

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

LIMITES À L'UTILISATION D'UN RÉSISTOGRAPHE EN  
MICRODENSITOMÉTRIE : VARIATIONS INTERCERNES ET INTRACERNES  
DE LA CROISSANCE ET DE LA MASSE VOLUMIQUE

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN ÉCOLOGIE

PAR  
FLAVIE FERRER

OCTOBRE 2019



# 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

Ce projet n'aurait pas vu le jour sans le soutien, la patience, les conseils et l'engagement de mon directeur Ahmed Koubaa et de mon codirecteur Benoit Lafleur qui m'ont permis de mener à bien ce projet passionnant et fastidieux.

Je suis reconnaissante à Besma Bouslimi, agente de recherche à l'université de Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) pour ses suggestions pertinentes tout au long du traitement de la base de données, de l'analyse des résultats et de la correction de différents chapitres de ce mémoire.

Un grand merci aussi au technicien du laboratoire de biomatériaux William Belhadef pour son aide précieuse et ses conseils le long de la réalisation des essais expérimentaux .

Merci aussi à l'ensemble des professeurs et professionnels de l'Institut de Recherche sur les Forêts (IRF) de l'UQAT pour leur accueil et en particulier à Danièle Laporte et Marie-Hélène Longpré pour le bonne humeur contagieuse et les parties de badminton endiablées. Merci à Philippe Duval pour son aide sur le terrain.

Je remercie également le CRSNG, le Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, le Centre Canadien sur la fibre de bois ainsi que l'organisme Mitacs pour leur soutien financier.

Merci aux arbres échantillonnés qui ont fait preuve d'une grande patience pendant que Philippe et moi leur prélevions du bois.



## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xix
RÉSUMÉ .....	xxi
PROBLÉMATIQUE.....	1
CHAPITRE I INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	5
1.1 La densité du bois, une caractéristique physique de l'arbre.....	5
1.1.1 Densité et masse volumique deux variables souvent confondues .....	5
1.1.2 La densité moyenne de l'arbre est une résultante des variations macro et microscopiques de la densité.....	13
1.1.3 La dendrochronologie, utiliser les arbres comme archives.....	25
1.1.4 Le résistographe, un outil potentiel de microdensitométrie ? .....	36
1.2 Cadre du projet.....	42
1.2.1 But.....	42
1.2.2 Objectifs et hypothèses .....	42
CHAPITRE II Méthodologie.....	45
2.1 Aire d'étude.....	45
2.1.1 Plan d'échantillonnage.....	49
2.1.2 Description des essences sélectionnées.....	52
2.2 Protocole expérimental.....	54
2.2.1 Prélèvement des carottes et sondage au résistographe.....	54
2.2.2 Conditionnement des carottes de bois.....	55

2.3	Traitement des données .....	58
2.3.1	Exemples de profils .....	58
2.3.2	Analyses à l' échelle macroscopique: calibration de la résistance (mesurée par le résistographe) par la masse volumique du bois (mesurée par le densitomètre à rayon x).....	59
2.3.3	Analyses à l' échelle microscopique – validation du résistographe en microdensitométrie .....	60
CHAPITRE III RÉSULTATS ET DISCUSSION .....		65
3.1	Caractéristiques générales des échantillons prélevés : masse volumique et âge des arbres .....	65
3.1.1	Les masses volumiques mesurées sont proches des valeurs trouvées dans la littérature.....	65
3.1.2	Variation de l'âge des arbres par essence.....	68
3.2	Analyses à l' échelle macroscopique – calibration du résistographe .....	68
3.3	Validation du potentiel du résistographe en microdensitométrie – analyses à l' échelle microscopique .....	70
3.3.1	Frêne noir.....	70
3.3.2	Peuplier faux-tremble .....	77
3.3.3	Pin gris.....	84
3.3.4	Sapin baumier .....	90
3.3.5	Toutes essences confondues .....	97
3.4	Synthèse des résultats .....	101
3.4.1	Objectif 1 : calibration du résistographe (échelle macroscopique).....	101
3.4.2	Objectif 2 : Potentiel du résistographe en microdensitométrie.....	101
3.5	Discussion.....	104
3.5.1	Calibration du résistographe : origine des écarts de mesure pour la masse volumique moyenne entre résistographe et densitomètre .....	104
3.5.2	Masse volumique moyenne du cerne.....	106
3.5.3	Largeurs et masses volumiques moyennes du bois initial et du bois final .....	106
CHAPITRE IV CONCLUSION GÉNÉRALE.....		113
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE .....		117

## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1	Représentation de la variation de la densité avec l'âge cambial, sur une galette de pin gris, tiré de Payette et Filion, (2010), Trouy, (2015) et Caceres Cuadros (2016). Les zones de bois juvénile et de bois mature sont délimitées respectivement par les doubles-flèches jaune et bleue..... 16
1.2	Schéma explicatif de la localisation du bois de réaction: compression (en rouge) pour les résineux et tension (en bleu) pour les feuillus. Adapté de Trouy (2015) et Payette et Filion (2010) ..... 18
1.3	Variations microscopiques intracernes de la densité du bois liée au fonctionnement saisonnier du cambium, tiré de Catesson and Lachaud, (1993); Payette et Filion, (2010); Trouy, (2015). Le cambium produit le bois initial peu dense (BI en vert) du début du printemps (P en bleu) au milieu de l'été (E en vert) et du bois final dense (BF en rouge) du milieu de l'été à la fin de l'automne (A en orange). L'activité du cambium est nulle durant l'hiver (H en noir). ..... 20
1.4	Schéma représentatif des variations des patrons intracernes de la densité, tiré de Payette et Filion ( 2010). Les limites de cernes se discernent facilement pour les conifères (a) et les feuillus à zone initiale poreuse (b). De même la distinction entre bois initial (BI, en vert) et bois final (BF, en orange) est aisée. En revanche les

	variations intra et intercernes de la densité se confondent pour les feuillus à pores diffus et à zone semi-poreuse (c) .....	22
1.5	Exemple de profil microdensitométrique d'une carotte de pin gris mesuré avec le logiciel QMS Tree ring analyzer (Quintek Measurement Systems, Inc., 1999). La carotte de bois photographiée est superposée à son profil radial microdensitométrique.....	28
1.6	Représentation des écarts de position des points de transition BI/BF, d'après Koubaa <i>et al.</i> (2002) et Payette et Filion (2010). La méthode de Koubaa <i>et al.</i> (2002) (étoile rouge) est adaptée à chaque cerne comparativement à la méthode du point de transition à valeur fixe (étoile bleue). Sur le premier cerne à gauche par exemple, la méthode du point fixe assimile le maximum de densité du cerne au point de transition, alors que la méthode Koubaa <i>et al.</i> (2002) permet de trouver une position plus adaptée au cerne.....	29
1.7	Décomposition des variations radiales de la densité d'un arbre par fréquence temporelle, tiré de Lebourgeois et Merian (2012); Payette et Filion (2010). Le profil de densité radiale (brute figure d) est la résultante des signaux des figures a, b et c, respectivement associés à l'âge cambial, aux saisons et aux changements climatiques. ....	31
1.8	Effet de la variabilité individuelle, des conditions environnementales, des perturbations internes et externes au peuplement sur la largeur (cases grises) et la densité des cernes (cases jaunes). Les signes + et – indiquent une augmentation ou une diminution. Le signe ± indique une différence en fonction de l'essence considérée (Becker <i>et al.</i> 1988; Lebourgeois and Merian, 2012; Leonelli <i>et al.</i> 2008; Polge and Garros, 1971; Trouy, 2015). ....	35

1.9	À gauche, utilisation du résistographe sur une tige de sapin baumier (crédit photo Johan Housset), illustration de droite: tiré du manuel d'utilisation du résistographe (Rinntech, 2015).....	36
1.10	Apparence de la mèche de perçage du résistographe, tiré de Rinn (2012), elle est animée d'un mouvement de rotation (1) et de translation rectiligne (2).....	37
1.11	Exemple de profil radial de résistance du bois tracé in situ par le résistographe, les extrema tracés sur le graphique correspondent aux limites des cernes (en rouge sur la figure) crédit photo: Johan Housset.....	38
1.12	Décalage (3) causé par un mauvais angle de perçage. Un angle non perpendiculaire aux cernes (2, courbe rouge) induit un décalage de mesure dans les limites de cernes par rapport à une mesure perpendiculaire au cerne (1, courbe verte) tiré de Kraler <i>et al.</i> (2012) et Rinn (2012). .....	40
1.13	Comparaison des différences de densité intra et intercernes d'un peuplier ( <i>Populus sp.</i> ) (a) et d'un sapin pectiné ( <i>Abies alba</i> Mill.) (b) d'après Rinn (1996). De même que pour la densitométrie à rayon X, les variations de densité entre le bois initial et le bois final sont plus visibles pour les résineux (sapin pectiné à droite) que pour les feuillus à pores-diffus (peuplier à gauche). Pour les feuillus à pores diffus, les variations intra et intercernes de densité se confondent.....	41
2.1	Localisation de la FERLD (point rouge) près du lac Duparquet dans la région écologique 5a Plaine de l'Abitibi, extrait de (Blouin et Berger, 2002). Rouyn-Noranda, Amos, Val d'Or et La Sarre sont les villes principales de la région.....	48

