initial.

L'éclaircie commerciale (Bowyer et *al.*, 2007) et pré-commerciale (Legris et Couture, 1999) pourraient induire des effets négatifs sur l'augmentation du nombre et de la taille des nœuds. Or, comme il a été évoqué dans la partie 2.3.1., la qualité du bois est conditionnée en autres par la proportion du bois juvénile, le défilement de la tige ainsi que par le nombre et la taille des nœuds. À l'échelle de l'arbre, les fortes éclaircies peuvent affecter la forme de la tige en augmentant le défilement (Barbour et *al.*, 1994). Cela dit, dans une étude menée par Manon Vincent (2009), l'augmentation de la croissance radiale de chez l'épinette noire suite à une éclaircie commerciale dépend des caractéristiques des arbres résiduels et de leurs compétiteurs. Cette augmentation n'entraîne pas de variation significative de la forme ou du défilement de la tige et n'affecte pas le MOE et de la densité du bois. Afin de maximiser le volume du bois exploité, les usines de sciage recherchent un bois résineux de fort diamètre, présentant un faible défilement et dont la forme est plus cylindrique que conique (Jozsa et Middleton, 1997).

2.3.3.2 Effet sur la masse volumique

L'importance de la masse volumique en tant que paramètre physique indicatif de la qualité du bois a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs dont les constats et les conclusions divergent sur la significativité de l'impact des traitements sylvicoles sur la densité du bois. Un effet négatif à court terme de l'éclaircie commerciale sur la densité du bois du sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) a été vérifié par Jozsa et

Brix (1989). Cet effet a été appuyé dans des études sur le pin gris (Barbour et al., 1994 ; Kasraoui, 2011), l'épinette noire (Zhang et Chauret, 2001) et le pin de Monterey (*Pinus radiata* D.) (Cown, 1980). Dans ce même sens, les travaux de Yang et Hazenberg (1994) et Koubaa et Zhang (1998) portant sur l'impact de l'espacement initial chez l'épinette et de l'éclaircie pré-commerciale chez le sapin baumier ont démontré que la masse volumique relative du bois diminuait avec l'augmentation de l'espacement entre les tiges. Cependant, les travaux de l'éclaircie pré-commerciale n'a pas eu d'effet notable sur la densité du bois de sciage mais a entraîné un effet négatif sur la résistance du bois et sur la densité basale du bois au niveau de la souche.

Dans le cas des éclaircies commerciales sur le pin gris, les travaux de Barbour et al. (1994) et de Schneider et al. (2005) ont appuyé la thèse que les arbres en provenance des milieux éclaircis produisent du bois ayant une faible masse volumique que les arbres du milieu naturel pendant les quelques années qui suivent le traitement et en fonction des espacements. La diminution de la densité du bois est en étroite corrélation avec la densité de peuplement. Selon Zhang et Chauret (2001), ce paramètre est affecté à partir d'une densité inférieure à 1 400 tiges/ha.

Dans une autre étude portant sur l'effet de l'éclaircie commerciale sur la densité du bois de l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) H. Karst) (Jaakkola et al., 2005a), les résultats montrent une diminution de la densité moyenne du cerne. Cette diminution est attribuée en totalité à la diminution de la densité au niveau du bois final (diminution non significative au niveau du bois initial). Cette même essence a fait l'objet d'une étude visant à mettre en évidence les relations entre la densité du bois et le statut social de l'arbre. Les résultats révèlent que les arbres appartenant à la classe co-dominante et dominante se caractérisent par une densité moindre que les arbres de la classe des supprimés et intermédiaires (Duchesne et al., 1997). Ceci suggère que, pour une meilleure rentabilité des traitements d'éclaircies, les arbres de grand DHP devraient également être récoltés (Duchesne et al., 1997).

Les travaux de Larson (1969) et Mäkinen et *al.* (2007) confirment bien ces résultats. Alors que les études menées par Valinger et *al.* (2000) et Mörling (2001) affirment que l'augmentation de la croissance radiale suite à une éclaircie n'induit pas une diminution significative de la densité du bois. Dans ce même sens, Barbour et *al.* (1992) et Duchesne et *al.*, 2013 affirment qu'une éclaircie pré-commerciale n'affecte pas respectivement la qualité du bois de l'épinette rouge (*Picea rubens*) et celle du bois de sciage du sapin

D'autres études menées sur le pin à encens (*Pinus taeda* L.) au sud des États-Unis (Tasissa et Burkhart, 1998) n'ont relevé aucun effet de l'espacement sur la masse volumique relative du bois et aucune différence significative entre les peuplements éclaircis et ceux qui ne le sont pas. L'impact de l'éclaircie commerciale sur la croissance des arbres et les propriétés du bois a été étudié sur un peuplement de pin gris (Duchesne et Swift, 2008). Les résultats ont mis en évidence qu'à long terme, un grand espacement exprimé par une intensité d'éclaircie de 50% de la surface terrière induisait un effet positif sur le volume des arbres, la qualité visuelle et le rendement en sciages. Cependant, la densité et les propriétés de flexion statique des sciages provenant des arbres de fort diamètre (super-dominants) ont été négativement affectées.

Enfin, chez certaines essences du Sud, certains cas rapportés ont même démontré que la masse volumique relative du bois pouvait augmenter avec l'espacement entre les tiges (Paul, 1957), ce qui fut rapporté également dans un travail de recherche mené récemment sur l'épinette noire dans lequel il y aurait une augmentation non significative de la masse volumique chez les arbres de moins de 35 ans notée sur les cinq cernes de croissance qui suivent l'année de coupe (Braido Dos Santos, 2014).

2.3.3.3 Effet sur les propriétés des fibres et l'épaisseur des parois

Les caractéristiques morphologiques de la fibre du bois (longueur, diamètre et angles des micro-fibrilles) conditionnent ses propriétés mécaniques et par conséquent son

aptitude à la transformation en produit de qualité. En effet, les fibres longues de l'épinette noire sont recherchées pour la fabrication de papiers résistants et de bonne qualité (Vahey et *al.* 2007). Une intervention sylvicole a pour but d'augmenter le taux de croissance des arbres. Cette augmentation est attribuée principalement à l'augmentation de la largeur du bois initial (Zhang, 1998 ; Wang et *al.*, 2002) au dépend de la largeur du bois final ce qui serait à l'origine d'une baisse de la masse volumique moyenne des cernes. Plusieurs études se sont intéressées à l'effet de l'augmentation de la croissance sur les caractéristiques des fibres. Selon Dutilleul et *al.* (1998), il y a une augmentation de l'aire du lumen et par conséquent une diminution de l'épaisseur des parois cellulaires (Mäkinen et *al.*, 2002b; Jaakkola et *al.*, 2005b). L'épaisseur des parois cellulaires des fibres est un critère essentiel de la qualité du papier qui lui confère sa résistance (Karlsson, 2006).

L'impact des coupes partielles sur la morphologie des trachéides suscite beaucoup de controverse. L'étude de la relation entre la longueur moyenne des trachéides et le taux de croissance radiale conclue généralement en l'absence de corrélation ou des corrélations négatives mais rarement à des corrélations positives (Dutilleul et *al.*, 1998). Cependant, il n'existe pas de règle stipulant que plus la croissance est rapide plus les fibres sont courtes (Jaakkola et *al.*, 2005a).

Les travaux de Yang et Hazenberg (1994) ont étudié l'effet de l'espacement initial sur la longueur des trachéides de l'épinette noire issues de plantations et affirment que les peuplements naturels semblent donner des trachéides plus longues et de meilleure qualité que les peuplements aménagés. Les travaux de Fleming (2005) viennent soutenir cette hypothèse.

Selon Greyer et Gilmore (1965) les trachéides dans le bois juvénile et le bois mature deviennent plus longues avec l'augmentation de l'espacement chez le pin à l'encens (*Pinus taeda* (L.)) tandis qu'elles deviennent plus courtes avec l'élargissement de la

croissance des cernes dans le cas du pin d'Elliott (*Pinus elliottii* (Engelm.)) (Youngberg et al., 1963) et du pin à l'encens (Posey, 1965). Dans d'autres études menées sur le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* (L.)) (Grigal et Sucoff, 1966) et l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.)) (Ward et Gardiner, 1976) à différentes intensités d'éclaircie, la variation de la longueur des trachéides est non significative.

En Finlande, les travaux de Jaakkola et al. (2005 a) ont permis de constater une très faible incidence de différentes intensités d'éclaircies sur les dimensions des fibres de l'épinette de Norvège. Pour cette même espèce, l'étude de Dutilleul et al, 1998a montrée que la longueur des fibres diminue avec l'augmentation de la largeur des fibres tandis que les travaux de Barbour et al. (1992) ont montré que la longueur des fibres n'avait pas de corrélation avec la largeur des cernes, la densité du bois et le pourcentage de bois final. Dans ce même sens, les recherches menées par Pamerleau-Couture (2011) sur la réponse de l'épinette noire à trois types d'interventions sylvicoles (EC, CPPTM et CPRS) concluent que les propriétés anatomiques de la fibre ne montrent pas de modifications post traitement aussi bien pour le bois initial que pour le bois final. Le Tableau ci-dessous (Tableau 2.1), résume les principaux travaux en lien avec l'impact des traitements sylvicoles les plus utilisés sur la qualité du bois de diverses essences.

Tableau 2. 1 Synthèse des effets de quelques traitements sylvicoles sur la qualité du bois

Traitement sylvicole	Espèce	Effets sur les attributs de qualité du bois	Nombre d'années (depuis traitement)	Références
CPRS	Épinette noire	Augmentation significative de la croissance radiale	5	Montaño, 2013
Éclaircie commerciale-coupe partielle	Épinette noire ; Pin gris ; Sapin	Augmentation significative de l'accroissement du diamètre à hauteur de poitrine	5	Tremblay et Laflèche, 2012
Éclaircie commerciale	Épinette du Norvège	Augmentation significative de la croissance radiale Diminution de la densité moyenne du cerne et de la longueur moyenne des fibres.	15	Dutilleul et <i>al.</i> , 1998; Jaakola et <i>al.</i> , 2005a
Éclaircie commerciale	Sapin douglas	Effet intermédiaire sur la densité ; effet négatif à court terme Augmentation de la croissance en diamètre	13	Jozsa et Brix, 1989
Éclaircie commerciale	Pin gris	Diminution importante et continue de la densité du bois	38	Barbour et <i>al.</i> , 1994; Duchesne et Swift, 2008
Éclaircie commerciale		Pas d'effet significatif sur la densité		Hunt, 1977
Éclaircie commerciale (+fertilisation)	Pin sylvestre	Augmentation de la croissance radiale sans induire une diminution significative de la densité du bois	12	Valinger et <i>al.</i> , 2000; Morling, 2002
Éclaircie commerciale		Augmentation de la largeur du cerne ce qui cause une légère diminution de la densité relative (pas d'effet direct sur la densité)		Schneider et <i>al.</i> , 2005
Éclaircie pré-commerciale	Épinette rouge	Taux d'accroissement significativement important Aucune différence significative de la densité relative et pas d'impact sur les propriétés des fibres	15	Barbour et <i>al.</i> , 1992
Espacement initial	Épinette noire Épinette blanche	Diminution de la densité relative et la longueur des trachéides Densité plus importante pour un espacement plus petit. Il existe un espacement intermédiaire pour lequel les fibres sont les plus longues	38	Yang et Hazenberg, 1994 Duchesne et Tanguay, 2011
Éclaircie pré-commerciale	Sapin baumier	La masse volumique relative du bois diminue avec l'augmentation de l'espacement entre les tiges		Koubaa et Zhang, 1998

2.3.4 Autres facteurs influençant la qualité du bois

La qualité du bois est aussi conditionnée par les propriétés génétiques de l'espèce qui s'expriment au sein d'un peuplement par ses différentes caractéristiques phénotypiques (couleur du bois, forme du houppier, taille des branches, présence de nœuds) ainsi que l'âge cambial moyen d'un peuplement (Jack et Long, 1996). Les caractéristiques du site sont également un facteur important permettant de prédire la qualité du bois en fonction de plusieurs paramètres climatologiques et édaphiques (composition et texture du sol, historique des feux, topographie, hydrologie des sols) (Burdon et *al.*, 2004).

2.3.4.1 Facteurs génétiques

Despôts et Simon (1987) ont étudié la variabilité génétique de populations d'épinettes noires appartenant à une large gamme de classes d'âges dans la zone hémisphérique arctique du nouveau Québec. Leur travail montre que l'épinette noire possède une très grande variabilité génétique dans ce milieu. Cette variabilité est plus élevée pour les populations méridionales de cette même espèce particulièrement chez les populations nordiques. L'épinette noire couvre de vastes superficies continues du continent nord-américain et possède une importante capacité d'adaptation à plusieurs types de milieux (Despôts et Simon, 1987). De plus, son potentiel de reproduction végétative peut procurer aux individus une longévité considérable ce qui constitue un facteur de conservation du bagage génétique (Despôts et Simon, 1987).

La masse volumique, étant un des attributs de qualité les plus étudiés, est un caractère modérément ou fortement contrôlé génétiquement (Corriveau et *al.*, 1991). En effet, une étude a été menée par Zhang et Jiang (1998) se basant sur des arbres d'épinettes noires issus de 40 sous-familles échantillonnés à partir de la famille du Nouveau-Brunswick. Les résultats ont montré que parmi diverses sources de variabilité inter-arbres, les caractéristiques de la densité du bois (à savoir la densité moyenne du cerne, du bois initial et du bois final de l'arbre) étaient dues à la famille et sont donc fortement

contrôlées génétiquement. Ceci s'applique, dans une moindre mesure, aux caractéristiques de la largeur du cerne à l'échelle de l'arbre avec une faible héritabilité. Le facteur Bloc et le facteur d'interaction (bloc \times famille) contribuent peu à la variabilité totale entre les arbres rencontrés dans 40 sous-familles, alors que la variabilité d'arbre en arbre au sein d'une même famille représente pour plus de $\frac{3}{4}$ de la variabilité inter-arbres totale.

2.3.4.2 Facteurs écologiques

Selon Polge (1973), l'influence des facteurs écologiques sur la qualité du bois peuvent parfois primer sur les facteurs génétiques. Cet auteur soutient que le bois d'un résineux en provenance des forêts nordiques diffère de celui poussant en climat tempéré de la même espèce. En effet, la très courte durée de la saison de végétation et le régime photopériodique très particulier (jours longs pendant la période de croissance) fait que les bois du Nord se caractérisent par des accroissements très fins et très réguliers, un bois final extrêmement mince et de fibres à cavités cellulaires relativement larges. Ce type de bois (bois d'été) présente une faible densité générant une baisse de la résistance mécanique.

Dans ce même sens, une étude menée par Cregg *et al.* (1988) sur l'impact des facteurs climatiques et la modification de la densité du peuplement suite à une éclaircie sur la croissance et la qualité du bois du pin à l'encens (*Pinus taeda L.*) a montré que les modifications des propriétés du bois à savoir la proportion du bois final, la transition bois final/bois initial ainsi que la croissance (en diamètre et en surface terrière) étaient plus influencées par les variations climatiques que par les traitements d'éclaircie. Tôt en été, la croissance était reliée positivement à la température journalière moyenne, alors que plus tard durant l'été, la croissance était reliée négativement à la température journalière moyenne, ce qui traduisait l'effet du stress provoqué par les hautes températures durant l'été d'où une relation négative entre la température journalière moyenne et la croissance des arbres. La pluviométrie agit également sur la proportion

du bois final qui augmente avec de fortes pluies. La date d'initiation du bois final est également significativement reliée à l'humidité du sol et aux besoins en évapotranspiration.

D'autres effets de station ont été mis en évidence grâce à une expérience menée par Parsa (1970) visant à comparer l'impact d'une même intervention sylvicole effectuée dans trois stations. Il s'agit de plantations d'Hêtre d'Orient (*Fagus orientalis*) situées sur un même type de sol (sol brun forestier acide à structure argilo-limoneuse caractérisé par une capacité d'échange élevée et une forte teneur en humus). Les résultats de cette étude montrent que la principale source de variation était l'altitude qui variait de 750 à 1 000, puis à 1 250 mètres. Dans le cas de l'espèce étudiée, une bonne qualité du bois s'exprime par une bonne homogénéité et une faible densité du bois. Les résultats indiquent des différences significatives globales pour toutes les caractéristiques étudiées : largeur des accroissements, pourcentage du bois de densité égale ou supérieure à 600 kg/m^3 , densités maximales et minimales annuelles et hétérogénéité ; toutes ces caractéristiques diminuent au fur et à mesure que l'altitude s'élève. D'où la conclusion de l'existence d'un effet d'altitude très net qui fait que la qualité du bois augmente avec l'élévation. L'augmentation de l'évapotranspiration avec l'altitude, surtout en été, sous l'effet conjugué d'une diminution de la tension de vapeur d'eau dans l'atmosphère et une violence accrue des vents peut expliquer la production d'un bois final riche en petits vaisseaux.

Une autre étude a été menée dans le but d'étudier l'anatomie du bois de l'épinette noire le long d'un gradient latitudinal en forêt boréale continue (St Germain, 2007). Les résultats suggèrent que la largeur de cerne (bois initial et final) et le diamètre radial diminuent avec l'augmentation de la latitude. Cette tendance serait due à l'adaptation des arbres aux conditions environnementales le long du gradient étudié. De même, Rossi et al. (2015) ont trouvé une densité de bois et des propriétés mécaniques plus élevées pour des sites situés à des latitudes et des altitudes plus basses.

Cette hypothèse a été également testée par Khalil (1985). Son étude portait sur les caractères génétiques du bois de l'épinette noire. Les arbres représentent la principale source de variation des caractères génétiques. La tendance de variation dépend du caractère. La densité obéit à des faibles tendances dans l'axe nord-sud. Les résultats de l'analyse ont démontré qu'il existe une influence de la longitude et de l'altitude sur la densité du bois chez l'épinette noire. À ces facteurs environnementaux s'ajoutent la pluviosité et la température comme des paramètres non génotypiques influençant fortement certains critères de qualité du bois à savoir la masse volumique et la largeur moyenne des cernes.

Nepveu (1990) évoque également des effets évidents de la station sur les propriétés du bois du chêne. Ces effets ont déjà été mis en évidence par plusieurs auteurs dont Becker (1979) et Dupouey (1983). Il est probable que, comme pour la sylviculture, une grande partie de ces différences s'explique par l'influence de la station sur la vitesse de croissance et l'âge d'exploitabilité. Ces tiges seront vigoureuses et caractérisées par des cernes de largeur importante.

2.4 Utilisation des outils non-destructifs dans la caractérisation de la densité du bois des arbres sur pied

La caractérisation de la densité du bois s'est basée principalement sur une analyse au laboratoire d'échantillons extraits à partir des arbres sur pieds. La technique d'échantillonnage traditionnellement utilisée est la sonde de Pressler (Wiemann et Williamson, 2013). Son principe repose sur l'introduction d'une tige à travers l'écorce atteignant le cœur. L'extraction d'une carotte de bois donne l'information sur tout le profil radial de l'arbre. L'échantillonnage par carottage est considéré comme une technique relativement non-destructive. En effet, en comparaison avec l'abattage des arbres et le prélèvement de rondelles de bois, le prélèvement de carottes semble être moins dommageable. Cependant, le diamètre de perçage de la sonde (allant jusqu'à 12 cm) rend l'arbre vulnérable et augmente ainsi les risques d'attaque de champignons.

Mise à part une étape d'échantillonnage fastidieuse exigeant un haut niveau de précision, l'analyse des échantillons au laboratoire nécessite un long processus de préparation (découpage, extraction, séchage, etc.) afin d'aboutir sur l'extraction des données de densité (Eberhardt et Samuelson, 2015). Dans ce contexte, plusieurs outils d'échantillonnage ont été utilisés pour contourner ces limites comme le tensiomètre et le pilodyn. Quelques travaux de recherche ont été conduits sur ces outils de mesure et ont révélés que leur fiabilité à mesurer la densité du bois est dépendante de plusieurs facteurs allant à l'encontre d'une précision pouvant concurrencer avec le densitomètre à rayons X (Gao et *al.*, 2017).

Dans ce travail, le choix a été porté sur le résistographe comme outil permettant d'effectuer un diagnostic rapide de la densité avec l'avantage majeur d'être une technique d'échantillonnage non-destructive (Lopez Saez et *al.*, 2009). Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à l'étude des performances du résistographe dans le diagnostic phytosanitaire des arbres sur pieds (Ukrainetz et O'Neill, 2010 ; Mattheck et *al.*, 1997 ; Ouis, 2003), d'échantillons prélevés (Rinn, 1994, Johnstone et *al.*, 2007), du bois mort (Kahl, 2009) et carié (Barrette et *al.*, 2015), de structures et poutres de bois (De Oliveira Feio, 2005), etc. Les résultats de ces travaux ont attesté, dans la plupart, que le résistographe est un outil fiable pour la détection de la pourriture dans le bois. Ainsi, il serait un outil d'aide à la décision de grande valeur dans plusieurs contextes forestiers, des bâtiments et en foresterie urbaine. Le résistographe a également fait ses preuves dans le domaine de la dendrochronologie (Lopez Saez et *al.*, 2009). L'avancement de la recherche a conduit à une exploitation plus poussée du résistographe dans l'évaluation de la qualité du bois.

Son principe de mesure se base sur la résistance de perçage de la tige. Comme le bois est un matériau poreux, l'énergie totale consommée lors de la pénétration du tronc devrait être en lien étroit avec la quantité de matière à pénétrer et par conséquent corrélées à la densité du bois (Rinn 1988, 1990 ; Rinn et *al.*, 1996). En effet, le

résistographe est muni d'une fine aiguille qui pénètre le tronc et parcourt le bois selon un plan horizontal avec un mouvement rotatif continu allant jusqu'à 1500 rpm (Figure 2.1). L'aiguille est faite en un acier spécial. Sa pointe est traitée durant le processus de fabrication et possède un aiguisage spécial. Le point d'attache garantit un mouvement linéaire de l'aiguille. Le devant plat assure la mesure de la densité perpendiculaire à la direction de pénétration permettant de mettre en corrélation la valeur mesurée à la position réelle de la pointe de l'aiguille. La résistance de perçage est concentrée à la pointe de l'aiguille car sa largeur est le double de la largeur de l'axe de l'arbre (Rinn et *al.*, 1996). Une régulation électronique du moteur garantit une vitesse d'alimentation constante de l'aiguille adaptée à la densité du bois ; 50 mm/min pour le bois extrêmement dense et 700 mm/ min pour le bois très tendre. Le résistographe se présente sous trois types : un modèle permettant de mesurer la densité avec un minimum de profondeur de 280 mm, une version standard atteignant 410 mm de profondeur et enfin la plus longue pouvant atteindre un maximum de profondeur de 950 mm (Rinn, 1994). Mise à part l'unité principale de perçage, le résistographe (Figure 2.1) s'accompagne d'un dispositif de lecture directe de la variation de la résistance au perçage par bandes cirées, un module de stockage de données et une connectique de transfert de données (Lopez Saez et *al.*, 2009). Les données collectées via le résistographe peuvent se présenter sous deux formes :

- Une représentation graphique obtenue instantanément au moment du perçage grâce à une petite imprimante qui révèle le profil radial à une échelle de 1:1;
- Une base de données stockée dans une mémoire interne pouvant contenir jusqu'à 500 profils à analyser ultérieurement au laboratoire.



Figure 2.1 Le résistographe et ses équipements

Les représentations graphiques fournies par le résistographe (Figure 2.2) traduisent une mesure relative de la consommation d'énergie. La résolution électronique étant de 12 bits, les valeurs des coordonnées varient donc de 0 à 4095, représentant ainsi une échelle relative de la résistance de perçage. Sur les graphes fournis par le résistographe on peut observer les variations radiales de la résistance au perçage à l'échelle du cerne (bois initial / bois final).

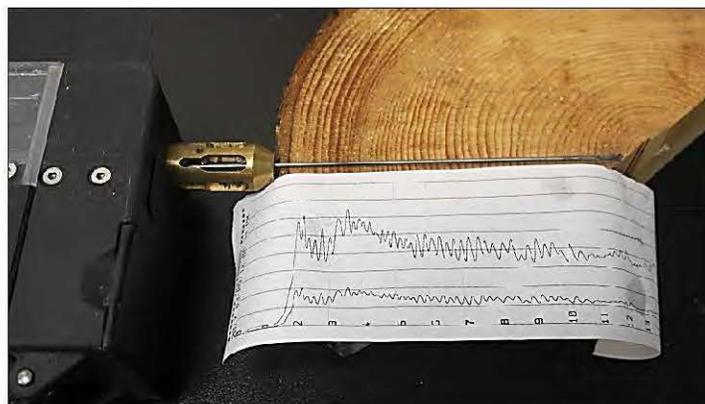


Figure 2.2 Profil de variation radiale de la résistance au perçage généré par le résistographe : Cas de l'épinette noire

L'identification des cernes des arbres est limitée principalement par les propriétés anatomiques du bois, l'angle de perçage et la géométrie de l'aiguille (Rinn, 1994). En

général, la résistance de perçage reflète la relation intra-cerne de la transition du bois initial au bois final. Les cernes étroits qui caractérisent le bois des conifères issus de forêts denses ou non aménagées avec une proportion importante du bois final et par conséquent une densité élevée, montrent une résistance au perçage plus importante. La proportion mince du bois initial à structure anatomique poreuse et à faible densité se traduit donc par une baisse du niveau de la résistance de perçage (Wang et *al.*, 2003).

2.5 Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact des coupes partielles sur les attributs de qualité du bois chez l'épinette noire à l'échelle des peuplements. L'évaluation des attributs de la qualité du bois sera réalisée dans un premier temps à l'aide du densitomètre à rayons X étant l'outil de mesure conventionnel de la largeur des cernes et de la densité du bois. Dans un second temps, on vise à tester le potentiel du résistographe, un outil de mesure non destructive, dans l'évaluation de l'effet de la coupe partielle sur la croissance radiale et la densité du bois de l'épinette noire. Ainsi, trois sous objectifs ont été fixés:

- Valider les mesures du résistographe comme outil de mesure non-destructive de la croissance et de la densité du bois de l'épinette noire ;
- Étudier les variations radiales intra- arbre et intra-cerne de la croissance et de la masse volumique du bois (densitomètre à rayons X et résistographe) ;
- Évaluer l'effet de la coupe partielle sur la croissance et la masse volumique du bois (densitomètre à rayons X et résistographe) à l'échelle du cerne, de l'arbre et du peuplement.

2.6 Hypothèses de travail

L'hypothèse de travail est que la diminution de la densité de peuplement permet d'augmenter le taux d'accroissement radial. La largeur du cerne augmente suite à l'augmentation de la proportion du bois initial grâce à un meilleur accès à la lumière et

aux substances nutritives. Parallèlement, la proportion du bois final diminue ce qui cause une diminution de la densité moyenne des cerne.

Variations intra-arbres : la croissance radiale et les attributs de la qualité du bois varieraient principalement en fonction de l'âge cambial de l'arbre. Ces variations seraient d'autant plus importantes dans la partie juvénile de l'arbre ;

Variations inter-arbres dans un peuplement : les effets des coupes partielles des individus appartenant à un même peuplement varieraient en fonction de la classe diamétrale et de l'intensité du traitement de coupe partielle.

Variations inter-arbres appartenant à des peuplements distincts : l'impact des coupes partielles varierait en fonction de l'intensité de coupe, de l'année d'intervention et du peuplement. Les arbres appartenant à une même classe diamétrale, d'âge cambial similaire et ayant subi la même intensité de traitement mais appartenant à des peuplements différents réagissaient différemment en terme de densité moyenne. Il existerait une intensité de coupe optimale spécifique à chaque peuplement qui permettrait d'augmenter la croissance radiale sans avoir d'effets négatifs sur la densité moyenne et la croissance des arbres. La réponse de chaque peuplement serait influencée par les conditions écologiques du site.

Concernant la partie dédiée aux mesures du résistographe, des hypothèses sont également posées pour l'atteinte des objectifs de validation de l'outil ;

- Le résistographe permettrait la caractérisation de la densité du bois et de la croissance annuelle à l'échelle de l'arbre et du cerne. Il existerait une forte corrélation entre les valeurs de résistance du bois au perçage par le résistographe et sa densité.
- Les données du résistographe permettraient d'étudier les variations radiales de la masse volumique, de la largeur du cerne et de ses composantes (bois initial et bois final). La comparaison des profils de variations radiales du résistographe et du densitomètre à rayons X indiquerait une bonne corrélation.

- Au moyen d'un plus grand nombre d'échantillons et d'une précision de mesure se rapportant à l'échelle du cerne, le résistographe permettrait d'évaluer l'impact à moyen terme de la coupe partielle sur les attributs de la qualité du bois.

2.7 Analyse statistique des propriétés mesurées

Les variations radiales intra-arbre pour chaque site ont été analysées pour chacune des propriétés mesurées en se basant sur des observations graphiques représentant l'évolution de ces valeurs de la moelle vers l'écorce et inter-arbres en fonction de l'âge cambial.

L'étude des variations inter-peuplement de la masse volumique et de la largeur du cerne tient compte de l'intensité de traitement (T_0, T_1, T_2, T_3) ainsi que la classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP : C1, C2, C3, C4). Le logiciel R a été utilisé pour analyser les données sous un modèle linéaire à effets mixtes, incluant des effets fixes (site, intensité de traitement, classe de DHP, le temps post coupe et l'âge cambial) et des effets aléatoires (site, placette et arbre). Le nombre relativement faible de données conditionne fortement le nombre de facteurs d'interaction à intégrer dans le modèle statistique global. Les variables ayant une forte corrélation ne pouvaient pas être intégrées d'où, par exemple, le choix de s'intéresser à l'âge de l'arbre plutôt qu'à l'âge cambial. Plusieurs tests ont été performés tels que de la méthode restrictive du Maximum Likelihood (REML) et des comparaisons multiples (Tukey HSD) pour interpréter les effets significatifs de chaque variable sur les attributs de qualité du bois étudiés avec un seuil de significativité fixé à 0,05. L'équation 2.1 résume le modèle global utilisé.

$$M_{ijklmn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \rho_l + \varrho_m + \sigma_n + (\beta\rho)_{jl} + (\beta\sigma)_{jn} + (\beta\varrho)_{jm} + \xi_{ijklmn} \quad (2.1)$$

Avec :

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

μ : la moyenne de la propriété

α : effet du site

β : effet du traitement

γ : effet de l'arbre

ρ : effet de l'âge de l'arbre

ϱ : effet de la classe de diamètre

Θ : effet du temps post-coupe

ξ_{ijklmn} : le terme d'erreur

La comparaison entre les mesures du résistographe et celles du densitomètre à rayons X s'est basée sur une régression linéaire simple afin de déterminer les coefficients de corrélations linéaires qui expriment la relation entre la densité et la largeur moyenne des cernes annuels mesurées par les deux outils.

CHAPITRE III

MATERIELS ET METHODES

Un dispositif expérimental a été mis en place dans trois sites d'étude dominés par l'épinette noire.

3.1. Sites expérimentaux

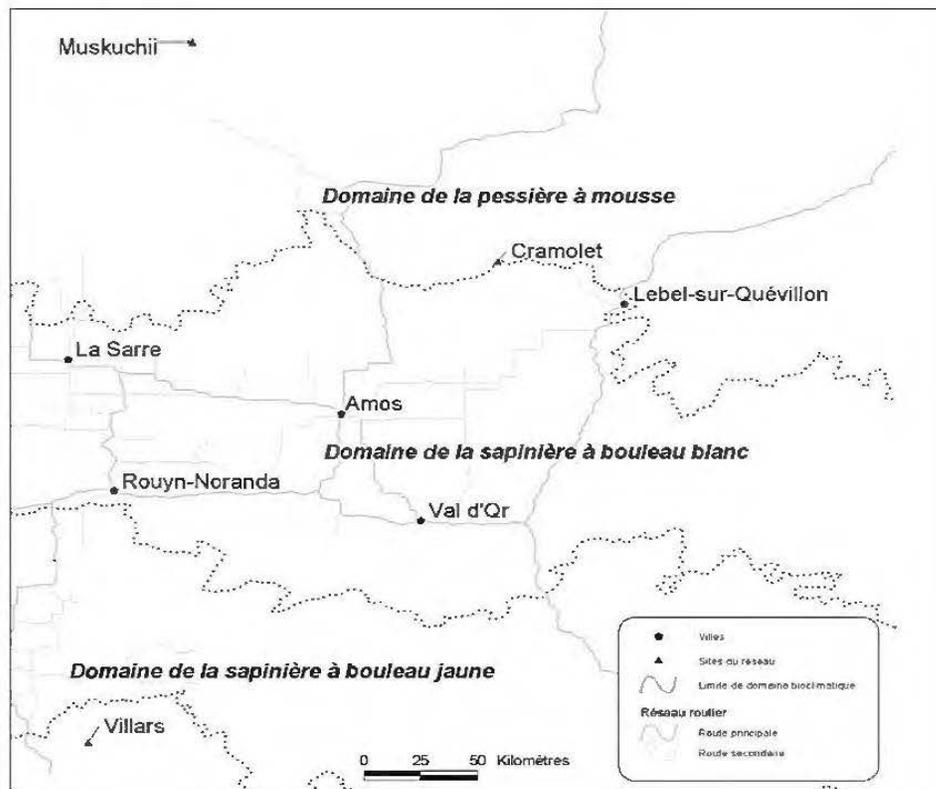


Figure 3.1 Réseau des coupes partielles de l'Abitibi

Les sites d'échantillonnage ont été sélectionnés grâce aux cartes écoforestières du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec et proviennent de la base nationale de données topographiques développées par le conseil canadien de géomatique (GéoBase®). Le critère de base pour la sélection des stations était un minimum de 10 ans depuis l'intervention. Le matériel échantillonné provient de trois stations ou peuplements d'épinette noire situées au niveau de la ceinture d'argile de l'Abitibi (Fenton et *al.*, 2008) appartenant à trois sites distincts (Figure 3.1) dont quelques caractéristiques sont présentées au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Caractéristiques des sites d'échantillonnage

Caractéristiques	Sites		
	Cramelot	Villars	Muskuchii
Latitude/Longitude	48°N, 77°W	46°N, 79°W	50°N, 78°W
Relief topographique	Faible		Élevé
Âge cambial moyen (années)	99	95	93
Moyenne DHP (cm)	15,4	15,3	13,1
Surface terrière initiale (m ² /ha ²)	24,84	18,72	19,75
Nombre de placettes d'échantillonnage	3	8	10
Saison de traitement	Hiver 2007	Automne 2005	Été 1998/1999/2000

- **Les sites : Muskuchii et Cramolet :**

Ces sites sont localisés au niveau de la zone boréale caractérisée par des peuplements de conifères sempervirents. Plus précisément, les deux sites appartiennent à la sous-zone de la forêt boréale continue, où les peuplements, relativement denses, renferment principalement des espèces résineuses boréales et des feuillus de lumière. Cette sous-zone est subdivisée en plusieurs domaines bioclimatiques dont celui concerné par cette

étude est le domaine de la pessière à mousses (Bergeron et *al.*, 1998). Le domaine s'étend approximativement jusqu'au 52^e parallèle et sa limite nord coïncide avec celle de la sous-zone de la forêt boréale continue. Les paysages se caractérisent par une dominance de l'épinette noire formant des peuplements mono-spécifiques mais avec une possibilité d'association à différentes espèces compagnes, dont le sapin baumier. Certains feuillus, tels le bouleau blanc, le peuplier faux-tremble et, dans une moindre mesure, le peuplier baumier, croissent aussi dans ce domaine. Les sous-bois sont couverts de mousses hypnacées et de plantes arbustives éricacées. Les espèces herbacées sont peu nombreuses. Compte tenu des précipitations, on divise le domaine bioclimatique de la pessière à mousses en deux sous-domaines. Le cycle des feux, principal élément de la dynamique forestière, est beaucoup plus long dans celui de l'est, où les sapinières sont plus abondantes et la proportion de sapins dans les pessières est plus élevée (MFFPQ, 2015). Le site Muskushii est formé de collines et se caractérise par un sol bien drainé et une bonne productivité. Les épinettes noires se trouvent le plus souvent associées au pin gris. Tandis que le site Cramolet se distingue par des peuplements purs d'épinettes noires et où le drainage est moins bon que celui du site Muskushii.

- **Site Villars :**

Le site est localisé plus au sud et appartient à la zone tempérée nordique et la sous-zone de la forêt mélangée caractérisée par des peuplements mixtes ; des espèces boréales, comme le sapin baumier et l'épinette noire et des espèces méridionales, comme le bouleau jaune. Cette diversité d'espèces compagnes augmente la compétition interspécifique. La sous-zone de la forêt mélangée renferme un seul domaine bioclimatique celui de la sapinière à bouleau jaune qui s'étend sur 98 600 km² et représente une zone de transition entre la zone tempérée nordique et la zone boréale (Bergeron et *al.*, 1998). Il s'étend depuis l'ouest jusqu'au centre du Québec, entre 47° et 48° de latitude. Les sites mésiques y sont occupés par des peuplements mélangés de

bouleaux jaunes et de résineux, comme le sapin baumier, l'épinette blanche et le thuya. Les épidémies de tordeuses des bourgeons de l'épinette et les feux y sont les deux principaux éléments de la dynamique forestière. L'abondance du bouleau jaune et des pinèdes, qui diminue d'ouest en est, permet de distinguer deux sous-domaines : celui de l'ouest est caractérisé par l'omniprésence des bétulaies jaunes à sapins sur les sites mésiques et celui de l'est, par les sapinières à bouleau jaune (FFPQ, 2015).

Le dispositif expérimental (Figure 3.2), mis en place au cours des 15 dernières années, est constitué de trois sites d'échantillonnage à savoir Villars, Cramolet et Muskuchi. Chaque « bloc-traitement » (superficie minimale de 25 ha/ bloc) regroupe 17 placettes établies selon les normes du Ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRNQ, 2000) et mises en place avant la réalisation de la récolte. La placette principale est un cercle de rayon horizontal 11,28 m et une superficie de 400 m² (1/25 d'hectare).

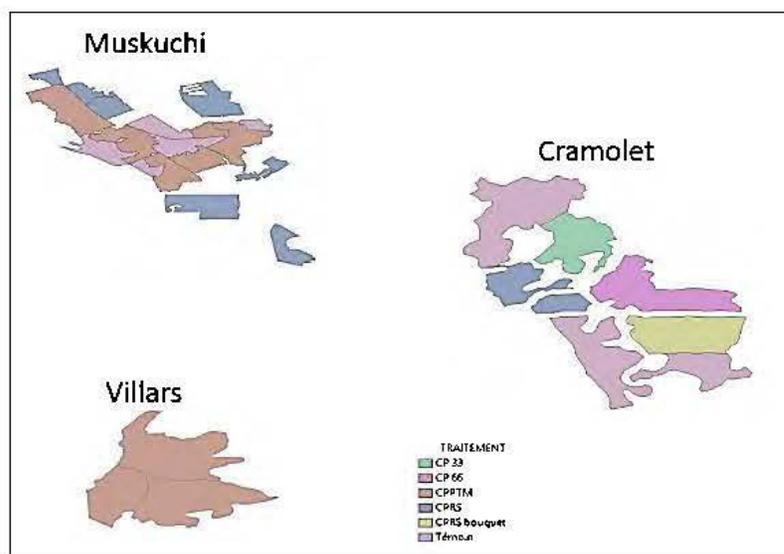


Figure 3.2 Traitements sylvicoles appliqués dans chaque site d'étude

3.2 Traitements sylvicoles

A partir du bloc traitement de coupe partielle, des carottes d'arbres ont été échantillonnées depuis les placettes. On note que la répartition aléatoire des placettes, étant faite avant la coupe, conditionne le choix des placettes à échantillonner. Ainsi, l'échantillonnage concerne toute placette répondant au critère des intensités de prélèvements faible (0-50%), modérée (50-75%) et fort (75-100%). À partir de chaque placette centrale renfermant une des quatre intensités de prélèvement, 10 arbres ont été échantillonnés selon quatre classes de diamètre à hauteur de poitrine C1 (5,1-9 cm), C2 (9,1-15 cm), C3 (15,1-20) et C4 (>20,1).

3.3 Échantillonnage

Le matériel utilisé pour la réalisation de cette étude provient de trois types d'échantillonnage provenant des travaux de recherche antérieurs se rapportant à cette même thématique. L'échantillonnage se présente comme suit :

- Un échantillonnage non destructif : consiste en un carottage au DHP sur 10 arbres par traitement (T0, T1, T2, T3) pour chaque classe diamétrale (C1, C2, C3, C4) et chaque site, d'où un total de 480 carottes sur les trois sites (10 arbres x 4 classes de DHP x 4 intensités de traitements x 3 sites) (Figure 3.3). Ces carottes seront utilisées pour l'analyse de la masse volumique intra-cernes ainsi que la croissance annuelle

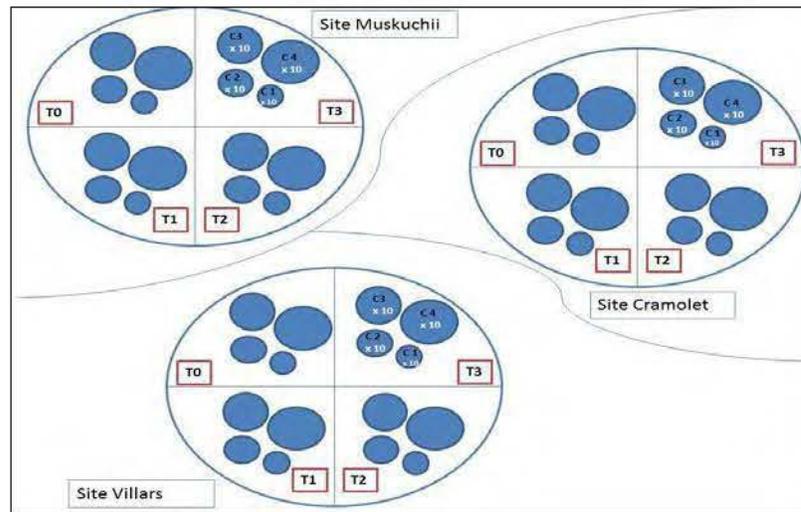


Figure 3.3 Représentation schématique du dispositif d'échantillonnage non destructif

* : Représentation schématique simplifiée car les placettes correspondant aux quatre classes de traitements sont réparties sur chaque site de manière aléatoire.

- Un échantillonnage sur pied a été réalisé en utilisant le résistographe qui se base sur des lectures directes de la résistance au perçage qui sont converties en densité. Ces mesures ont été effectuées sur 30 arbres par site respectivement pour les classes de diamètres C1, C2, C3 et C4 et pour les quatre intensités de traitements mentionnées ci-dessus.

3.4 Protocole expérimental

3.4.1 Le densitomètre à rayons X (Q.M.S)

L'évaluation du taux de croissance radiale annuelle ainsi que la mesure de la densité du bois ont été effectuées au moyen du densitomètre à rayon X modèle QTRS-01X Tree Analyser de Quintek Measurement System, Inc. (QMS). Cet équipement analyse une carotte de bois d'une épaisseur comprise entre 1,57 et 2 mm. Comme la carotte de bois est extraite en utilisant une tarière de Pressler dont le diamètre initial est d'environ 6 mm, on doit utiliser une scie pour réduire son épaisseur. Ensuite, les échantillons sont

extraits dans un mélange d'alcool et cyclohexane (24 heures) puis dans l'eau bouillante (24 heures) afin d'enlever les substances extractibles. Par la suite, les échantillons sont rincés et séchés à l'air libre sous une charge pour éviter d'éventuelles déformations au cours du séchage.

Le densitomètre à rayons X se base sur l'atténuation d'un rayon X qui traverse l'échantillon avec une résolution linéaire de 0,02 mm. Le pilote « Tree Ring Analyser », génère un profil de densité par échantillon (Figure 3.4) qui se traduit sous forme d'un tableau résumant les variations radiales ou annuelles de la densité et de la croissance pour chaque échantillon. A partir du profil, on peut déterminer la masse volumique et la largeur du cerne, du bois initial et du bois final ainsi que l'âge des arbres et des peuplements. Le point de transition bois initial/ bois final pour chaque cerne est déterminé selon la méthode de la valeur seuil. L'utilisation du logiciel Matlab nous permet de déterminer de manière plus précise le point de transition, selon la méthode du point d'inflexion (Koubaa et *al.*, 2002).

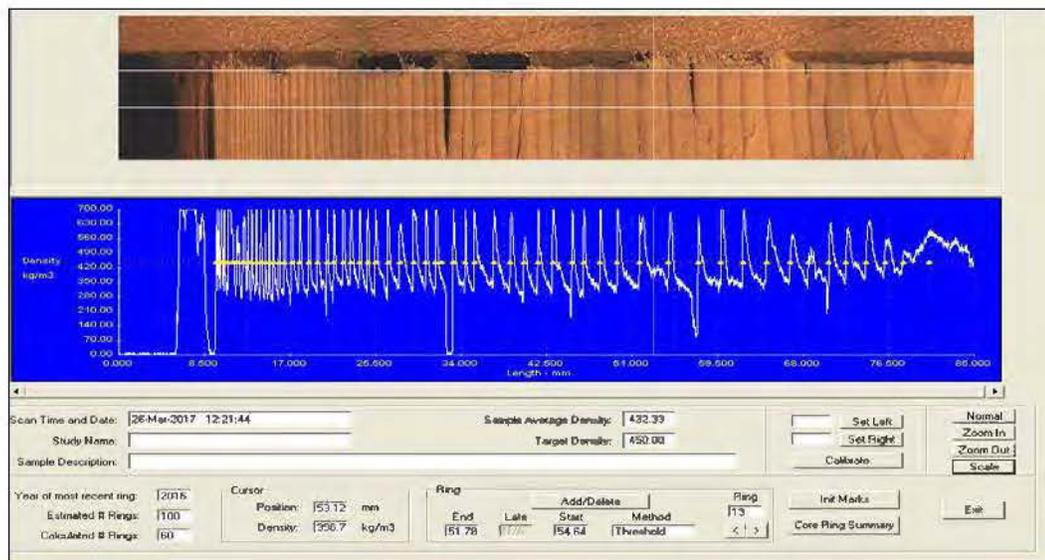


Figure 3.4 Exemple de mesure d'un échantillon d'épinette noire par le densitomètre à rayons X

Les résultats d'analyse permettent d'étudier l'effet des coupes partielles sur la croissance et la densité du bois d'épinette noire par comparaison des résultats de scan des cernes (pour chaque arbre) de part et d'autre de l'année de traitement.

3.4.2 Le résistographe

Pour les fins de validation des résultats d'analyse via le résistographe, 30 arbres d'épinette noire ont été sélectionnés dans un peuplement d'épinette noire situé dans la pessière noire à sphaigne à 6 km environ de la station de recherche et d'enseignement du Lac Duparquet sur la route 338 et dont les coordonnées GPS sont résumées dans le Tableau 3.2. Le site se caractérise par la dominance de l'épinette noire, présente sur un dépôt organique mal drainé et ombratrophe. La densité du couvert est de 41 à 60 %, de hauteur moyenne de 12 à 15 m, le paysage est plat avec une pente de 0 à 3 %. Il s'agit d'un peuplement vieux inéquien où la moyenne d'âge s'étend d'un minimum de 20 ans jusqu'à un maximum de 101 ans.

Tableau 3.2 Localisation GPS du peuplement d'épinette noire échantillonné

Identification	Latitude	Longitude
Epn1	48,522359	-79,459154
Epn2	48,522325	-79,459164
Epn8	48,522411	-79,459164
Epn23	48,522359	-79,45898
Epn30	48,52238	-79,458936

Les arbres ont été choisis de manière aléatoire, essayant de couvrir un éventail de diamètres au DHP assez représentatifs allant de 10 cm à 40 cm. Chaque arbre a été mesuré dans un premier temps par le résistographe couvrant la totalité du plan radial de l'arbre (d'écorce à écorce). La vitesse de perçage est maintenue inchangée pour toutes les mesures à raison de 20 mm/s. La profondeur de perçage est modulée à chaque mesure en fonction du DHP de l'arbre. L'aiguille de perçage est échangée pour chaque

tranche de 50 mesures pour réduire l'effet de l'usure de l'aiguille sur la perte d'énergie au moment du perçage (Acuña et *al.*, 2011). Dans un deuxième temps une carotte est prélevée à partir de quelques centimètres au-dessus du point de perçage de l'aiguille du résistographe. La carotte mesure 6 mm de diamètre et représente le profil radial de l'arbre de l'écorce jusqu'à la moelle. Les 30 carottes échantillonnées ont été extraites et analysées au laboratoire par le densitomètre à rayons X (voir paragraphe 3.4.1). La Figure 3.5 montre des exemples de profils obtenus avec le résistographe.

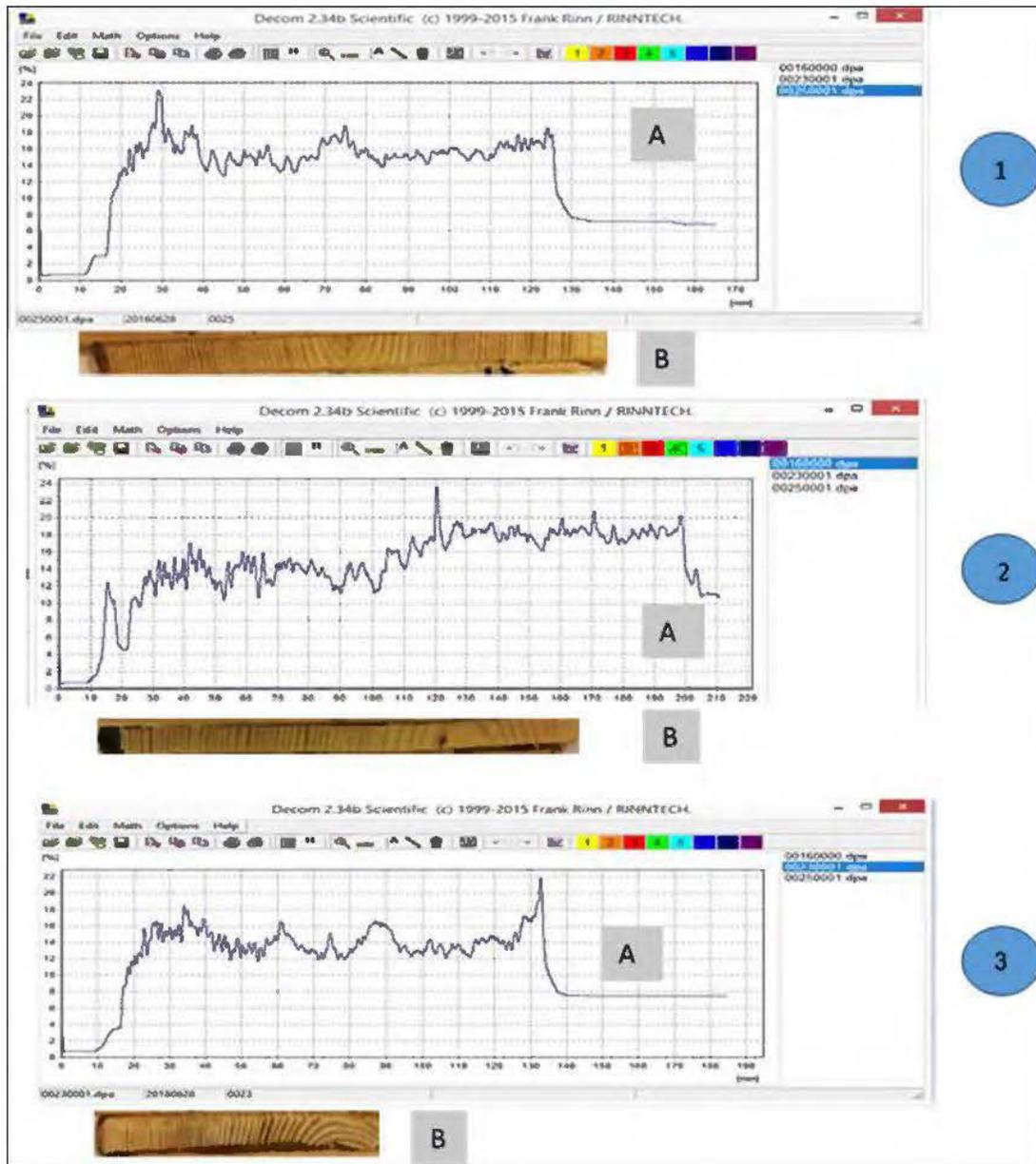


Figure 3.5 Exemples de profils radiaux de trois épinettes noires (1,2 et 3) : Mesures du résistographe « A » analysées par le logiciel Decom 2.34b Scientific © 1999-2015 Frank Rinn/RINNTECH, avec une vitesse moyenne de perçage de 20 mm/sec de gauche à droite, zoom x3, profondeur de perçage ajustée selon le DHP de l'arbre, le pas de mesure est de 0,02 mm. « B » représente la carotte correspondant à chaque arbre échantillonné.

L'unité de mesure conventionnelle de la masse volumique du bois étant le kg/m^3 , le résistographe doit passer par une étape de calibration (Kahl *et al.*, 2009). La calibration consiste à convertir les pourcentages de puissance mesurés par le résistographe en masse volumique kg/m^3 . Pour ce faire, 20 épinettes noires ont été échantillonnées à partir du même site que les échantillons utilisés pour la validation du résistographe. Les arbres ont été choisis selon un large éventail de densités renfermant ainsi un gradient de bois peu dense à très dense. À partir de chaque arbre, une galette de bois est extraite pour effectuer respectivement la mesure de la densité réelle et le profil de mesure résistographique. Ceci a permis de dresser une courbe linéaire (Figure 3.6) exprimant la masse volumique mesurée en fonction de la moyenne du pourcentage de résistance au perçage du profil résistographique pour chaque échantillon. La Figure 3.6, représente l'équation (3.1) :

$$\text{Masse volumique mesurée} = 33,745 * \text{Puissance\%} + 167,57 \quad (3.1)$$

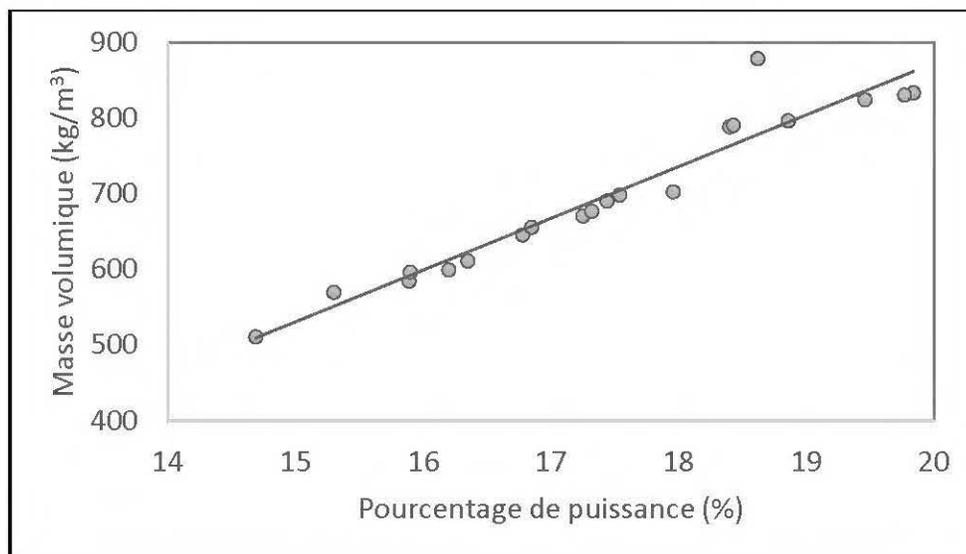


Figure 3.6 Relation entre la masse volumique du bois et le pourcentage de puissance de perçage du résistographe

CHAPITRE VI

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Validation des données du résistographe

Dans le but d'évaluer l'efficacité du résistographe à mesurer la densité et la croissance radiale, 30 profils mesurés par le résistographe ont été comparés avec les profils obtenus par le densitomètre à rayons X. Il est à noter que les valeurs de la masse volumique du bois mesurée par le résistographe sont obtenues directement à partir des arbres sur pieds à l'état vert et dans les conditions d'humidité naturelle du site d'échantillonnage. Matteck et *al.* (1997) ont mis en évidence que les profils résistographique d'un même échantillon à l'état vert et à l'état sec, ont la même allure et la même amplitude de résistance au perçage. Les carottes provenant des mêmes individus ont été séchées et extraites au laboratoire avant d'être scannées par le DRX en raison de la forte sensibilité de la mesure par rayons X à la présence d'eau et de substances extractibles dans le bois. Ceci, pourrait expliquer les valeurs surestimées de la masse volumique du bois mesurées par le résistographe en comparaison avec celles du DRX (Lin et *al.*, 2003).

4.1.1 Comparaison qualitative

Sur un total de 30 échantillons analysés, la superposition graphique des deux profils (DRX et résistographe) montre une bonne concordance entre les deux méthodes de

mesures (Figure 4.1 ; a, b et c). En effet, on observe des zones de similitude dans le mouvement d'oscillation des deux graphiques. Ces similitudes sont peu concluantes quand l'intérêt est porté aux propriétés intra-cernes (Isik et Li., 2003). Selon le profil de la variation de la croissance radiale de l'échantillon représenté par la Figure 4.1.a, le résistographe n'a pas permis de détecter les 10 premiers cernes de croissance du côté de l'écorce. De plus, la direction de perçage ne s'est pas faite de manière parfaitement horizontale. Ceci peut être dû, soit à une mauvaise manœuvre de l'opérateur ou à la présence d'anomalies dans le bois (caries, champignons ...). Ce genre d'aléas peut causer la perte d'information dans la première partie du profil qui s'améliore légèrement vers le milieu. Une bonne distinction des cernes est indispensable afin de pouvoir calculer de manière assez précise l'âge cambial de l'arbre mais également pour pouvoir estimer les propriétés des composantes d'un cerne de croissance (bois initial et bois final). La Figure 4.1.b montre que les mêmes limites liées à cet outil de mesure existent pour le DRX. Au milieu du profil (environ 20^{ème} cerne de croissance), une bonne concordance des deux profils est observée même si la différence $D_{max} - D_{min}$ dans le profil résistographique est légèrement inférieure à celle obtenue pour les mesures du DRX. Ceci peut représenter une limite pour la détermination de la masse volumique du bois initial et du bois final pour chaque cerne de croissance.

Le profil radial de certains échantillons peut être caractérisé par la présence de cernes très étroits (Figure 4.1.c). Ceci peut être éventuellement dû à une blessure que l'arbre tend à compenser ou encore à un rallongement des saisons de croissance. Ceci se traduit par la formation du bois initial seulement d'où une transition bois initial- bois final très abrupte et ne peut être détectée par les mesures du résistographe. Ceci représente donc une limite majeure à la méthode de mesure par résistance au perçage étant donné la difficulté d'analyser le profil radial sans avoir en parallèle un support visuel du même profil radial (Rinn et al., 1996).

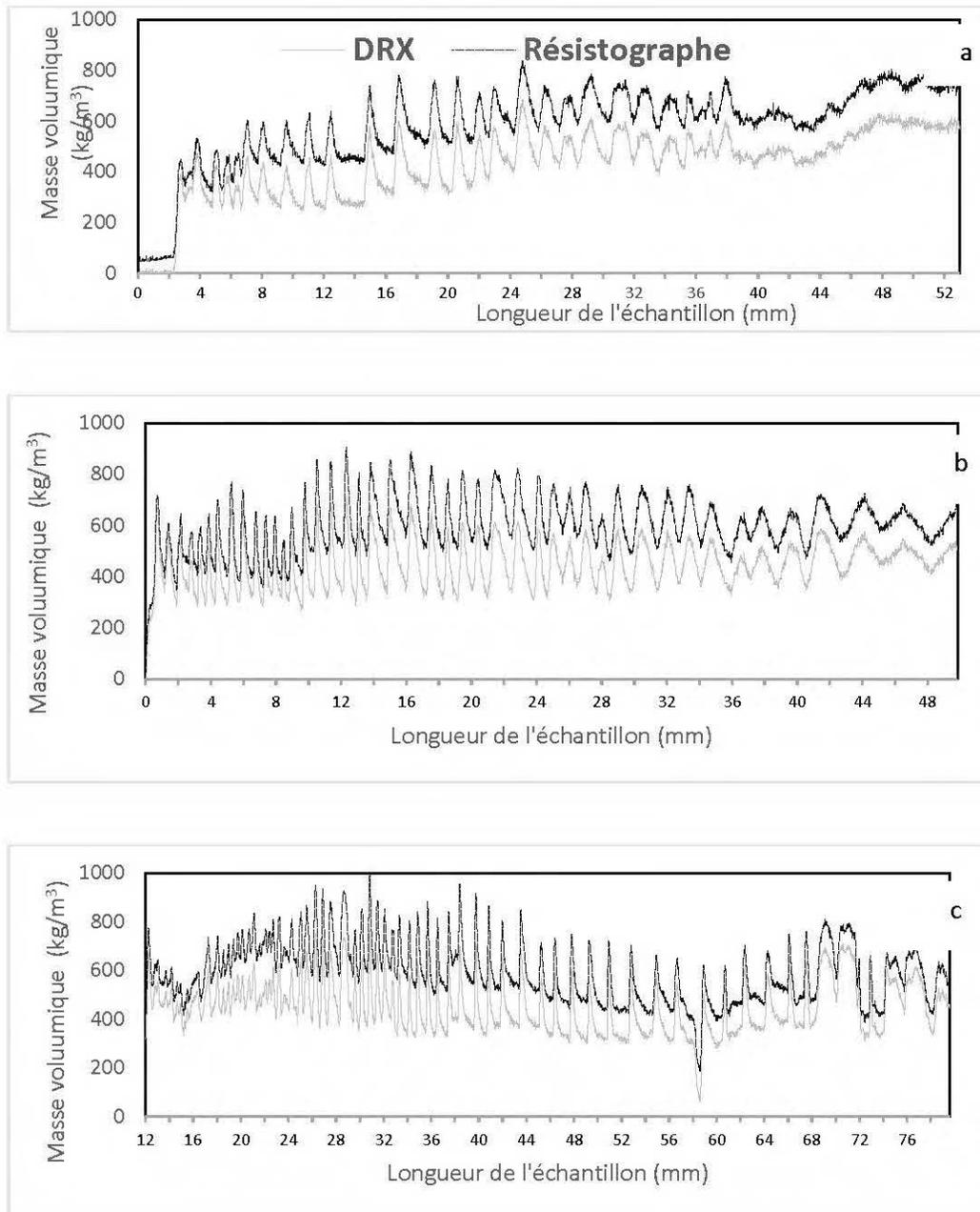


Figure 4.1 Exemples du résultat de superposition de deux profils de variation radiale de la masse volumique (résistographe et DRX) en fonction de la longueur de l'échantillon allant de l'écorce jusqu'à la moelle (de gauche à droite)

4.1.2 Comparaison quantitative

Les données obtenues par les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X ont été soumises chacune à un programme Matlab. Ce logiciel permet de définir la transition du bois initial au bois final chez l'épinette noire à partir du calcul du point d'inflexion de polynôme au degré 6 (Koubaa et *al.*, 2002). Les paramètres calculés dans cette étude sont tous à l'échelle du cerne, à savoir :

- La densité moyenne du cerne, du bois initial et du bois final ;
- La largeur moyenne du cerne, du bois initial et du bois final ;
- La densité maximale et minimale.

La comparaison entre les deux techniques de mesure s'est faite sur la base de l'année de croissance. Le coefficient de corrélations des données obtenues par le résistographe et le densitomètre à rayons X pour chacune des propriétés du bois mentionnées ci-dessus ont été calculés. Les résultats sont résumés dans le Tableau 4.1.

La relation entre le résistographe et le densitomètre à rayons X est étudiée dans un premier temps sur tout le profil radial (1949-2015). Dans un deuxième temps, la relation a été étudiée sur une partie du profil en enlevant le début et la fin du profil en considérant uniquement 30 années de croissance (1970-2000). La comparaison entre le profil entier et le profil choisi a pour but d'investiguer les différences possibles entre les coefficients de corrélations des deux profils et qui seraient dues à la présence d'anomalies au début et à la fin du perçage (Acuna et *al.*, 2011).

Tableau 4.1 Coefficient de corrélation linéaire (R) entre les paramètres intra-arbre et intra-cernes mesurés par le résistographe et le DRX pour tout le profil radial (1949-2015) et pour 30 années de croissance (1970-2000)

Paramètres	Paramètres intra-arbre				Paramètres intra-cerne			
	Densité			Largeur	Densité		Largeur	
	DM	D.Max	D.Min		DBI	DBF	LBI	LBF
R (1949-2015)	0.45*	0.34*	0.38*	ns	0.21*	0.17*	ns	ns
R (1970-2000)	0.63*	0.74*	0.52*	0.13*	0.39*	0.51*	ns	ns

DM : densité moyenne, DMax : densité maximale, DMin : densité minimale, DBI : densité du bois initial, DBF : densité du bois final, LBI : largeur du bois initial; LBF : largeur du bois final; * : significatif à $\alpha < 0.05$; ns : non significatif à $\alpha < 0.05$

Les résultats montrent que les coefficients de corrélation relatifs à la densité sont significativement différents de zéro à un seuil de signification de 5%. Tandis que ceux de la largeur des cernes et de ses composantes ne sont pas significatifs (Tableau 4.1). En considérant le profil radial entier, les résultats montrent que le résistographe permet une estimation faible des paramètres intra-cernes du bois. Par contre, les coefficients de corrélation pour les paramètres intra-arbre sont moyens. Ces résultats indiquent que le résistographe est un outil qui se prête mieux pour l'estimation de la qualité globale du tronc. Les travaux de Chantre et Rozenberg (1997) sur le sapin Douglas ont mis en évidence une meilleure évaluation des paramètres intra-cernes pour les premiers cernes de croissance à partir de l'écorce (6 à 8 cernes).

L'analyse des résultats de la variation radiale de la largeur moyenne du cerne sur 30 années de croissance, montre que les coefficients sont un peu plus élevés par rapport à l'analyse du profil radial entier. La densité moyenne du cerne (Figure 4.2) ainsi que les valeurs de la densité maximale et minimale (Figure 4.3 et 4.4) sont bonnes ($r = 0,63$, $0,74$ et $0,52$ respectivement). L'estimation des paramètres de la densité du bois initial et final sont plutôt moyens (Figure 4.5 et 4.6). Par contre, aucun changement notable

n'est observé concernant l'estimation des paramètres liés au taux de croissance radiale. L'intervalle de temps a été choisi de manière à enlever les deux extrémités du profil radial et diminuer ainsi la résolution du résistographe (1/100 mm). Ces résultats peuvent s'expliquer par l'irrégularité de croissance du côté de la moelle qui tend à se stabiliser en allant vers l'écorce, ceci rend la distinction des cernes près du cœur moins évidente et moins fiable. Cette limite est encore difficile à contourner en utilisant le résistographe puisque cet outil se base sur un contraste clair entre les cernes de croissance. En effet, la détection des cernes de croissance par le résistographe est limitée par un seuil minimum de résistance au perçage en bas duquel il serait impossible d'identifier la variation de la densité entre les cernes. Du côté de l'écorce, il est possible que les erreurs de mesure, repérées durant les premières années de croissance soient à l'origine d'une mauvaise manœuvre de l'opérateur ou encore à l'instabilité de l'aiguille de perçage pénétrant les premiers centimètres de l'arbre. La sélection de différents intervalles par Acuna *et al.* (2011) n'avait donné aucune différence significative pour l'estimation des variables d'un profil résistographique.

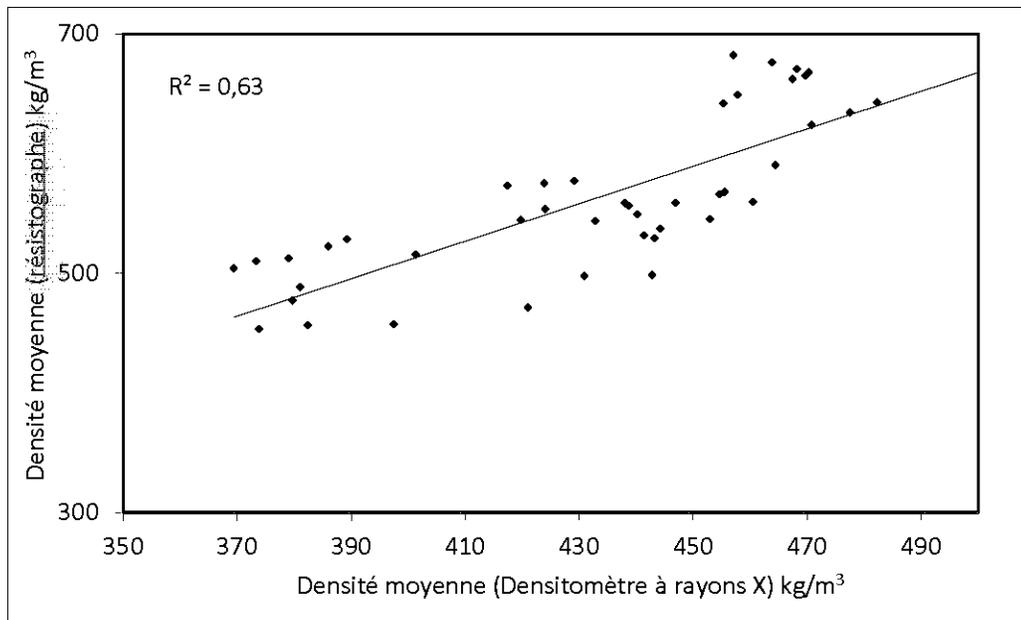


Figure 4.2 Corrélation entre les données de la densité moyenne du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000)

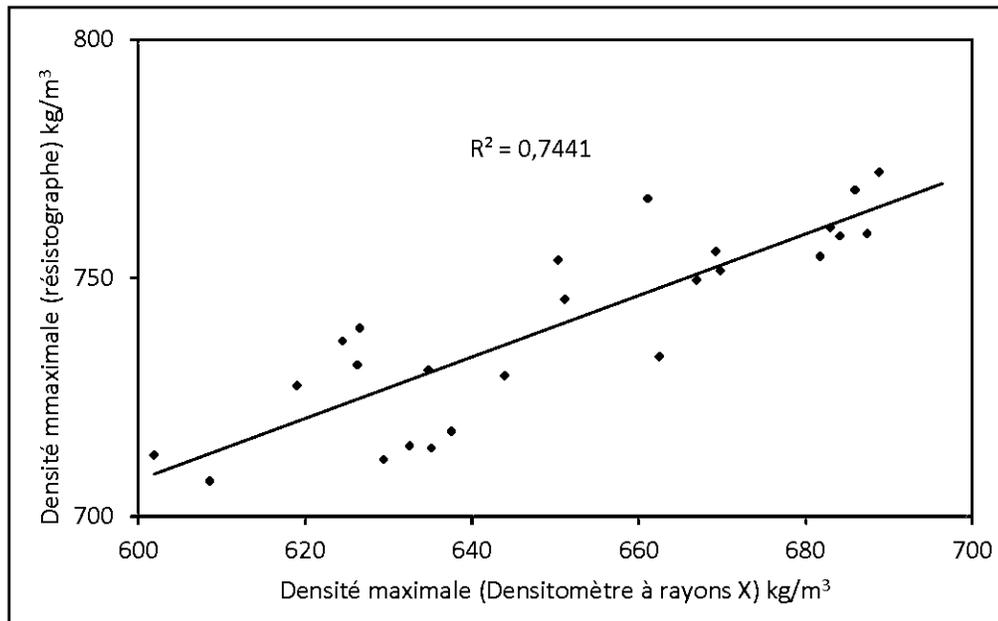


Figure 4.3 Corrélation entre les données de la densité maximale du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000)

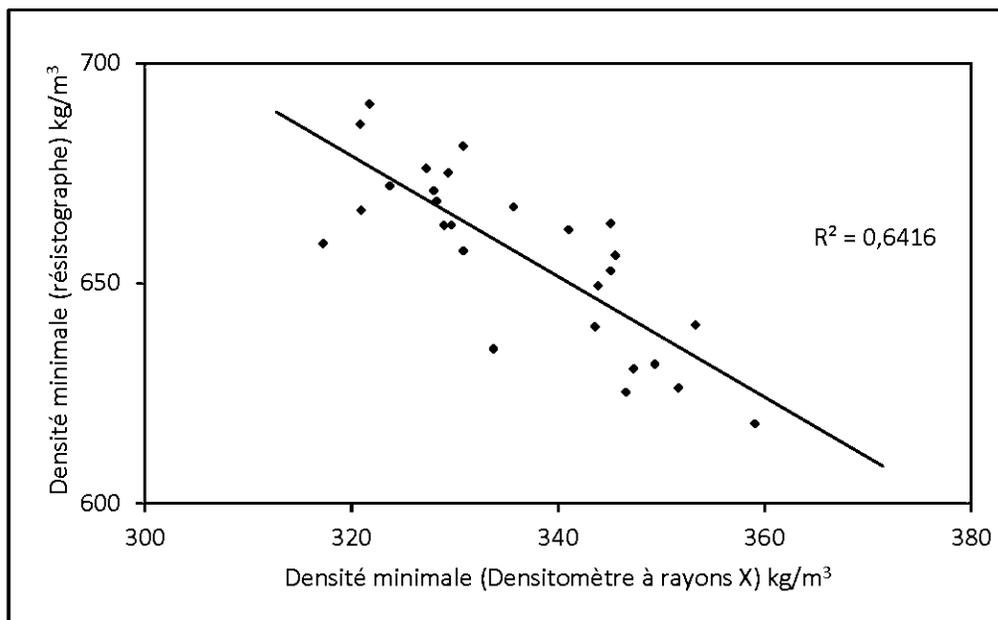


Figure 4.4 Corrélation entre les données de la densité minimale du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000)

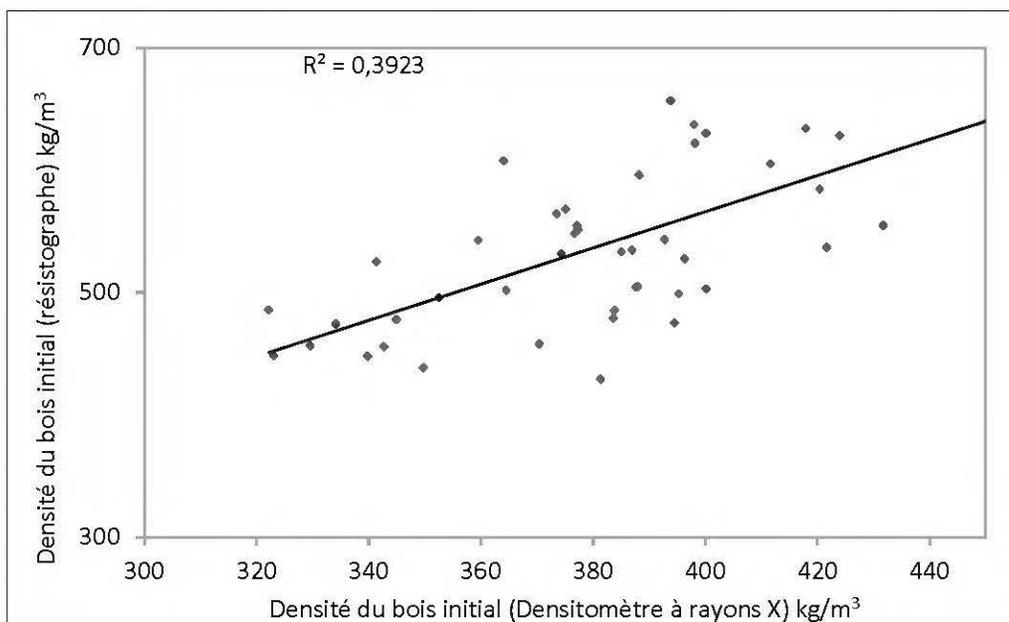


Figure 4.5 Corrélation entre les données de la densité du bois initial du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000)

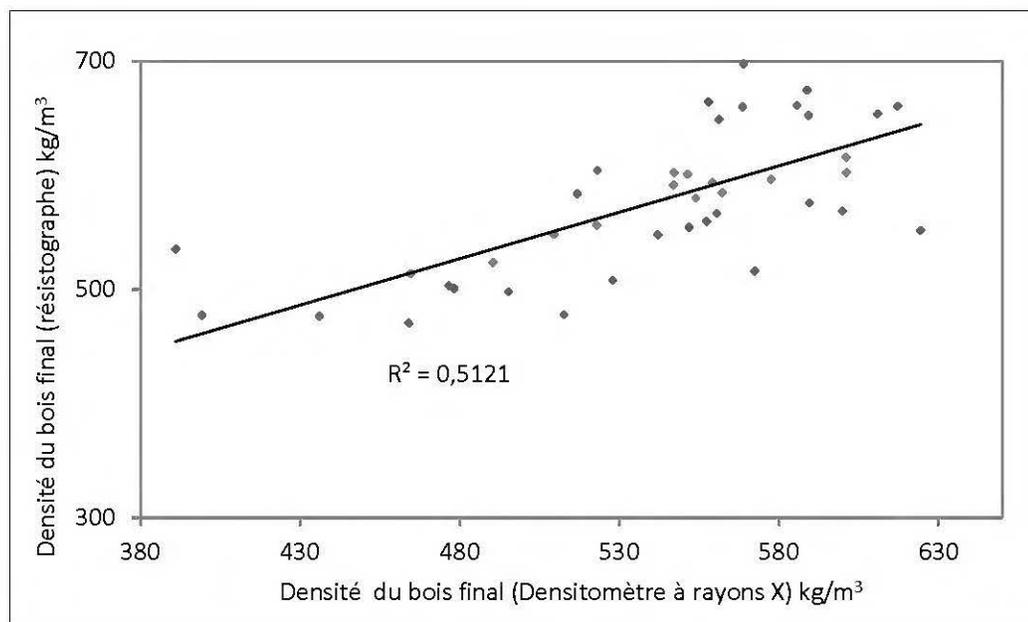


Figure 4.6 Corrélation entre les données de la densité du bois final du DRX et du résistographe pour les années de croissance (1970-2000)

4.2 Variation radiale intra-arbre de la croissance et la masse volumique : résistographe et densitomètre à rayons X

4.2.1 Mesures au densitomètre à rayons X

4.2.1.1 Profils de variations radiale de la masse volumique

A partir des profils de la variation radiale de la masse volumique du cerne et de ses composantes (Figures 4.7, 4.8 et 4.9), on constate qu'il n'y a pas de différence notable entre les valeurs moyennes de la masse volumique en fonction de l'âge cambial entre les trois sites d'échantillonnage. Les arbres provenant du site Villars ont une densité plus élevée que celle du site Muskuchi qui est encore supérieur à celle du site Cramolet mais avec un même patron de variation.

Pour un même site, le profil radial de la masse volumique du cerne et du bois initial (Figures 4.7 et 4.8) se caractérise par deux aires distinctes ; la première représente la partie du bois juvénile marqué par une légère diminution atteignant respectivement 378 kg/m³ et 329 kg/m³ pour la moyenne des trois sites durant les 10 premiers cernes. La deuxième représente le bois mature avec moins de fluctuation et une augmentation progressive en allant vers l'écorce.

Le patron de variation de la masse volumique du bois final (Figure 4.9) ne subit pas de diminution du côté de la moelle mais présente plutôt une hausse progressive puis tend à se stabiliser vers la partie du bois mature. Cette variation radiale de la masse volumique du cerne est attribuée à la variation de la largeur du cerne (Koga et Zhang, 2004). En effet, les proportions respectives du bois initial et du bois final dans un cerne de croissance influencent sur la masse volumique du bois final et par conséquent sur celle du cerne. Lorsque les cernes sont étroits, la masse volumique du cerne et du bois initial diminuent (Bouriaud et *al.*, 2005). L'augmentation de la proportion du bois final est tributaire des conditions de croissance ; durant les saisons sèches l'arbre continue à

produire du bois final qui est plus dense. Ces constatations sont en concordance avec celles de Kasraoui (2011) dans le cas du pin gris et de Ourais (2012) et Dos Santos (2014) dans le cas de l'épinette noire.

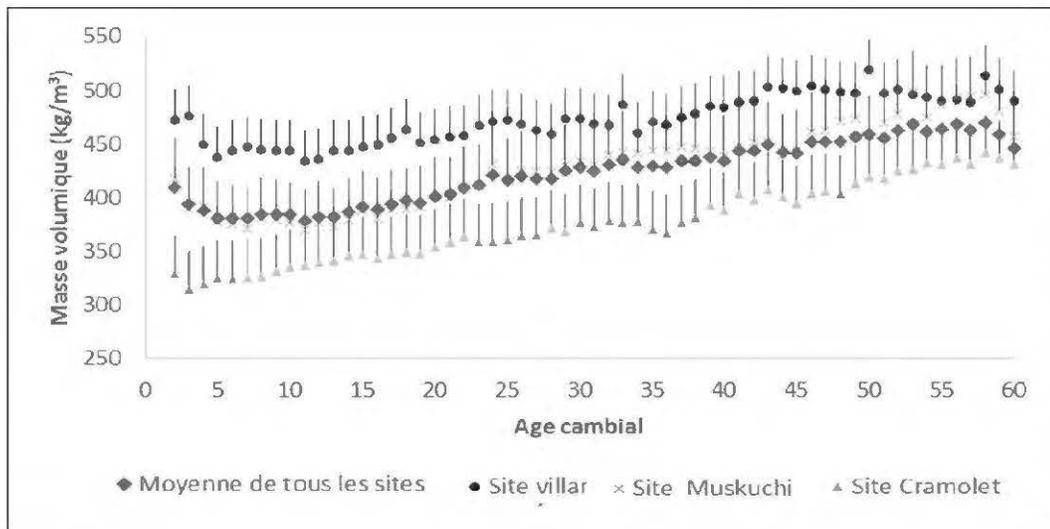


Figure 4.7 Variation radiale de la masse volumique du cerne

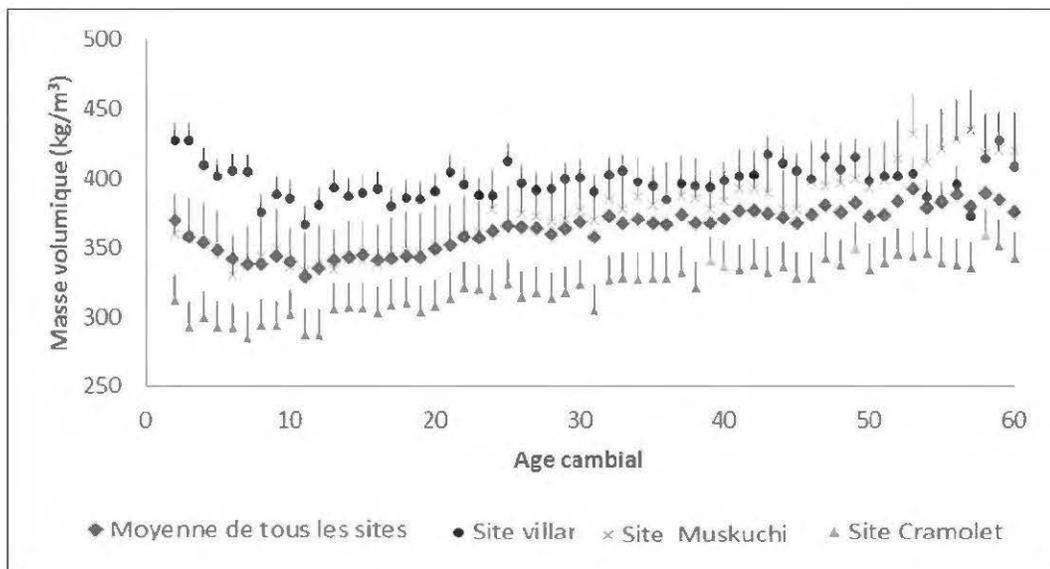


Figure 4.8 Variation radiale de la masse volumique du bois initial

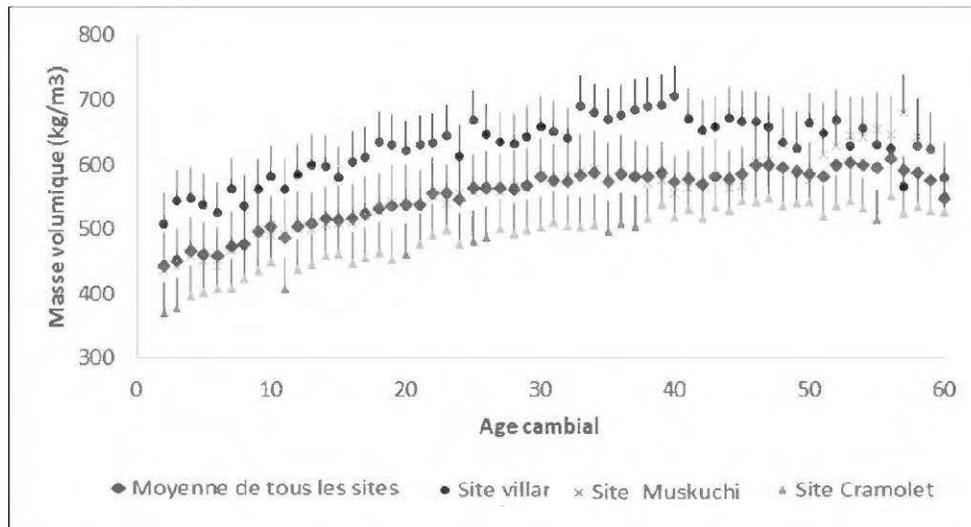


Figure 4.9 Variation radiale de la masse volumique du bois final

4.2.1.2 Profils des variations radiales de la largeur des cernes

Le profil radial de la moyenne de la largeur des cernes a été tracé pour chaque site d'échantillonnage et ce pour le cerne et ses composantes (Figures 4.10, 4.11 et 4.12). Pour une même composante du bois, les variations de la largeur en fonction de l'âge cambial suivent le même patron de variation pour les différents sites. Les arbres appartenant à un même site d'étude, sont sous l'influence des conditions environnementales similaires ce qui s'exprime au niveau de la croissance interannuelle par des réponses synchrones entre les individus du même site (Fritts et Swetnam, 1989).

Les largeurs moyennes du cerne et du bois initial suivent le même patron de variation radiale (Figure 4.10 et 4.11), contrairement au patron de variation de la largeur du bois final qui se caractérise par des valeurs qui diminuent jusqu'à atteindre une constance en allant vers l'écorce (Figure 4.12). Chez l'épinette noire, des patrons de variations similaires ont été obtenus chez l'épinette noire par Alteyrac (2005) et Koubaa *et al.*

(2005) et plus récemment dans les travaux de Ourais (2012) et Dos Santos (2014) ainsi que sur le pin gris (Kasraoui, 2011).

Le profil radial de la largeur du cerne et du bois initial pour le site Muskuchi se distingue par une augmentation minimale s'étalant sur presque les 10 premières années de croissance de l'arbre atteignant des largeurs d'environ 1,1 mm et 1,4, respectivement pour le bois initial et le cerne pour se stabiliser en allant vers l'écorce. La proportion du bois final suit une variation contraire à celle observée pour le bois initial et le cerne moyen. En effet, on remarque la largeur du bois final, pour la moyenne des trois sites diminuent considérablement de 0,7 mm jusqu'à 0,2 mm pour former presque une ligne droite à partir de l'âge cambial de 15 ans.

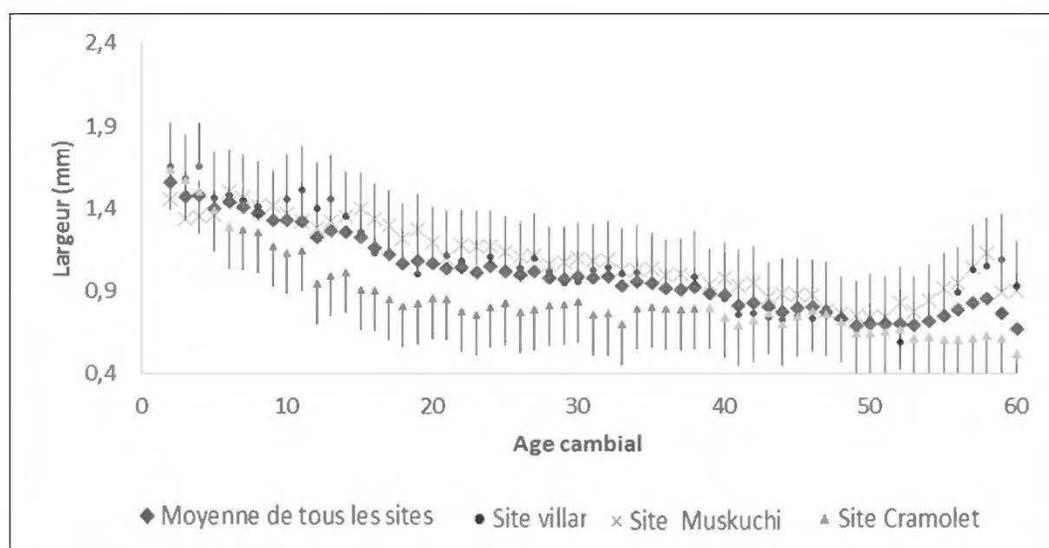


Figure 4.10 Variation radiale de la largeur moyenne du cerne au DHP (1,3 m) en fonction du site et de la moyenne de tous les sites (les barres représentent les écarts-type)

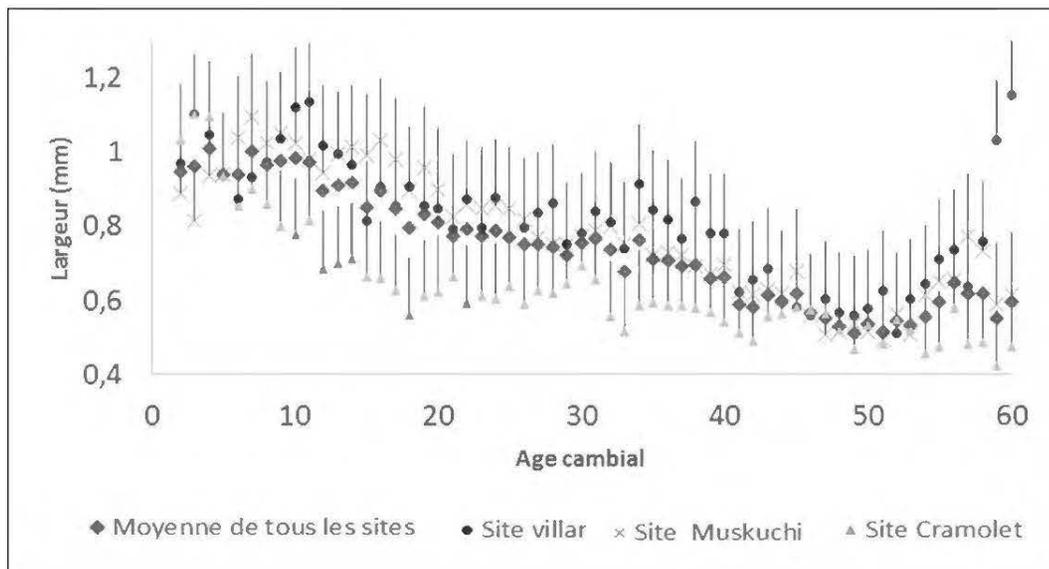


Figure 4.11 Variation radiale de la largeur du bois initial au DHP (1,3 m) en fonction du site et de la moyenne de tous les sites (les barres représentent les écarts-type)

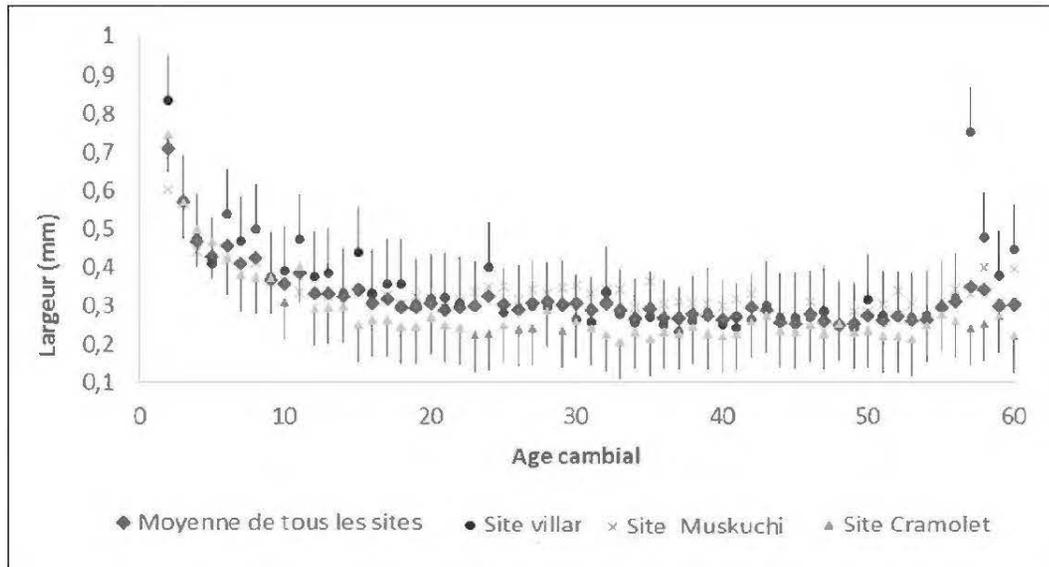


Figure 4.12 Variation radiale de la largeur du bois final au DHP (1,3 m) en fonction du site et de la moyenne de tous les sites (les barres représentent les écarts-types)

4.2.2 Comparaison des profils de variation radiale de la masse volumique et la croissance radiale résistographe et densitomètre à rayons X

4.2.2.1 Masse volumique : résistographe et densitomètre à rayons X

Les profils de variation radiale de la masse volumique du cerne et de ses composantes obtenues par le densitomètre à rayons X et les mesures du résistographe sont représentées par les Figures 4.13, 4.14 et 4.15. Les patrons de variation radiale de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final sont semblables pour les deux outils de mesure. Une description détaillée des patrons de variation des composantes de la masse volumique a été faite dans le chapitre 4.2.1.1. D'après les Figures 4.13 et 4.14, on constate une légère baisse durant les premières années de croissance de l'arbre correspondant à la partie du bois juvénile. À partir de la phase du bois mature, le profil résistographique se caractérise par une légère hausse qui peut s'expliquer par une augmentation de l'énergie consommée durant la pénétration de l'aiguille au moment de la mesure. Cette augmentation résulte en une surestimation des valeurs de résistance au perçage et donc des valeurs de densité. Aux alentours de l'écorce (environ 15 années), le profil de variation du résistographe montre quelques irrégularités qui peuvent être expliquées par le manque de stabilité de l'aiguille au moment de la pénétration à travers l'écorce.

Une étude récente menée par Oliveira *et al.* (2017) sur l'Eucalyptus dans le cadre d'un programme d'amélioration génétique a révélé que la corrélation entre l'amplitude moyenne de la résistance au perçage et la densité diminue considérablement avec l'augmentation de la profondeur de perçage. Cette diminution a été expliquée par les débris de bois qui se déposent dans la direction du perçage au moment de la pénétration de l'aiguille ce qui crée une friction ascendante consommant ainsi plus d'énergie.

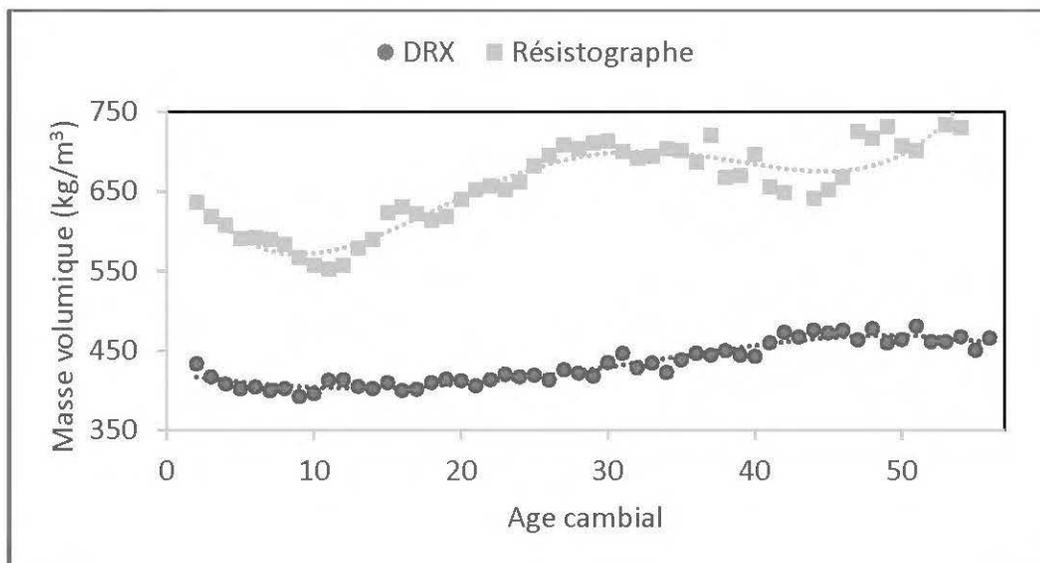


Figure 4.13 Comparaison de la variation radiale de la masse volumique du cerne pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X

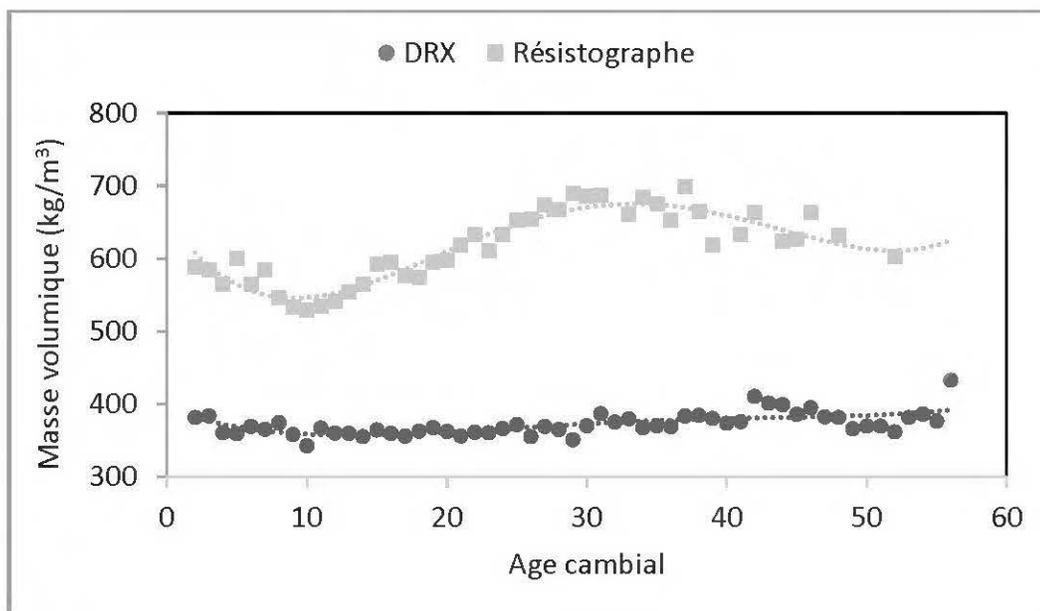


Figure 4.14 Comparaison de la variation radiale de la masse volumique du bois initial pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X

De même, les deux profils de la densité du bois final mesurée par les deux outils (Figure 4.15) montrent une tendance de variation semblable. On constate que les mesures du résistographe se caractérisent par un certain nombre d'irrégularités qui s'accroissent avec l'âge cambial. Cette tendance peut s'expliquer par l'influence de la largeur de la proportion du bois final très mince pour les cernes étroits ce qui résulte en un écart important entre les valeurs de la densité du bois final d'une année à l'autre. L'étude de Kahl *et al.* en 2009 stipule que le seuil minimum détectable des valeurs de la résistance au perçage se situe entre 100 et 200 ce qui équivaut à un minimum de $0,1 \text{ g/cm}^3$.

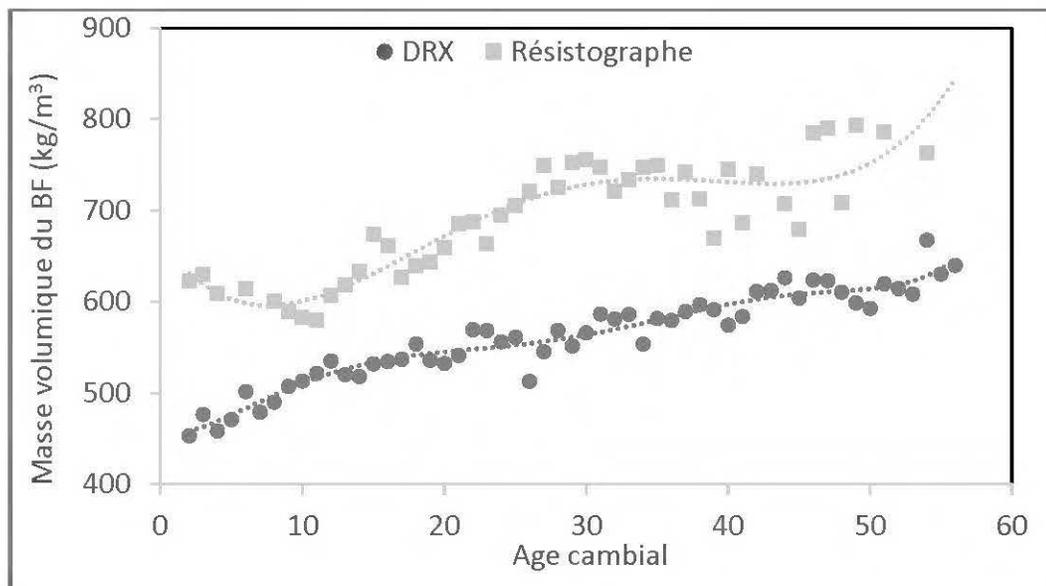


Figure 4.15 Comparaison de la variation de la masse volumique du bois final pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X

4.2.2.2 Largeur annuels des cernes de croissance : résistographe et densitomètre à rayons X

Une comparaison a été faite pour le deuxième paramètre étudié pour évaluer l'efficacité du résistographe à mesurer la variation radiale de la largeur du cerne et de ses

composantes. D'après les résultats, seuls les patrons de variations de la largeur du bois initial sont concordant (Figure 4.17). Par contre, la comparaison des deux profils de la variation radiale de la largeur moyenne du cerne et la largeur du bois final montre des patrons différents. En effet, selon les figures 4.16 et 4.18, les valeurs mesurées pour un cerne donné par le résistographe sont nettement supérieures à celles mesurées par le densitomètre à rayons X. Ce résultat s'explique principalement par la haute résolution de mesure du résistographe dont la fiabilité est fonction de la largeur du cerne de croissance. En effet, le résistographe est muni d'une résolution de l'ordre de 0.01 ce qui représente la moitié de la résolution de mesure minimale du densitomètre à rayons X qui est de 0.02. Au moment du perçage, le résistographe perçoit le signal de résistance lui permettant de définir la transition entre le bois initial et le bois final. Si la largeur du cerne est très faible, la proportion du bois final est également faible et les valeurs de résistance mesurées ne sont pas suffisantes pour délimiter la proportion du bois final. Ceci résulte en une définition imprécise du point de transition et fausse ainsi les valeurs de la largeur du bois final et par conséquent celle du cerne. Le résistographe est limité par une certaine valeur seuil de détection de la force du signal de résistance au perçage. Rinn et *al.* (1996) ont démontré que la limite minimale moyenne de la largeur mesurable par le résistographe est environ de 0,5 mm.

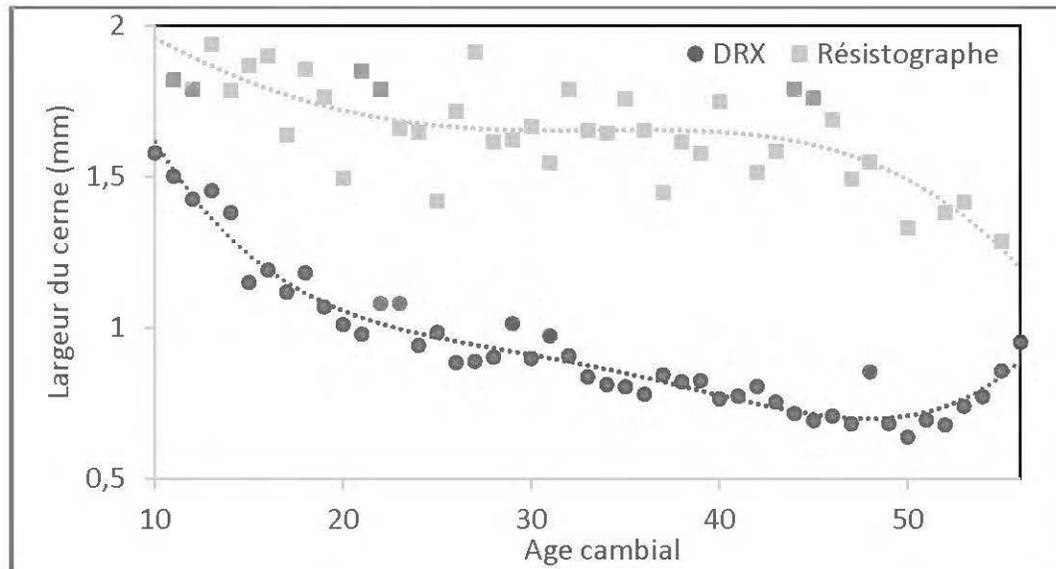


Figure 4.16 Comparaison de la variation de la largeur moyenne du cerne pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X

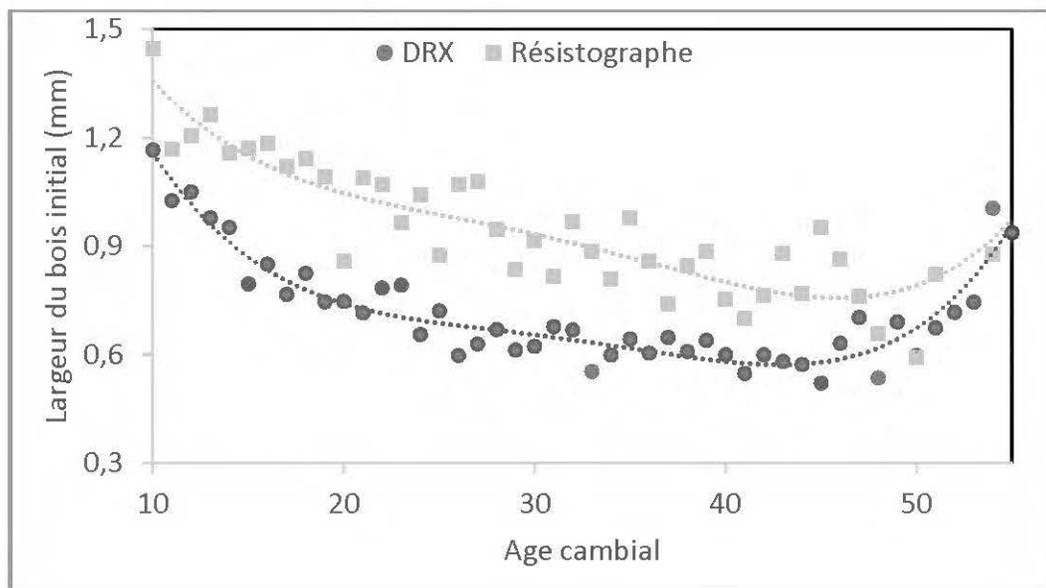


Figure 4.17 Comparaison de la variation de la largeur du bois initial pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X

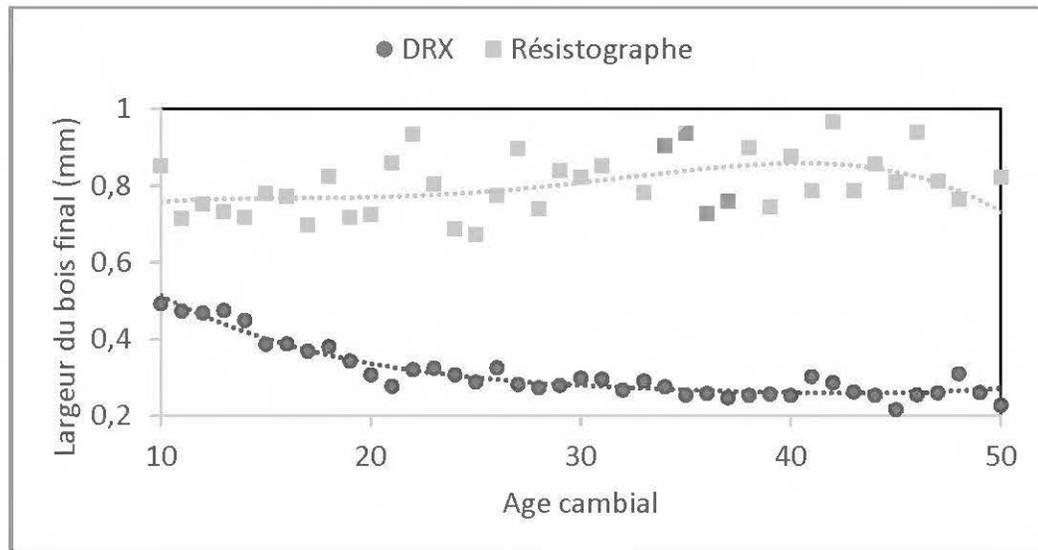


Figure 4.18 Comparaison de la variation de la largeur du bois final pour les mesures du résistographe et du densitomètre à rayons X

4.3 Effets des coupes partielles sur la croissance et la masse volumique du bois à l'échelle du peuplement

Dans cette section on s'intéresse, dans un premier temps à élucider le comportement de trois peuplements d'épinette noire suite à une coupe partielle. Pour ce faire, les données du densitomètre à rayons X ont été soumises à une analyse de variance en utilisant un modèle linéaire à effets mixtes afin d'évaluer l'effet de chaque variable explicative et des interactions entre elles sur la variable réponse en question. Par la suite, on s'est basé sur des comparaisons multiples pour déterminer les différences significatives entre les années avant et après la coupe pour chaque variable réponse, à savoir la largeur et la masse volumique du cerne et de ses composantes. Dans un deuxième temps, on s'intéresse à évaluer le potentiel du résistographe pour l'étude de l'effet de la coupe partielle sur les mêmes attributs de qualité. Ces mesures ont été prélevées à partir de seulement deux des trois sites d'étude en raison de l'inaccessibilité

du site Cramolet. Le taux de mortalité très élevé dans la plupart des placettes fortement limité l'échantillonnage de carottes et le prélèvement de mesures résistographiques.

4.3.1 Résultats obtenus par le densitomètre à rayons X

4.3.1.1 Effets des coupes partielles sur la masse volumique

Le résultat de l'analyse statistique des données (Tableau 4.2) montre que le site a un effet significatif sur la masse volumique du bois final seulement. En effet, d'après la Figure 4.19, l'analyse comparative entre les 3 sites montre que seule la largeur du bois final est significative entre le site Muskuchi et Villars. Il a été conclu précédemment (section 4.2.1.1) que la masse volumique du bois final varie selon le taux de croissance annuelle sous l'influence des conditions climatiques tandis que la masse volumique du bois initial est indépendante de ces facteurs. Ainsi, les caractéristiques climatiques propres à chacun des deux sites peuvent être à l'origine de la différence significative de la masse volumique du bois final.

Tableau 4.2 Résultats de l'analyse de variance d'un modèle mixte pour interpréter l'effet des différentes variables explicatives sur la masse volumique du cerne et de ses composantes (Valeur de p pour un seuil de significativité $\alpha = 0,05$ ns : non significatif)

Facteurs	Masse volumique du		
	cerne	bois initial	bois final
Site	ns	ns	0,0034
% Récolte (R)	ns	ns	ns
DHP	0,0012	0,0087	ns
Age de l'arbre	0,00064	0,0013	0,0025
Temps après CP (T)	ns	ns	ns
R x T_Age	0,00024	0,0007	0,00075
R x T	ns	ns	ns
R x DHP	ns	ns	ns

Les valeurs des masses volumiques du cerne et de ses composantes sont quasi égales entre les trois sites d'étude avec une légère hausse dans le bois final au niveau du site

Villars se trouvant plus au sud et qui s'avère non significative en comparant avec les deux autres sites.

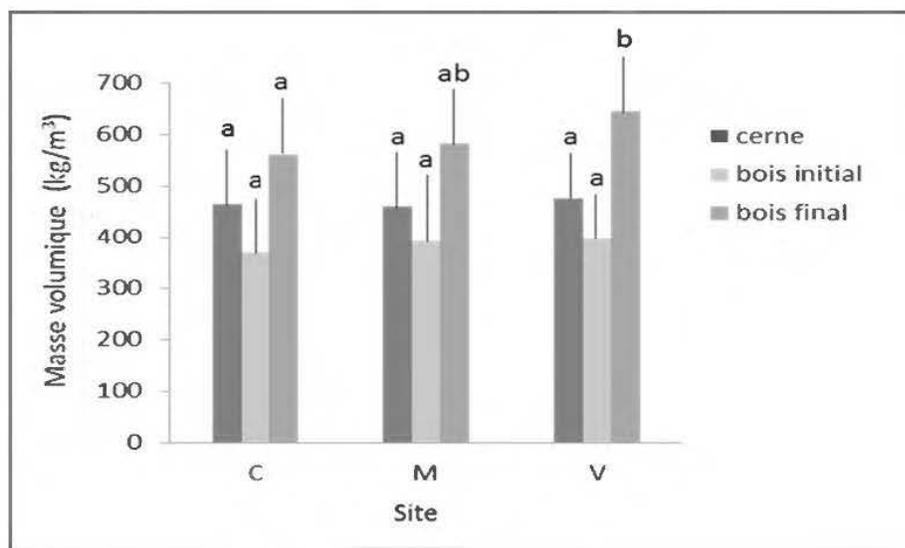


Figure 4.19 Variation de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final en fonction du site

L'âge de l'arbre est un facteur ayant un effet significatif sur la masse volumique du cerne et de ses composantes. Cet effet s'observe chez les arbres âgés de 60 ans (Figure 4.20), dont les masses volumiques du cerne et du bois initial diffèrent significativement de celles chez les arbres âgés de 30, 40 et 50 ans. Cependant, il ne semble pas y avoir de différence significative entre les catégories d'âges pour la masse volumique du bois final. Ces résultats pourraient être en relation avec le patron de variation radiale de la masse volumique en fonction de l'âge de l'arbre. En effet, la masse volumique du cerne et du bois initial sont quasi-constantes à partir des 10 premières années de croissance avec une légère augmentation du côté de l'écorce. La formation de cernes uniformes et larges avec une transition abrupte à un âge avancé (60 ans) peut contribuer à une augmentation de la masse volumique du cerne et du bois initial. Dans le modèle global,

on n'a pas tenu compte de la variable âge cambial étant donné sa forte corrélation avec l'âge de l'arbre et le diamètre à hauteur de DHP.

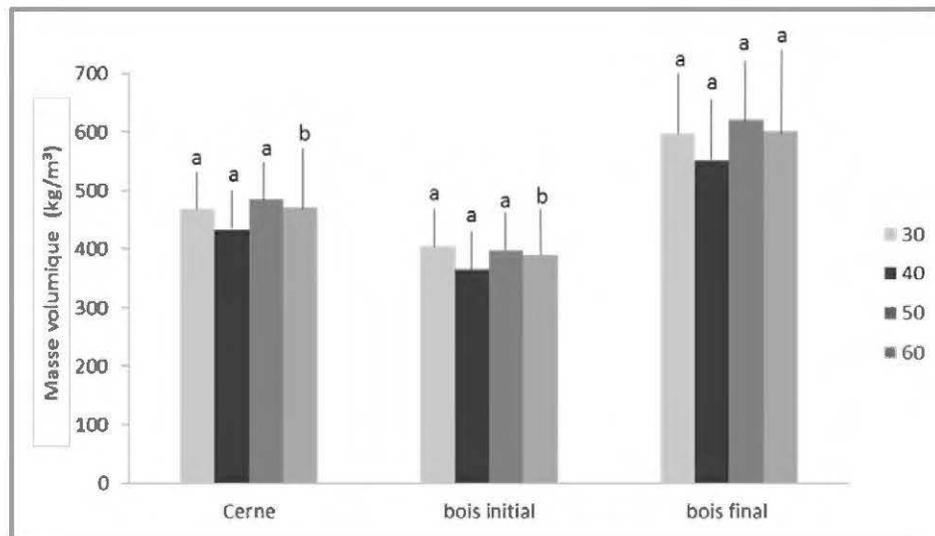


Figure 4.20 Variation de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge de l'arbre

Le facteur âge de l'arbre en interaction avec l'intensité de traitement a un effet significatif sur le cerne et ses composantes. Cet effet est observé pour les peuplements âgés de 60 ans et plus, ayant subi un fort prélèvement (Figure 4.21). En effet, la valeur moyenne de la masse volumique est significativement différente pour cette classe d'âge par rapport aux autres classes (30, 40, et 50 ans). Les traitements d'intensité faible et modéré ne présentent pas de différences significatives entre les 4 classes d'âges étudiées. En dépit des valeurs de la masse volumique plus élevées des arbres les plus âgés ayant subi une coupe sévère, il n'y a pas d'implication pratique à retenir ou un gain de masse volumique important.

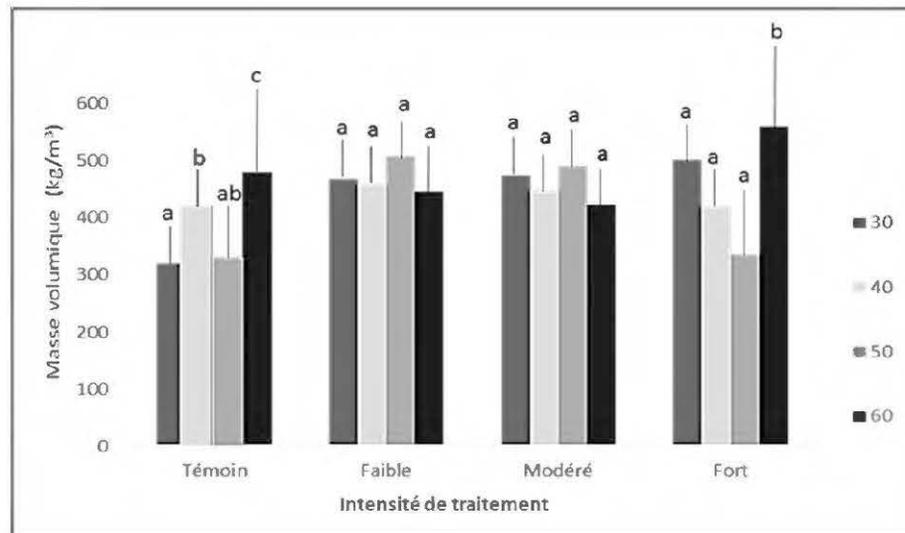


Figure 4.21 Effets de l'intensité du traitement sur la masse volumique moyenne du cerne en fonction de la classe d'âge de l'arbre

Le diamètre de l'arbre a un effet significatif uniquement sur la masse volumique du cerne et du bois initial qui se traduit par des différences significatives entre les 4 classes de DHP pour une même propriété (Figure 4.22). Les arbres appartenant à la classe C2 atteignent des valeurs maximales de masse volumique du cerne et de bois initial de 494 et 415 kg/m³, respectivement alors que ceux de la classe C3 sont de 422 et 354 kg/m³ pour le cerne et le bois initial, respectivement. D'après ces résultats, on peut dire qu'en dépit d'une différence significative de la masse volumique il n'y a pas d'impact notable sur la valeur moyenne de la masse volumique du cerne chez l'épinette noire quantifiée à 450 kg/m³ dans la littérature (Koubaa et Coll, 2000).

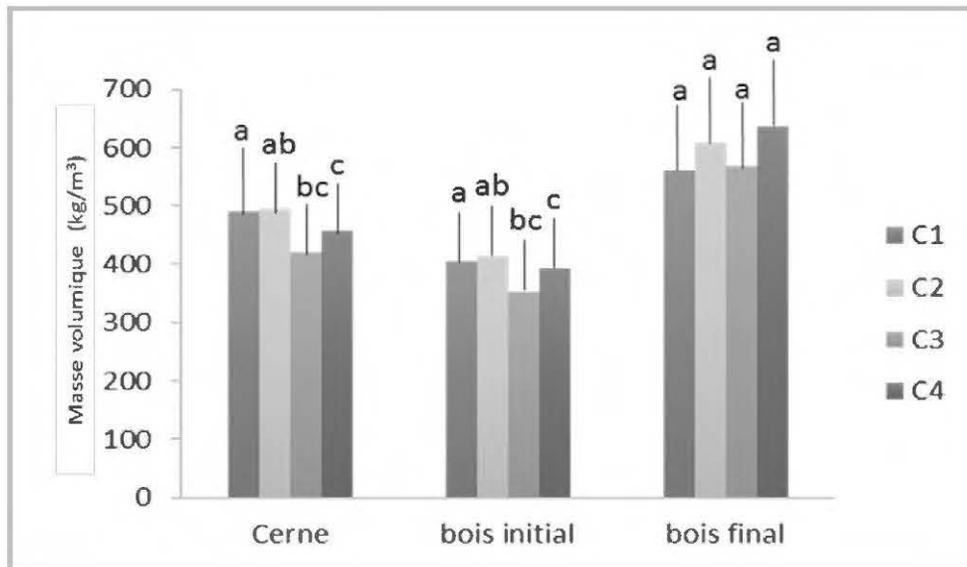


Figure 4.22 Variation de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de la classe de DHP

Selon le Tableau 4.2, le temps écoulé depuis l'éclaircie n'a pas un effet significatif sur la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final. Cette absence d'effet pourrait être expliquée par le fait que les conditions climatiques (températures, précipitations, etc.) qui varient entre les années après traitement n'affecte pas les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final d'épinette noire même si cet effet a été observé sur la largeur du cerne et de ses composantes. Ces résultats sont différents de ceux trouvés par Ourais (2012) pour l'épinette noire et par Kasraoui (2011) pour le pin gris où l'effet du temps après coupe était significatif.

La Figure 4.23, permet de voir l'évolution de la masse volumique moyenne à moyen terme (4 ans après coupe) pour chacune des trois intensités de coupe. Contrairement à la croissance radiale, l'interaction entre le traitement et le temps après intervention n'est pas significative sur la masse volumique du cerne et de ses composantes. Pour les traitements faible et modéré on observe une légère diminution de la masse volumique

survenant à l'année qui succède la coupe partielle. Cette diminution n'a pas d'effet significatif sur la masse volumique moyenne du cerne. L'éclaircie de forte intensité induit une légère hausse des valeurs de la masse volumique une année après coupe. Cette différence des valeurs de masse volumique durant les 4 années suivant la coupe n'est pas significative et n'a pas un impact important sur cette propriété.

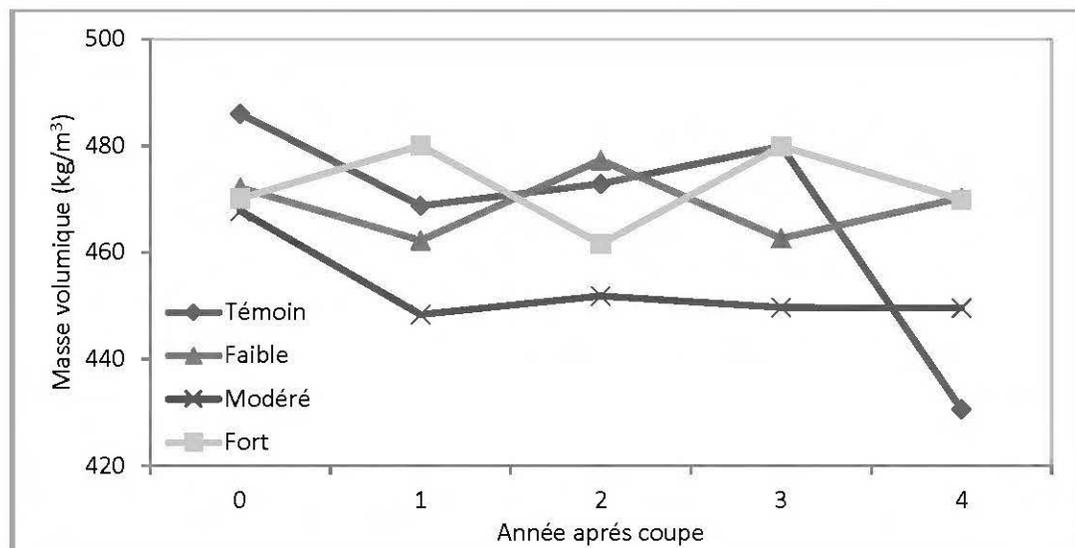


Figure 4.23 Effets de l'intensité du traitement sur la masse volumique moyenne du cerne en fonction du temps après coupe

4.3.1.2 Effets des coupes partielles sur la largeur du cerne

L'analyse de variance (Tableau 4.3) révèle que l'effet du site sur la croissance radiale est significatif. Les trois sites d'étude présentent des caractéristiques différentes telles que le type du sol, la végétation en sous-bois ainsi que les possibilités d'association avec d'autres essences, résineuses ou feuillues. Les sites Muskuchi et Cramolet appartiennent au domaine de la pessière à mousse. Ils forment des peuplements mono spécifiques et se caractérisent par des peuplements très denses. En dépit de la proximité géographique, chacun des deux sites présente des propriétés distinctes. En effet, le

peuplement d'épinette noire localisé plus au nord (site Muskuchi) pousse sur un sol bien drainé et productif ce qui expliquerait que les moyennes des largeurs des cernes et de ses composantes soient plus importantes dans ce site en comparaison avec le site Cramolet où le drainage est moins bon avec des peuplements purs d'épinettes (Figure 4.24). Le site Villars renferme plutôt des peuplements mixtes ce qui augmente la compétition entre les espèces sur des sols mésiques et par conséquent influence négativement la croissance de l'épinette noire. L'effet de l'intensité de coupe sur la croissance est contrairement non significatif (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 Résultats de l'analyse de variance d'un modèle mixte pour interpréter l'effet des différentes variables explicatives sur la largeur du cerne et de ses composantes (Valeur de p pour un seuil de significativité $\alpha = 0,05$ ns : non significatif)

Facteurs	Largeur moyenne du		
	cerne	bois initial	bois final
Site	0,058	0,0095	0,034
% Récolte (R)	ns	ns	ns
DHP	0,00056	0,0033	ns
Age de l'arbre	0,00071	0,0013	0,0025
Temps après CP (T)	0,00042	0,00065	0,00024
R x T_Age	0,00038	ns	0,00044
R x T	0,00087	0,0024	ns
R x DHP	0,0025	0,0061	ns

Cependant, il est important de tenir compte, qu'en dépit de ces constatations, l'effet du traitement sur les largeurs des cernes dans chacun des sites d'études pourrait être mieux élucidé en ayant un plus grand nombre d'échantillons par site et une répartition équilibrée des différentes intensités de traitement couvrant les quatre classes de DHP. Dans ce cas, l'interaction du site avec le traitement pourrait être intégrée dans le modèle globale d'analyse de variance.

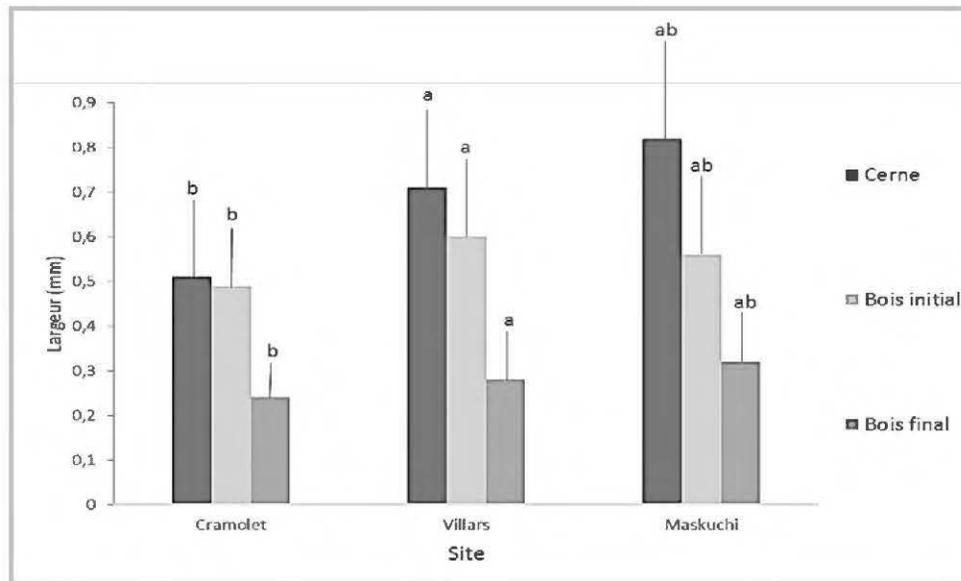


Figure 4.24 Variation de la largeur du cerne, du bois initial et du bois final en fonction du site

L'effet du temps sur les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final est significatif (Tableau 4.3). Cet effet peut s'expliquer par les variations des conditions de croissance d'une année à une autre tout particulièrement la température et la pluviométrie qui ont une influence directe sur le taux de croissance annuelle intra cernes chez l'épinette noire (Dang et Lieffers, 1989). L'effet du traitement couplé à la variable temps s'est avéré également significatif pour la largeur du cerne et du bois initial. Cela dit, pour la largeur du bois final l'interaction entre le traitement et le temps n'est pas significative puisque la largeur du bois final est modulée par les conditions de croissance d'une année à une autre et non pas sous l'effet d'une intervention sylvicole. La figure 4.25 montre une faible baisse des valeurs moyennes de la largeur du cerne au courant de la première année après la coupe. Cette baisse est observée dans les traitements faible, modéré et fort. À partir de la deuxième année après coupe, on note une augmentation progressive des valeurs de la largeur moyenne du cerne pour les trois intensités de coupe jusqu'à atteindre les valeurs moyennes initiales.

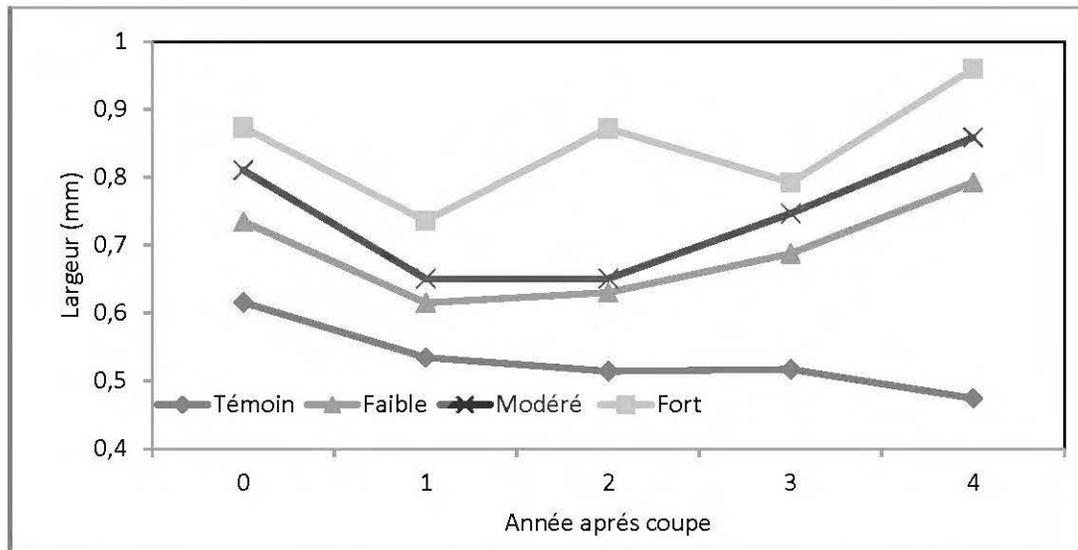


Figure 4.25 Effets de l'intensité du traitement sur la largeur moyenne du cerne en fonction du temps après coupe

L'effet de l'âge de l'arbre sur les largeurs du cerne et de ses composantes est significatif. Cet effet est lié aux variations intra-arbres de la largeur des cernes et du bois initial observées précédemment (Section 4.1.1) et montrant une diminution de la largeur moyenne jusqu'à la phase du bois mature. Au-delà d'environ 30 années de croissance, l'arbre reprend une croissance constante d'où les valeurs similaires et une différence non significative qu'on observe dans la Figure 4.26 et ce pour les arbres âgés de 40, 50 et 60 ans. Ceci dit, les arbres âgés de 50 et 60 ans présentent des différences significatives pour la largeur du bois final. Ceci s'expliquerait par le patron de variation intra-arbre de la croissance radiale qui, tel que précédemment montrés, indique que les largeurs du cerne et du bois initial diminuent avec l'âge en allant de la moelle vers l'écorce et tendent vers une constance. La variation radiale de la croissance est très faible dans le bois mature ce qui est particulièrement vrai pour la proportion du bois final.

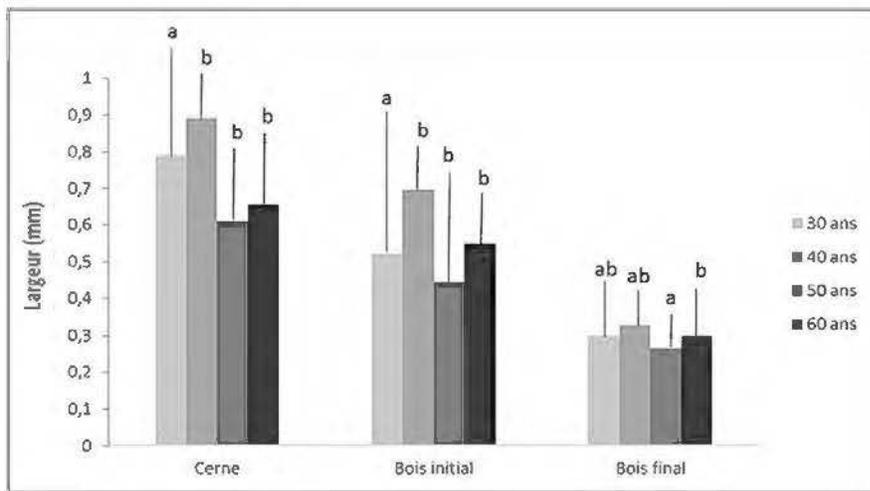


Figure 4.26 Variation de la largeur du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de l'âge de l'arbre

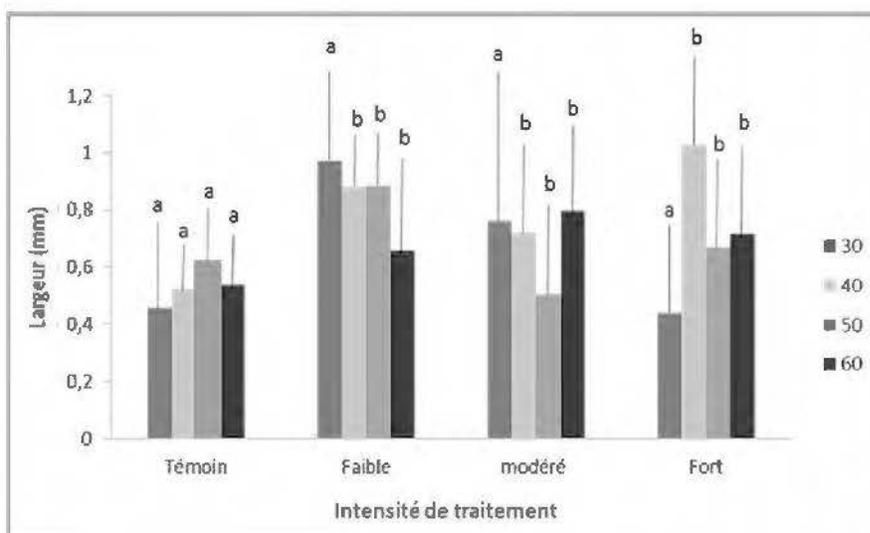


Figure 4.27 Effets de l'intensité du traitement sur la largeur moyenne du cerne en fonction de la classe d'âge de l'arbre

La coupe partielle, s'exprimant par un pourcentage de prélèvement de la surface terrière (R), a un effet significatif considérant son interaction avec l'âge de l'arbre et le DHP. L'interaction $R \times T_Age$ est significative pour les largeurs du cerne et du bois final. Cet effet serait dû au fait que le temps de réaction manifesté par l'arbre suite à

une coupe partielle s'observe à la fin de l'année de croissance c.à.d. dans la proportion du bois final. La figure 4.27 montre que les arbres les plus jeunes ayant moins de 30 ans réagissent aux trois intensités de coupes tandis que les arbres les plus âgés ne semblent pas être affectés par la coupe partielle. Pour cette même catégorie d'âge, les valeurs moyennes des largeurs des cernes sont de 0,97, 0,76 et 0,44 mm, respectivement pour les traitements faible, modéré et fort alors que la valeur moyenne pour le peuplement témoin est de 0,45 mm. Ces résultats nous amènent à dire que pour des intensités de traitement faible à modéré, la largeur moyenne des cernes augmente pour les arbres âgés de 30 ans environ. Cette augmentation est inversement proportionnelle à l'intensité de traitement. En effet, une forte intensité de coupe, la croissance était semblable au peuplement témoin à l'exception des arbres âgés de 40 ans.

La classe de DHP a un effet significatif sur la largeur du cerne et du bois initial. Selon la Figure 4.28, les largeurs des cernes et du bois initial des arbres sont supérieures pour les arbres dont le DHP est supérieur à 9 cm mais il n'y a pas de différence significative entre les 3 classes de DHP C2, C3, C4. La classe de diamètre n'a pas d'effet significatif sur la largeur du bois final. D'ailleurs les valeurs de la largeur du bois final sont presque les mêmes pour les 4 classes de diamètre. De même, le tableau d'analyse de variance révèle un effet significatif de l'interaction du traitement avec le DHP pour la largeur du cerne et du bois initial. Selon la figure 4.29, il existe une différence significative entre la classe C1 qui représente les plus petits diamètres et les trois autres classes de diamètres au DHP. Les arbres appartenant à la classe C1 ne présentent pas une variabilité importante des valeurs de la largeur du cerne en comparant chaque intensité de coupe avec le témoin. D'ailleurs, il n'existe pas une relation entre l'intensité de coupe appliqué et la largeur du cerne des arbres appartenant à la classe C1. En effet, la largeur du cerne augmente légèrement pour le traitement faible et modéré et diminue pour le traitement fort. Ceci dit, il n'y a pas de gain de croissance important pour les trois intensités de coupes par rapport au témoin.

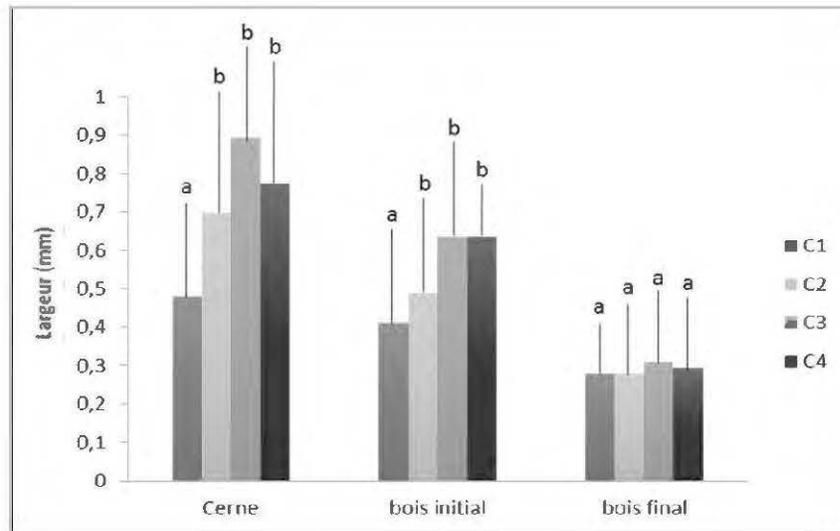


Figure 4.28 Variation de la largeur du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de la classe de DHP

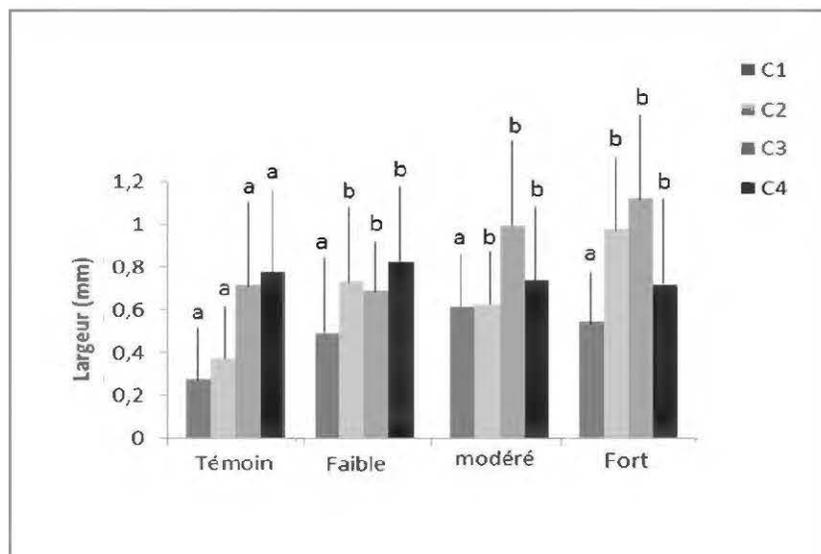


Figure 4.29 Effets de l'intensité du traitement sur la largeur moyenne du cerne en fonction de la classe de DHP

Conclusion sur les effets de la coupe partielle sur la qualité du bois par les outils conventionnels :

L'analyse statistique des résultats a permis d'étudier la réponse de l'épinette noire à différentes intensités de traitements de coupe partielle en tenant compte d'un certain nombre de variables. Parmi ces variables, l'âge de l'arbre s'est avéré important dans la mesure où la largeur des cernes des vieux individus (âge supérieur à 30 ans) n'est pas affectée par la coupe partielle indépendamment de son intensité. Le DHP de l'arbre est aussi une variable qui conditionne la réponse des arbres. En effet, les individus au DHP supérieur à 9 cm présentent une largeur des cernes plus élevée. Les arbres âgés de 60 ans et plus ont connu une augmentation de la masse volumique à la suite d'un prélèvement intense. En dépit de ces constats, il n'y a pas d'effets notables sur la qualité du bois. Ces conclusions concordent parfaitement avec celles d'études antérieures sur la même essence (Dos Santos (2014), Ourais (2012) et Pamerleau-Couture (2010)).

Le nombre d'interactions entre les variables explicatives a été fortement limité par un nombre d'échantillons réduit à cause d'un taux de mortalité élevé. De plus, le dispositif d'échantillonnage présente un déséquilibre ne couvrant pas parfaitement les 3 intensités de traitements dans chacun des trois sites d'étude. En raison de ces limites, il a été impossible de juger de l'effet de la coupe partielle sur les attributs de qualité du bois à l'échelle des peuplements.

4.3.2 Évaluation de l'effet de la coupe partielle sur la qualité du bois par mesures au résistographe

L'étude de la variation radiale de la masse volumique et de la largeur du cerne par les mesures du résistographe ont permis de mettre en évidence que le résistographe est un outil fiable pour l'estimation des propriétés moyennes intra-arbres du bois. Ce constat laisse à supposer que le résistographe serait un outil performant pour étudier l'effet de la coupe partielle sur la masse volumique du bois et la largeur du cerne. L'évaluation de l'effet de la coupe partielle repose principalement sur la comparaison des attributs de la qualité du bois avant (2 années) et après (4 années) la coupe.

Le modèle statistique utilisé pour étudier l'effet de la coupe partielle par les mesures du densitomètre à rayons X (paragraphe 2.7) a été adopté pour analyser les mesures du résistographe. L'effet du site n'a pas été étudié dans cette analyse étant donné l'absence de donnée du résistographe sur un des sites d'étude. Cette analyse s'est basée sur les mêmes variables à savoir : la classe de DHP, l'intensité du traitement, l'âge de l'arbre ainsi que les facteurs d'interactions détaillés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.4 Comparaison des résultats de l'analyse de variance d'un modèle mixte entre les mesures du densitomètre à rayons X et le résistographe pour interpréter l'effet des différentes variables explicatives sur la masse volumique et la largeur du cerne (Valeur de p pour un seuil de significativité $\alpha = 0,05$; ns : non significatif)

	Masse volumique moyenne		Largeur moyenne du cerne	
	DRX	Résistographe	DRX	Résistographe
% RÉCOLTE (R)	ns	ns	ns	ns
DHP	0,0023	0,0077	0,00045	0,00037
AGE DE L'ARBRE	0,0057	0,00021	0,00076	0,0035
TEMPS APRÈS CP (T)	ns	ns	0,00064	0,00042
R x T_AGE	0,00091	0,0045	0,00073	0,00051
R x T	ns	ns	0,00068	0,00034
R x DHP	ns	ns	0,0084	0,0046

La comparaison des effets significatifs et non significatifs de chaque variable explicative sur les paramètres étudiés montre que les mesures réalisées par le résistographe mènent aux mêmes résultats que ceux obtenus pour le densitomètre à rayons X. En effet, l'intensité de traitement, le DHP, l'âge de l'arbre ainsi que l'interaction entre l'intensité de traitement et l'âge de l'arbre ont des effets significatifs sur la masse volumique du cerne. Ces variables ont également un effet significatif sur la largeur moyenne du cerne. Pour les fins de la comparaison, seules les valeurs moyennes de la masse volumique et de la largeur des cernes ont été étudiées. La

comparaison entre les deux outils de mesures pour l'analyse des moyennes du bois initial et du bois final ne s'est pas révélée très concluante.

L'étude de Chantre et Rozenberg (1997) visait à savoir si les mesures de la résistance au perçage peuvent mener à une bonne quantification des paramètres de densité au sein d'un profil et à l'échelle intra-cerne dans le cas du sapin Douglas issu d'un traitement d'éclaircie. La méthodologie étant basée sur une sélection d'arbres sains, les résultats de comparaison des deux outils de mesures ont révélés de bons à d'excellents coefficients de corrélations pour la plupart des paramètres inter-arbres mais plutôt faibles pour les paramètres intra-cerne. Wang et *al.* (2003) ont étudiés les variations intra-cernes de la densité dans des plantations de *Taiwania* mettant en évidence les différences traduites par la proportion du bois initial et du bois final ainsi que les effets de l'éclaircie sur la densité et la croissance radiale. L'utilisation du résistographe s'est avérée très concluante pour étudier l'impact de ces traitements sylvicoles sur la qualité du bois. Le matériel ligneux utilisé dans le cadre de cette étude est issue d'une plantation (peuplement équiens) et les mesures du résistographe ont été obtenues sur des échantillons extraits à partir de rondelles.

Dans le cas de la présente étude, le choix des arbres échantillonner et mesurés par le résistographe a été conditionné par un dispositif de traitement de coupe partielle mis en place depuis plusieurs années. Il a été noté que les sites échantillonnés présentaient un taux de mortalité très élevé ainsi qu'une forte vulnérabilité aux attaques de champignons ce qui rend la sélection d'arbres sains plus difficile. Le réseau de coupe se caractérise également par des peuplements inéquiens avec une moyenne d'âge très variable (20 à 101 ans). Ces propriétés représentent certaines limites quant à l'efficacité des mesures au résistographe qui semble mieux s'adapter aux peuplements équiens et aux plantations à croissance plus régulière. Les caractéristiques topographiques des sites d'étude sont marquées par des pentes accentuées. Ceci favorise l'exposition des arbres au vent, l'occurrence de nœud et une croissance radiale marquée par des cernes

très étroits. Dans ces conditions, les profils résistographiques sont difficilement interprétables à cause de la perte de l'information sur un ou plusieurs cernes de croissance. Or, l'évaluation de l'effet d'un traitement sylvicole sur les attributs de qualité du bois d'une essence donnée, exige une analyse précise des paramètres intra cernes des années précédant et suivant la coupe. Ceci suggère, que pour étudier l'effet de la coupe partielle sur l'épinette noire en utilisant le résistographe, le choix d'individus à échantillonner devrait être axé sur des arbres bien portants et qui paraissent sains. La stabilité de l'opérateur (stabilité de la mèche à l'horizontale), la température de l'air et un perçage s'éloignant d'au moins 3 cm d'un nœud sont tous des facteurs à considérer pour obtenir de meilleures valeurs de densité et minimiser les erreurs de mesure (Ukrainetz et O'Neill, 2010). Le maintien de la vitesse de perçage de l'aiguille à une valeur constante durant toutes les mesures (30 cm/min) pourrait également fausser la lecture du profil résistographique. Selon Matteck et *al.* (1997), le perçage à une vitesse inférieure chez le pin (40 cm/min) donne une résolution nettement meilleure de la croissance radiale annuelle. En effet, à une vitesse de 60 cm/min, la mesure sur la même espèce est quasi-illisible avec une amplitude élevée et presque constante.

L'analyse des mesures du résistographe permet de conclure que pour un bois sec, la résistance au perçage est fortement corrélée à la densité brute du bois (Rinn, 1994). Cependant, pour un bois vert, tenir compte du facteur d'humidité est important pour l'analyse du profil de variations radial de la densité et la délimitation des cernes de croissance. D'autres facteurs doivent être considérés avant de se baser sur les résultats du résistographe. En effet, la déviation de l'angle de perçage du plan perpendiculaire, la présence de bois de compression et les arbres comportant des cernes très étroits sont tous des facteurs limitant une bonne lecture des profils résistographiques et par conséquent, un échantillonnage conventionnel (carottage) est nécessaire (Rinn et *al.*, 1996).

Les résultats de la présente étude ont démontré que l'utilisation du résistographe à des fins d'évaluation de la qualité du bois de peuplements issus d'un traitement sylvicole est possible. La fiabilité de cet outil est intimement liée au contrôle de plusieurs paramètres se rapportant à l'aire d'étude, la maîtrise opérationnelle de la mesure ainsi qu'aux caractéristiques propres de l'essence en question. Un projet en cours vise à amorcer et expliquer les différences existantes entre plusieurs espèces résineuses. À date, des mesures opérées par le résistographe sur des échantillons d'épinettes blanches semblent donner une meilleure précision comparativement à celles du densitomètre à rayons X.

4.4 Retombées du projet

Ce projet présente un caractère multidisciplinaire liant à la fois la sylviculture et les méthodes non destructives de la caractérisation de la qualité du bois issus de forêts aménagées en peuplements irréguliers.

L'originalité du présent travail émane de l'intérêt qu'il porte aux effets des coupes partielles sur la qualité du bois dans des peuplements en pessière à mousse. Cette pratique sylvicole est devenue récemment le centre d'intérêt des responsables du Ministère des forêts, de la faune et des parcs (MFFP) et pourrait donc constituer une alternative permettant l'atteinte des objectifs des programmes d'aménagements forestiers au Québec et ce par l'amélioration des connaissances sur ce type de traitement sylvicole mais également par l'optimisation de son utilisation en forêt boréale.

Cette étude a permis de souligner l'importance des caractéristiques des stations et des peuplements en relation avec le choix du traitement sylvicole et les intensités optimales de traitements. Les résultats de ce travail ont mis en évidence que pour les peuplements vieux, la coupe partielle n'a pas d'effet significatif qu'on pourrait retenir et valoriser

dans l'exploitation de la forêt. La coupe partielle pourrait être probablement la cause d'un taux élevé de mortalité chez des peuplements inéquiennes et vieux. Parmi les arbres échantillonnés, seuls ceux appartenant à la catégorie la plus jeune (environ 30 ans) ont été marqués par une augmentation de la croissance radiale à la suite d'un traitement faible et moyen. Par contre, seuls les individus les plus âgés (60 ans et plus) ont été marqués par une augmentation de la masse volumique du bois dans le cas d'un traitement fort. En dépit de ces constats, un taux élevé de prélèvement de tiges ne présente pas d'implications pratiques pour les industriels et ne garantit pas la récolte d'un bois plus dense. Bien que l'effet du site n'ait pu être mis en évidence en interaction avec l'intensité du traitement, on a pu constater que la croissance radiale et la masse volumique varient en fonction du site d'échantillonnage. En l'absence d'un nombre plus élevé d'échantillons et l'intégration de divers facteurs liés aux caractéristiques des sites, il serait difficile de juger de l'impact de la coupe partielle à l'échelle des peuplements.

Cette étude présente un caractère innovateur puisqu'elle traite du potentiel de l'utilisation des outils non destructifs en forêt boréale. Les résultats obtenus ont permis de souligner le bon potentiel du résistographe pour l'estimation de la qualité moyenne du bois à l'échelle de l'arbre. Cet outil serait ainsi un moyen fiable, rapide et économique pour caractériser des propriétés du bois de manière globale. Ceci est possible grâce à une bonne concordance des profils de variations radiales des paramètres inter et intra arbres de la masse volumique et de la largeur des cernes mesurés par le résistographe et le densitomètre à rayons X. Le résistographe a également montré une bonne fiabilité dans l'évaluation de l'impact d'un traitement sylvicoles mais seulement pour les paramètres moyens du cerne. Bien que le résistographe ne soit pas encore à point pour conclure sur les propriétés intra-cerne, on a pu observer une bonne corrélation entre les mesures résistographiques et celles du densitomètre à rayons X pour les paramètres intra-arbre. L'amélioration des coefficients de corrélations des mesures de la largeur des cernes, nécessite un

échantillonnage sélectif. Le choix d'arbres sains, présentant le moins d'anomalies permettra ainsi d'exploiter au maximum le potentiel du résistographe.

CHAPITRE V

CONCLUSION

Les attributs de la qualité du bois de l'épinette noire ont été étudiés sur trois peuplements issus d'une coupe partielle. À l'échelle de l'arbre, les variations radiales de la masse volumique et de la largeur des cernes ont montré un même patron de variation entre les trois sites. D'une manière générale, les variations radiales se caractérisent par des variations plus accentuées durant environ les 15 premières années de l'arbre puis tendent à se stabiliser dans la partie du bois mature. À l'échelle du cerne, la croissance radiale augmente sous l'effet d'une coupe partielle mais cette augmentation n'est pas proportionnelle à l'augmentation de l'intensité du traitement. Ceci est particulièrement vrai si on tient compte de l'âge de l'arbre. En effet, seules les tiges âgées de 30 ans et moins ont réagi positivement en stimulant la largeur du cerne. Cette augmentation s'observe à partir de la deuxième année suivant le traitement puis l'effet s'estompe. Les variations intra- cernes de la masse volumique ont également connu une hausse chez les arbres âgés de 60 ans et plus après traitement dans le cas d'une coupe à forte intensité. Néanmoins, les valeurs moyennes de la masse volumique restent comparables à celles du peuplement témoin et ne présentent pas un intérêt particulier dont les exploitants du bois peuvent profiter. D'autant plus que les variations de la masse volumique, observées sur une échelle de temps n'ont pas montré d'effet statistiquement significatif à moyen terme.

À l'échelle du peuplement, il a été difficile de tirer des conclusions de l'impact des coupes partielles dans les sites échantillonnés. Les propriétés peu distinctes des sites, le taux de mortalité élevé ainsi que le déséquilibre du dispositif expérimental sont

des facteurs limitant l'adaptation du modèle statistique de manière à tenir compte de divers facteurs d'interactions. Pour cela, il serait judicieux de consolider les informations sur les caractéristiques des sites d'échantillonnage et disposer d'un grand nombre d'échantillons qui permettrait d'observer la variation des attributs de qualité du bois en fonction du site et de l'intensité du traitement.

Dans un deuxième volet, il était question de valider le potentiel d'utilisation du résistographe dans l'estimation des attributs de qualité du bois. L'interprétation des profils de variations radiales du résistographe et du densitomètre à rayons X a permis de conclure d'une bonne concordance entre ces deux outils pour les mesures de la densité. Par contre, pour la largeur des cernes, les profils de variations concordent moins à cause d'une mauvaise définition du point de transition bois initial / bois final pour les mesures au résistographe. En effet, ces résultats sont confirmés par de meilleurs coefficients de corrélations pour les mesures de la densité par rapport à ceux de la largeur des cernes. Le résistographe est muni d'une haute résolution (amplitude 2 fois plus que le densitomètre à rayons X), d'où le fait que ses performances sont conditionnées par un bon nombre de facteurs. Hormis les facteurs liés à l'environnement (humidité, température, caractéristiques du site), à l'opérateur (point de perçage, plan horizontal) et aux paramètres de réglage de l'outil (vitesse de perçage, usure de l'aiguille en fonction du nombre de perçage), l'efficacité des mesures intra cernes du résistographe sont particulièrement dépendantes de la largeur des cernes. Pour les cernes de croissance assez larges, le résistographe permet de déterminer avec précision le point de transition du bois initial au bois final. Par contre, pour les cernes de croissance très étroits et où la transition n'est pas distincte le résistographe perçoit un faible signal de résistance menant à une perte d'information sur quelques cernes de croissance. Ceci suggère que le résistographe pourrait donner des mesures fiables pour les études sur les arbres à forte croissance et/ou ceux qui répondent bien en terme de croissance suite aux traitements sylvicoles dont les coupes partielles. Par contre, pour les arbres à faible croissance et/ou ceux qui ne répondent pas bien aux traitements, le

résistographe ne dispose pas d'une résolution assez pointue pour détecter les variations dues aux traitements. En effet, l'évaluation de l'effet de la coupe partielle a été mise en évidence pour les paramètres moyens de la largeur du cerne et de la masse volumique. Ces résultats ont été possibles grâce à un choix sélectif des échantillons permettant d'obtenir une concordance avec les mesures du densitomètre à rayons X. Cependant, le résistographe ne nous a pas permis de chercher l'information au niveau des composantes d'un cerne de croissance à savoir le bois initial et le bois final.

Le résistographe semble être plus adapté pour évaluer la densité dans des peuplements équiens productifs, dans des plantations de résineux à croissance rapide et dans les programmes d'amélioration des arbres. Sa fiabilité peut être consolidée par une approche d'échantillonnage adaptée aux sites et à l'espèce ainsi que la création d'une base de données référentielle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acuña L., Basterra L.A., Casado M^a M., López G., Ramón-Cueto G., Relea E., Martínez C. et González A. 2011. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species. *Materiales de Construcción*. Vol. 61, 303, 451-464.
- Alteyrac J. 2005. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec.150p.
- Alazard P. 1994. Stand density and spacing of *Pinus pinaster*: consequences for growth and tree quality. *Afocel Arnef*, 2: 129-144.
- Antal M. et Micko M.M. 1994. Variation and field estimation of wood quality parameters for black spruce. *Holzforschung. Holzverw*, 46: 70-72.
- Aussenac G., Granier A. et Breda N. 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Revue Forestière Française*, 1: 54-62.
- Barbour R.J., Johnson J. et Amundson C. 1996. Modeling intraring x-ray density profiles. *Proceedings, second workshop: Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software*, Berg-en-Dai, Kruger National Park, South Africa, Topic3: 123-130.

- Barbour R.J., 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: 2439-2447.
- Barbour R.J., Bailey R.E. et Cook J.A. 1992. Evaluation of relative density, diameter growth, and stem form in a red spruce (*Picea rubens*) stand 15 years after precommercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research*, 22: 229-238.
- Barrette J., Pothier D. et Warda C. 2013. Temporal changes in stem decay and dead and sound wood volumes in the northeastern. *Canadian Journal of Forest Research*. 43 : 234-244.
- Beaulieu J., Corriveau A. et Daoust G. 1989. Stabilité phénotypique et délimitation de zones d'amélioration de l'épinette noire au Québec. Centre de foresterie des Laurentides, 39 p.
- Becker M. 1979. Une étude phyto-écologique sur les plateaux calcaires du Nord-Est (massif de Haye, 54). Utilisation de l'analyse des correspondances dans la typologie des stations. Relations entre la productivité et la qualité du Hêtre et du Chêne. *Annales des Sciences forestières*, 36 : 93-124.
- Bégin J. 2002. Coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM). Gouvernement du Québec, Ministère des ressources naturelles. (Ed.).
- Bélanger L. 1993. Une expérience de gestion écosystémique d'une forêt boréale : le cas de la forêt Montmorency (Québec), dans comptes rendus du congrès conjoint Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (OIFQ et Institut forestier du Canada (IFC). p-F27-F35.

- Bergeron Y., Harvey B., Leduc A. et Gauthier S. 1999. Stratégies d'aménagement forestier qui s'inspirent de la dynamique des perturbations naturelles: considérations à l'échelle du peuplement et de la forêt. *Forestry Chronicle*, 75: 55-61.
- Bergeron J.F., Grondin P. et Blouin J. 1998. Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'ouest. Direction des inventaires forestiers, Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec. Publication n° RN98-3080.
- Bergeron Y. et Harvey B. 1997. Basing silviculture on natural ecosystem dynamics: an approach applied to the southern boreal mixedwood forest of Quebec. *Forest Ecology and Management*, 92: 235-242.
- Bourgeois L., Messier C. et Brais S. 2004. Mountain maple and balsam fir early response to partial and clear-cut harvesting under aspen stands of northern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*. 34, 2049-2059.
- Bowyer J.L., Shmulsky R. et Haygreen J.G. 2007. *Forest product and wood science. An introduction*. 5e éd. Blackwell Publishing Ltd., Oxford. 558 p.
- Briggs D.G. et Smith W.R. 1986. Effect of silvicultural practices on wood properties of conifers. A review. In *Douglas fir: stand management for the future*. C, Olivier, D. Hanley and J. Johnson (Eds). University of Washington Press. Seattle, 108-117.
- Burdon R.D., Kibblewhite R.P., Walker J.C.F., Megraw R.A., Evans R. et Cown D.J. 2004. Juvenile Versus Mature Wood: A New Concept, Orthogonal to Corewood

Versus Outerwood, with Special Reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. *Forest Science*, 50: 399-415(17).

Burns R.M. et Honkala B.H. 1990. *Silvics of North America, Volume 1: Conifers*, Washington, D.C., United States, Department of Agriculture, 675 p. (Agriculture Handbook; 654).

Conseil Canadien des Ministres des Forêts. 2002. *Compendium of Canadian Forestry Statistics*. In : Service, C.F. (Ed.), Ottawa, Ontario.

CEGFPQ. 2004. *Rapport sur l'état de la situation de la gestion des forêts publiques du Québec*. Rapport présenté au ministre des ressources naturelles, de la Faune et des parcs du Québec, Québec (QC). 307p.

Chantre G. et Rozenberg P. 1997. Can drill resistance profiles (Resistograph) lead to within-profile and within-ring density parameters in Douglas-fir wood?. In: Zhang SY, Gosselin R, Chauret G (eds) *Proc. of CTIA—International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO) International wood quality workshop: timber management toward wood quality and end-product value*. Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Quebec, Canada, pp 41–47.

Comité consultatif scientifique du manuel d'aménagement forestier. 2002. *Coupe avec protection des petites tiges marchandes – Avis scientifique*. MFFP, Direction de la recherche forestière, Québec, 146 p.

Core H.A., Cote W.A. et Day A.C. 1979. *Wood structure and identification*, Syracuse University Press, 182 p.

- Corriveau A., Beaulieu J. et Daoust G. 1991. Heritability and genetic correlations of wood characters of upper Ottawa Valley white spruce (*Picea glauca*) populations grown in Quebec. *The Forestry Chronicle*, 67 (6) : 698-705.
- Coté G., Bouchard M., Pothier D. et Gauthier S. 2010. Linking attributes to cartographic information for ecosystem management purposes in the boreal forest of eastern Québec. *Forestry Chronicle*, 86: 511-519.
- Coulombe G., Huot J., Arsenault J., Bauce E., Bernard J.T., Bouchard A., Liboiron M.A. et Szaraz G. 2004. Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise, p 314.
- Cown D.J. 1980. Radiata pine: Wood age and wood property concepts. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 10:504.
- Cregg B.M., Dougherty P.M. et Hennessey T.C. 1988. Growth and wood quality of young loblolly pine trees in relation to stand density and climatic factors. *Canadian Journal of Forest Research*, 18: 851-858.
- DeBell D.S., Singleton C., Harrington C.A. et Gartner B.L. 2002. Wood density and fiber length in young populus stems: Relation to clone, age, growth rate, and pruning. *Wood Fiber Science*, 34: 529-539.
- De Kort L., Loeffen V. et Baas P. 1991. Ring width, density and wood anatomy of Douglas fir with different crown vitality. *IAWA Bulletin*, 12: 453-465.
- Denyer W.B.G., Gerrard F.D.J. et Kennedy R.W. 1966. A statistical approach to the separation of white and black spruce on the basis of xylem anatomy, *Forest Science*, 12: 177-184.

- De Oliveira Feio A.J. 2005. Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour. Universidade do Minho Escola de Engenharia.
- Desponts M. et Simon J.P. 1987. Structure et variabilité génétique de populations d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) dans la zone héli-arctique du Nouveau-Québec. Canadian Journal of Forest Research, 17: 1006-1012.
- Dickson R.L. et Walker J.C.F. 1997. Selecting wood quality characteristics for pines. CTIA/IUFRO workshop. Timber management toward wood quality and end-product value, 22 : 45-50.
- Dos Santos D.V.B. 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.) B.S.P.] avant et après traitement de coupes partielles. Mémoire de maîtrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 90p.
- Duchesne I., Swift D.E. et Turner D.R. 2008. Effects of late commercial thinning at wide spacing on tree growth and lumber quality in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre, Fredericton, N.B.
- Duchesne I., Wilhelmsson L. et Spangberg K. 1997. Effects of in-forest sorting of Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) on wood and fibre properties. Canadian Journal of Forest Research, 27: 790–795.
- Duchesne I., Pitt D.G. et Tanguay F. 2013. Effects of precommercial thinning on the forest value chain in northwestern New Brunswick: Part 4 – Lumber production, quality and value. Forestry Chronicle, 89: 474-489.

- Duchesne I. et Swift D.E. 2008. Impact of intensive silviculture on wood product quality and value in a jack pine stand – Long-term impact of late commercial thinning at wide spacing. FPInnovations – Forintek, 5767, 49 p.
- Duchesne I. et Tanguay F. 2011. Effects of Initial Spacing on Tree and Wood Attributes on Lumber Quality and Value in White Spruce - The Stanley Spacing Trial Case Study. FPInnovations Report. 34 p.
- Dupouey J.L. 1983. Étude phyto-sociologique et écologique du massif forestier d'Haguenau (Bas-Rhin). Apports méthodologiques, potentialités sylvicoles. Thèse de Doctorat. INA Paris-Grignon. 140 p.
- Dutilleul P., Herman M. et Avella-Shaw T. 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce. Canadian Journal of Forest Research, 28: 56-68.
- Eberhardt T.L et Samuelson L.J. 2015. Collection of wood quality data by X-ray densitometry: a case study with three southern pines. Wood Science and Technology, 49: 739-753.
- Erickson H.D. et Harrison A.T. 1974. Douglas-fir wood quality studies. Effects of age and stimulated growth on wood density and anatomy. Wood Science and Technology, 8: 207-226.
- Farrar J.L. 1995. Trees of the northern United States and Canada, Ottawa, Ontario, Fitzhenry and Whiteside Ltd., 502 p.
- Fenton N., Bescond H., Imbeau L., Boudreault C., Drapeau P. et Bergeron Y. 2008. Évaluation sylvicole et écologique de la coupe partielle dans la forêt boréale de

la ceinture d'argile. *In* Aménagement écosystémique en forêt boréale. *Edited by* S. Gauthier, M.-A. Vaillancourt, A. Leduc, L. De Grandpré, D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau, and Y. Bergeron. Presses de l'Université du Québec, Québec, QC. p. 393–416.

FFPQ. 2015. Forêts, faune et parcs du Québec : Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. URL: <https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp#pessiereMousses>

Fleming R.L., Mossa D.S. et Marek G.T. 2005. Upland black spruce stand development 17 years after cleaning and pre commercial thinning. *The Forestry Chronicle*, 81: 31-4.

Fritts H.C et Swetnam T.W. 1989. Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments. *Advances in Ecological Research*, 19: 111-188.

Gagnon R. et Morin H. 2001. Les forêts d'épinette noire du Québec : dynamique, perturbations et biodiversité. *Le Naturaliste Canadian*, 125 : 26-27.

Gao S., Wang W., Wiemann M.B., Brashaw K.B., Ross R.J et Wang L. 2017. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science*. 74:27 DOI 10.1007/s13595-017-0623.

Gartner B.L. 2006. Predictions of wood structural patterns in trees by using ecological models of plant water relations. In: STOKKE, D.D., Groom, L.H. (Eds.),

Characterization of the Cellulosic Cell Wall. Blackwell Publishing, Ames, IA, 274p.

Greyer W.A. et Gilmore A.R. 1965. Effect of spacing on wood specific gravity in loblolly pine in southern Illinois. Agricultural Experiment Station. Note 113, Urbana, IL: Univ. of Illinois. 5 p.

Grigal D.F. et Sucoff E.I. 1966. Specific gravity variation among thirty jack pine plot. Tappi 1, 49: 497-498

Groot A., Lussier J.M., Mitchell A.K., et Maelsaac D.A. 2005. A silvicultural systems perspective on changing Canadian forestry practices. Forestry Chronicle, 81: 50-55.

Hacke U.G., Sperry J.S., Pockman W.T., Davis S.D., McCulloh K.A. 2001. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. Springer-Verlag. Oecologia, 126:457-461.

Haygreen J.G., Bowyer J.L. et Shmulsky R. 2007. Forest products and wood science an introduction. Fifth ed. Blackwell Publishing, 558p.

Herman M., Dutilleul P. et Avella-Shaw T. 1998. Intra -ring and inter-ring variations of tracheid length in fast grown versus slow-grown Norway-spruce. IAWA Journal, 19(1):3-23.

Hernández J.C. et Bégin J. 2008. Étude sur l'accroissement en diamètre de l'épinette noire en fonction du taux de prélèvement 5 ans après CPPTM. Chaire en Aménagement Forestier Durable

<http://chaireafd.uqat.ca/evenement/atelierChaire2010/presentations/5HerveBessonAtelierChaire2010.pdf>

Hernández R.E. et Lessard J. 1997. Effect of cutting width and cutting height on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper- canter. *Forest Products Journal*, 47(3): 89-95.

Hunter M.L.J. 1990. *Wildlife, forest and forestry: principles of managing forests for biological diversity*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Isik F et Li B. 2003. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 2426–2435.

Jaakola T., Makinen H. et Saranpa P. 2006. Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation. *Forest Ecology and Management*, 237: 513-521.

Jaakkola T., Makinen H. et Saranpaa P. 2005a. Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 1767-1778.

Jaakkola T., Makinen H., Sarén M.P. et Saranpaa P. 2005b. Does thinning intensity affect the tracheid dimensions of Norway spruce? *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 2685-2697

Jack S.B. et Long J.N. 1996. Linkages between silviculture and ecology: an analysis of density management diagrams. *Forest Ecology and Management*, 86: 205–220.

- Jessome A.P. 2000. Strength and related properties of woods grown in Canada, Sainte-Foy, Québec, Forintek Canada Corp., 37 p. (Special Publication; SP-514E).
- Johansson K. 1993. Influence of initial spacing and tree class on the basic density of *Picea abies*. Scandinavian-Journal of Forest Research, 8: 18-27.
- Johnstone D.M., Ades P.K., Moore G.M. et Smith I.W. 2007. Predicting Wood Decay in Eucalypts Using an Expert System and the IML-Resistograph Drill. Arboriculture & Urban Forestry, 33(2):76–82.
- Jozsa L.A. et Middleton G.R. 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: nature et conséquences pratiques. Forintek Canada Corp, 42 p.
- Jozsa L.A. et Brix H. 1989. The effects of fertilization and thinning on wood quality of a 24-year-old Douglas-fir stand. Canadian Journal of Forest Research, 19: 1137-1145.
- Jyske T. 2008. The effects of thinning and fertilisation on wood and tracheid properties of Norway spruce (*Picea abies*) -the results of long-term experiments. Thèse de doctorat, University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. 44p.
- Kahl T., Wirth C., Mund M., Böhmisch G. et Schulze E.D. 2009. Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. European Journal of Forest Research, 128:467–473.
- Kang K.Y., Zhang S.Y. et Mansfield S.D. 2004. The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). Holzforschung, 58: 455-463.

- Karlsson H. 2006. Fiberguide: Fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry. AB Lorentzen&Wettre, Sweden, 120 p.
- Kasir W.A. 1990. The influence of spacing on the anatomical properties and specific gravity of the wood of a populus clone. Third Euro-African Regional Wood Anatomy Symposium, Zurich, Switzerland, July 1990. IAWA Bulletin, 11(2): 127-128.
- Kasraoui H. 2011. Effets de l'éclaircie commerciale de la fertilisation sur la masse volumique du bois et sur la morphologie des trachéides du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Mémoire de maîtrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 98 p.
- Khalil M.A.K. 1985. Genetics of wood characters of black spruce (*picea mariana* (Mill.) B.S.P.) in Newfoundland, Canada. *Silvae Genetica*, 34 : 221-23.
- Koran Z. 1967. Electron microscopy of radial tracheid surfaces of black spruce separated by tensile failure at various temperatures, *Tappi Journal*, 50: 60-67.
- Koubaa A., Zhang S.Y. et Makni S. 2002. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of Forest Science*, 59: 511-518.
- Koubaa A., Zhang S.Y., Isabel N., Beaulieu J. et Bousquet J. 2000. Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce. *Wood Fiber Science*, 32: 61-71.

- Koubaa A. et Zhang S.Y. 1998. Éclaircie précommerciale du sapin baumier: implications sur la qualité de la fibre et des pâtes et papiers. 66e congrès de l'ACFAS. Session: S-225 Sciences forestières.
- Laroque G.R. et Marshall P.L. 1995. Wood Relative Density Development in Red Pine (*Pinus resinosa* Ait.) Stands as Affected by Different Initial Spacings. Society of American Foresters. Forest Science, 41: 709-728
- Larson P.R. 1969. Wood formation and the concept of wood quality. School of forestry. New Haven. Yale University. Bulletin N° 74, 54.
- Law K.N. et Valade J.L. 1997. Effect of Wood quality on thermomechanical pulping a case study on Black Spruce and Jack Pine. CTIA/IUFRO international wood quality workshop. Quebec city, Canada. Timber management toward wood quality and end-product value. p: VII 3-VII7.
- LeFort P., Gauthier S. et Bergeron Y. 2003. The influence of fire weather and land use on the fire activity of the lake Abitibi area, Eastern Canada. Forest Science, 49: 509-521.
- Legris J. et Couture G. 1999. L'éclaircie pré commerciale au Québec dans un cadre d'aménagement durable des forêts, Québec, ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de l'environnement forestier, 80p.
- Lessard G., Blouin D., Boulfroy E., Grenon F. et Ruel M. 2010. CERFO: un quart de siècle d'innovation. The forestry chronicle, vol 86, N°3.

- Lin C.J., Wang S.Y., Lin F.C. et Chiu C.M. 2003. Effect of moisture content on the drill resistance value in taiwania plantation wood. *The Society of Wood Science and Technology, Wood and Fiber Science*, 35: 234–238.
- Little E.L. 1979. Checklist of United States trees (native and naturalized), Washington, D.C., United States, Department of Agriculture, 375 p.
- Liu C., Ruel J.C. et Zhang S.Y. 2007a. Immediate impacts of partial cutting strategies on stand characteristics and value. *Forest Ecology and Management*, 250: 148-155.
- Liu C., Zhang S.Y. et Jiang Z.H. 2007b. Models for predicting lumber grade yield using tree characteristics in black spruce. *Forest Products Journal*, 57(1) : 60-66.
- Lopez Saez J., Corona C., Berger F. et Stoffel M. 2009. L'utilisation de la résistographie en Dendrogéomorphologie. Retour d'expériences. Le cas du dépôt Pierres Jean Jeanne, Massif de l'Oisans, France. URL : <http://edytem.univ-savoie.fr/IMG/pdf/2009-10-8-9-10-colloque-dendro-Lopez-Saez-et-al-2.pdf>
- Lussier J.M. 2015. Les coupes partielles en forêt résineuse : les fonctions sylvicoles des coupes partielles. Partenariat innovation forêt, transfert de connaissances. URL : <http://www.partenariat.qc.ca/pdf2/OT-59.pdf>
- Mäkinen H., Jaakkola T., Saranpää P. et Piispanen R. 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *Forest Ecology and Management.*, 241: 175-188.
- Mäkinen H., Hein S. 2006. Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. *European Journal of Forest Research*, 125: 239-248.

- Mäkinen H., Saranpää P. et Linder S. 2002a. Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. *Canadian Journal of Forest Research*, 32: 185-194.
- Mäkinen H., Saranpää P. et Linder S. 2002b. Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holzforschung*, 56: 449-460.
- Marguerie D., Bégin Y. et Courmoyer L. 2000. Distinction anatomique du bois du mélèze (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch), de l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), et de l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B. S. P.), en vue de l'analyse des macrorestes. *Géographie physique et Quaternaire*, 54 : 317-325.
- Mattheck C., Bethge K. et Albrecht W. 1997. How to read the results of resistograph. *The International Journal of Urban Forestry. Arboricultural Journal*, 21: 331-346.
- Mayor X. et Rodà F. 1993. Growth response of holm oak (*Quercus ilex* L.) to commercial thinning in the Montsen mountains (NE Spain). *Annals of Forest Science*, 50: 247-256.
- McCarthy J.W. et Weetman G. 2006. Age and size structure of gap-dynamic, old-growth boreal forest stands in Newfoundland. *Silva*. 40 : 209-230.
- MFFP (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec). 2009. Retombées économiques du secteur forestier Québec, 2007. Direction du développement et de la coordination. 66p.

- MFFP (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec). 2003. Manuel d'aménagement forestier (4e édition). Direction des programmes forestiers. ISBN : 2-550-41174 9. Pagination multiple.
- MFFP (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec). 2003. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. 2p
- Montaño J.M. 2013. Réaction de la régénération préétablie de sapin baumier et d'épinette noire à différentes intensités de coupe dans des forêts boréales irrégulières. Maîtrise en sciences forestières. Université Laval. 42p.
- Mörling T. 2001. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. *Annals of Forest Science*, 59: 29-40
- Mvolo C.S., Koubaa A., Beaulieu J., Cloutier A. et Mazerolle M.J. 2015. Variation in Wood Quality in White Spruce (*Picea Glauca* (Moench) Voss). Part I. Defining the Juvenile–Mature Wood Transition Based on Tracheid Length. *Forests*, 6: 183-202.
- Mvolo C.S. 2015. Étude et modélisation de la variation de la qualité du bois basées sur les propriétés anatomiques, physiques et la croissance du bois chez l'épinette blanche (*Picea Glauca* (Moench) Voss) et le pin gris (*Pinus Banksiana* Lamb). Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Science de l'environnement, 274 p.
- Nepveu G. 1990. Les facteurs influençant la qualité du bois de chêne (chêne rouvre et chêne pédoncule) *Revue of Forestry*. XLII (2), 128-133.

- Nicholls J.W.P. 1984. Tracheid cell dimensions and density relationships for normal and abnormal wood of *Pinus radiata* (Don) D. Australian Forest Research 14, 85-98.
- Oliveira J.T., Wang X. et Vidaurre G.B. 2017. Assessing specific gravity of young Eucalyptus plantation trees using a resistance drilling technique. *Holzforschung*, 71: 137-145.
- Ouis D. 2003. Non-destructive techniques for detecting decay in standing trees. *Arboricultural Journal*, 27 : 159-177.
- Ourais M. 2012. Variations intra-arbres de la largeur du cerne, de la masse volumique du bois et des propriétés morphologiques des trachéides de l'épinette noire (*Picea mariana* (mill.) B.S.P) avant et après traitements sylvicoles. Mémoire de maîtrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 96 pp
- Pamerleau-Couture E. 2011. Impact de trois interventions sylvicoles sur la Croissance et la qualité du bois de l'épinette noire en Forêt boréale. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 98 p.
- Panshin A.J. et De Zeeuw C. 1980. Textbook of wood technology. Co, McGraw-Hill Book. New York City. 772 p.
- Pape R. 1999. Effects of thinning regime on the wood properties and stem quality of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14: 38-50.
- Parsa Pajouh D. 1970. Contribution à l'étude de la qualité du bois de *Fagus orientalis* de trois stations de la forêt de l'Elbourz au moyen d'essais classiques sur

éprouvettes normalisées et d'analyses densitométriques de radiographies. *Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de l'Université de Nancy, 16 juillet.*

Paul B.H. 1957. Juvenile wood in conifers. FPL Rep. 2094. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 6p.

Peltola H., Miina J., Rouvinen I. et Kellomaki S. 2002. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine. *Silva Fennica*, 36: 813-825.

Polge H. 1973. Facteurs écologiques et qualité du bois. *Annales des sciences forestières*. 30: 307-328.

Posey C.E. 1965. Effects of fertilization upon wood properties of Loblolly pine (*Pinus taeda* L.). Proceedings of 8th Southern Conference on Forest Tree Improvement, Savannah, GA, June 16-17, 1965. Committee on Southern Forest Tree Improvement, 24: 126-130.

Raulier F., Pothier D. et Bernier P. 2003. Predicting the effect of thinning on growth of dense balsam fir stands using a process-based tree growth model. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 509-520.

Raven P.H., Evert R.F., Eichhorn S.E., Bouharmont J. et Evrard C.M. 2000. *Biologie végétale*. De Boeck Université, Paris.

Rinn F., Schweingruber F.H. et Schar E. 1996. Resistograph and X-Ray Density Charts of Wood Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-Ray Density Charts of Different Wood Species. *Holzforschung*, 50: 303-311.

- Rinn F. 1994. Resistographic visualization of tree-ring density variations. International conference on tree rings, environment and humanity relationships and processes. Arizona: USA. 4p.
- Rinn F. 1990. TSAP/X- Computerprogram for dendrochronological databases, time series analysis and presentation graphics. Heidelberg.
- Rinn F. 1988. A new method for measuring tree-ring density parameters. Physics diploma thesis, Institute for Environmental Physics, Heidelberg University.
- Riopel M., Bégin J. et Ruel J.C. 2010. Probabilités de pertes cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes appliquées dans des forêts résineuses du Québec. *Canadian Journal of Forest Research*, 40:1458-1472.
- Roderick M.L. et Berry S.L. 2002. Linking wood density with tree growth and environment: a theoretical analysis based on the motion of water. *The Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia. New Phytologist*, 149: 473–485.
- Rossi S., Cairo E., Krause C. et Deslauriers A. 2015. Growth and basic wood properties of black spruce along an alti-latitudinal gradient in Quebec, Canada. *Annals of Forest Science*, 72 : 77–87.
- Ruel J.C., Roy V., Lussier J.M., Pothier D., Meek P. et Fortin D. 2007. Development of a silviculture adapted to the irregular boreal forest. *Forestry Chronicle*, 83:367-374.
- Laplante, S. 2009. Effet de l'éclaircie pré commerciale et de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale et la qualité du bois de l'épinette nome de la sapinière à

bouleau blanc du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Mémoire de maîtrise en ressources renouvelables, l'Université du Québec à Chicoutimi, 61p.

St-Germain J.L. et Krause C. 2008. Latitudinal variation in tree-ring and wood cell characteristics of *Picea mariana* across the continuous boreal forest in Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 38 : 1397–1405.

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

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

Seth R.S. et Page D.H. 1988. Fiber properties and tearing resistance. *Tappi J*, 71 (2) : 103–107.

Sheedy G. et Bertrand V. 1997. Résultats de 10 ans concernant les éclaircies en ligne réalisées dans les plantations de la forêt de Drummondville. MNRQ note de recherche forestière. Québec. 77. 20 p.

Swenson N.G. et Enquist B. J. 2007. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: Wood density and its community wide variation across latitude and elevation. *American Journal of Botany*, 94: 451–459.

Swift D.E., Duchesne I., Zhang S.Y. et Chauret G. 2008. Effects of precommercial thinning on the tree growth and lumber quality of jack pine (*Pinus banksiana*

Lamb.): results from a long-term study in the Acadian Forest Region. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre.

Tasissa G. et Burkhart H.E. 1998. An application of mixed effects analysis to modeling thinning effects on stem profile of loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 103: 87-101.

Ukrainetz N.K. et O'Neill G.A. 2010. An analysis of sensitivities contributing measurement error to resistograph values. *Canadian Journal of Forest Research*, 40: 806–811.

Vahey D.W., Zhu J.Y. et Scott C.T. 2007. Wood density and anatomical properties in suppressed-growth trees: Comparison of two methods. *Wood Fiber Science*, 39:462-471.

Valinger E., Elfving B. et Morling T. 2000. Twelve-year growth response of Scots pine to thinning and nitrogen fertilisation. *Forest Ecology and Management*, 134: 45-53.

Viereck L.A. et Johnston W.F. 1990. *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Black spruce. Dans: *Silvics of North American trees. Vol. 1, Conifers*. USDA Forest Service: 227-237.

Vincent M. 2010. Impact des éclaircies commerciales sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) en forêt boréale. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi.

Wang S.Y., Chiu C.M. et Lin C.J. 2003. Application of the drilling resistance method for annual ring characteristics: evaluation of Taiwan (Taiwan)

- cryptomerioides) trees grown with different thinning and pruning treatments. *Journal of Wood Science*, 49:116–12.
- Wang L., Payette S. et Begin Y. 2002. Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 32:477-486.
- Wang E.I. et Micko M.M. 1984. Wood quality of white spruce from north central Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 14: 181-185.
- Ward D. et Gardiner J.J. 1976. The influence of spacing on tracheid length and density in Sitka Spruce. *Irish-Forestry*, 33(1): 39-56.
- Wiemann M.C. et Williamson G.B. 2013. Biomass determination using wood specific gravity from increment cores. General Technical Report FPL-GTR-225. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 7 p.
- Yang K.C. et Hazenberg G. 1994. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth-rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana*. . *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 996-1007.
- Yang K.C. 1994. Impact of spacing on width and basal area of juvenile and mature wood in *Picea mariana* and *Picea glauca*. *Wood Fiber Science*, 26: 479-488.
- Youngberg C.T., Walker L.e., Hamilton J.R. et Williams R.F. 1963. Fertilization of slash pine. *Canadian Forest Research Council Paper*. Macon Vol 17.

- Zhang S.Y. 1998. Effect of age on the variation, correlations and inheritance of selected wood characteristics in black spruce (*Picea mariana*). Wood Science and Technology, 32,197-204.
- Zhang S.Y. 1997. Wood quality: its definition, impact, and implications for value-added timber management and end uses. CITAIUFRO, Quebec City. Timber management toward wood quality and end-product value, August 18-22. P: 1.17-1.39.
- Zhang S.Y. et Chauret G. 2001. Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (*Picea mariana*). Canadian Forest Service Report. Vol 35. Forintek Canada Corp. 47p.
- Zhang S.Y et Jiang Z.H. 1998. Variability of selected wood characteristics in 40 half-sib families of black spruce (*picea mariana*). Wood Science and Technology, 32 :71-82.
- Zhang S.Y. et Koubaa A. 2009. Les résineux de l'Est du Canada : Écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. Publication spéciale, FP innovations; SP-526F, 377 p.
- Zhang S.Y., Chauret G., Swift D.E. et Duchesne I. 2006. Effects of pre-commercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. Canadian Journal Forest Research, 36 : 945-952.
- Zhang S.Y., Simpson D. et Morgenstern E.K. 1996. Variation in the relationship of wood density with growth in 40 black spruce (*Picea mariana*) families grown in New Brunswick. Wood Fiber Science, 28: 91-99.

Zobel B.J. et Van Buijtenen J.P. 1989. Wood variation: its causes and control. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, New York. 363 p.