- 2.2 Emplacement des sites d'échantillonnage à la FERLD. Les points rose, blanc, jaune, bleu, rouge et orange représentent les peuplements échantillonnés respectivement pour le thuya, le bouleau à papier, le sapin baumier et le pin gris, le frêne noir, le peuplier faux tremble et quelques autres sapin baumier. Carte extraite du site web de la FERLD, (2016).....50
- 2.3 Dispositif d'optimisation de la trajectoire suivie par l'aiguille du résistographe utilisé sur le terrain. La sonde arrimée au résistographe sert de guide pour optimiser le parallélisme entre l'aiguille du résistographe et l'orifice de perçage de la carotte de bois.....54
- 2.4 Schématisation de conditionnement des carottes: 1 mesure de la masse à l'état vert, 2 séchage, 3 mesure de la masse et du volume à l'état sec, 4 rinçage au montage soxhlet, 5 séchage final et découpe des lamelles, 6 scan au densitomètre. Les étapes 1 et 3 permettent de calculer l'humidité du bois à l'état vert et la masse volumique à l'état sec. ....57
- 2.5 Exemple de profils radiaux de la masse volumique du bois générés par le résistographe (courbe rouge déjà calibrée) et le densitomètre (courbe bleu) pour : a) un frêne noir et b) un sapin baumier.....58
- 2.6 Schéma explicatif du processus de calcul des variations radiales de la masse volumique moyenne des cernes pour le pin gris. La moyenne de l'ensemble des échantillons est calculée pour la masse volumique de chaque cerne. L'opération est exécutée pour les huit caractéristiques de cernes sélectionnées. Ainsi, chaque point figurant sur le graphique est une valeur moyenne des échantillons pour le résistographe (point orange) et pour le densitomètre (point vert). ....63

3.1	Résultats des régressions linéaires entre la masse volumique mesurée par le densitomètre et la résistance du bois mesurée par le résistographe (en bleu) et entre la masse volumique réelle mesurée par volumétrie et la résistance du bois mesurée par le résistographe (en orange). .....	69
3.2	Profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le frêne noir mesurées par le résistographe et le densitomètre .....	71
3.3	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le frêne noir. ....	72
3.4	Profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le frêne noir mesurés par le résistographe et le densitomètre. ....	73
3.5	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le frêne noir. ....	74
3.6	Profils de variation radiale des masses volumiques moyenne (bleu), minimale (noir) et maximale (rouge) du cerne mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le frêne noir .....	75
3.7	Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) pour le frêne noir. ....	76

3.8	Profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le peuplier faux-tremble. ....	78
3.9	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le peuplier faux-tremble. ....	79
3.10	Profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le résistographe et le densitomètre pour le peuplier faux-tremble. ....	80
3.11	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le peuplier faux-tremble. ....	81
3.12	Profils de variations radiales des masses volumiques moyenne (bleu), minimale (noir) et maximale (rouge) du cerne mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le peuplier faux-tremble. ....	82
3.13	Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) pour le peuplier faux-tremble. ....	83
3.14	Profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le résistographe et le densitomètre pour le pin gris. ....	84

3.15	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe et leurs équations descriptives pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le pin gris. ....	85
3.16	Profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le résistographe et le densitomètre pour le pin gris.....	86
3.17	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le pin gris.....	87
3.18	Profils des variations radiales des masses volumiques moyenne (bleu), minimale (noir) et maximale (rouge) du cerne mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le pin gris.....	88
3.19	Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) pour le pin gris.....	89
3.20	Profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le sapin baumier .....	90
3.21	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le sapin baumier.....	91

3.22	Profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le sapin baumier.....	93
3.23	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le sapin baumier.....	94
3.24	Profils des variations radiales des masses volumiques moyenne (bleu), minimale (noir) et maximale (rouge) du cerne mesurées le résistographe et le densitomètre pour le sapin baumier.....	95
3.25	Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) pour le sapin baumier.....	96
3.26	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celle du résistographe pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) toutes essences confondues.....	98
3.27	Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) toutes essences confondues.....	99
3.28	Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) toutes essences confondues.....	100

- 3.29 Rapport entre les masses volumiques moyenne maximale et minimale du cerne pour le frêne noir, le peuplier faux-tremble, le pin gris, le sapin baumier et toutes les essences confondues pour le densitomètre (en bleu) et le résistographe (en rouge)..... 103
- 3.30 Schématisation de la direction des prises de mesure pour le densitomètre (direction longitudinale en rouge) et le résistographe (direction radiale en bleu) sur un des trachéides du pin gris (le schéma n'est pas à l'échelle)..... 110
- 3.31 Schématisation de l'orientation des plans physiques des carottes de bois en vue d'un scan au densitomètre à rayons X..... 111







## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Les domaines d'études de la dendrochronologie – tiré de Lebourgeois et Mérian (2012), Payette et Fillion (2010).....	26
2.1 Description de l'origine, du type, du dépôt de surface et du régime hydrique des peuplements échantillonnés, d'après Harvey et Leduc (2009).....	51
2.2 Descriptions des essences d'après Jessome (1977), Alemdag (1985), Gonzales (1990), Bowyer (2005), Zhang et Koubba (2009), Wheeler (2011), MFFP (2014).....	53
3.1 Comparaison des valeurs de masses volumiques mesurées avec les valeurs trouvées dans la littérature d'après Jessome (1977), Alemdag (1985), Gonzales (1990), Bowyer (2005), Zhang et Koubba (2009), Wheeler (2011) et MFFP (2014).....	67
3.2 Synthèse des résultats de régression linéaire (colonne « $R^2$ ») et de la lecture des graphiques (colonne « Profils »). Les signes -, $\pm$ et + indiquent respectivement une faible, moyenne et bonne corrélation entre les profils. Le signe $\leq$ indique que les valeurs mesurées par le résistographe sont sous-estimées par rapport au densitomètre et $\geq$ qu'elles sont surestimées. Le potentiel du résistographe en microdensitométrie est décrit d'après la coloration des cases : orange,	

vert et bleu indiquant respectivement un faible, moyen et bon  
potentiel, selon les résultats présentés en section 3.3 ..... 102

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

BI : Bois initial

BF : Bois final

FERLD: Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet

MFFP : Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs

UQAT : Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue

QMS : Quintek Measurement System



## RÉSUMÉ

La masse volumique du bois (aussi utilisée comme synonyme de la densité) est la caractéristique physique la plus utilisée dans le monde pour évaluer la qualité du bois. La plupart des appareils de mesure de la masse volumique du bois ne permettent d'obtenir qu'une valeur moyenne pour l'arbre, à l'exception du densitomètre à rayon X, qui permet d'accéder aux variations intercernes et intracernes de la masse volumique du bois. Néanmoins cette méthode de microdensitométrie (mesure des variations de densité à l'échelle microscopique) nécessite l'obtention d'échantillons dont le conditionnement est chronophage. En effet, chaque échantillon doit être nettoyé de ses extractibles (qui peuvent fausser la lecture de la densité par le densitomètre à Rayons X) suivant un procédé d'une durée de 48 heures puis séché à l'air pendant 4-7 jours. En réponse à ce problème, le résistographe est un appareil de mesure de la masse volumique du bois des arbres sur pied, couramment utilisé dans le cadre d'expertises pour qualifier l'état interne de l'arbre (présence de carie), de poutres ou pour mesurer les variations intercernes et intracernes de la masse volumique du bois (ces essais ont principalement été effectués sur des essences européennes). L'étude des profils générés par le résistographe s'apparente alors à une étude de microdensitométrie. Dans cette optique, ce projet propose d'évaluer le potentiel du résistographe comme outil de mesure des variations intracernes et intercernes de la croissance et de la masse volumique du bois des arbres sur pied. Les essences choisies pour la validation du potentiel du résistographe sont le thuya (*Thuja occidentalis* L.), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) le sapin baumier (*Abies balsamea* Mill), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx), le bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marshall) et le frêne noir (*Fraxinus nigra* Marshall). Ces essences ont été choisies pour leur importance commerciale. L'évaluation du

potentiel d'utilisation du résistographe en microdensitométrie se décline en deux objectifs. En premier lieu, les données de la résistance moyenne des arbres mesurées par le résistographe sont calibrées par les données de la masse volumique moyenne des arbres mesurées par un densitomètre à rayon X au moyen d'une régression linéaire. Le coefficient de régression linéaire calculé pour cette relation est de 0,75. Suite à cette calibration, l'évaluation du potentiel d'utilisation du résistographe en microdensitométrie s'est portée sur l'analyse des caractéristiques des cernes, telles que les largeurs et les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final par essence et toutes essences confondues. Pour ce faire, les estimations de ces caractéristiques par le résistographe ont été comparées à celle du densitomètre à rayon X par observation des profils radiaux et par calcul de régressions linéaires. Les corrélations des caractéristiques intercernes (largeur et masse volumique moyenne des cernes) entre le résistographe et le densitomètre sont fortes pour les essences confondues (les  $r^2$  associés sont respectivement de 0,93 et 0,85) et moyenne pour les caractéristiques intracernes des masses volumiques et largeurs du bois initial et du bois final. À l'échelle de l'essence, les corrélations intercernes sont moyennes à fortes pour la largeur du cerne (le  $r^2$  varie de 0,60 à 0,98) et faibles à moyennes pour la masse volumique (le  $r^2$  varie de 0,20 à 0,60). Pour les caractéristiques intracernes (largeur et masse volumique du bois initial et du bois final), les corrélations sont meilleures pour le sapin baumier, le pin gris et le peuplier faux-tremble que pour le frêne noir. Pour les feuillus à pores diffus (dont le peuplier faux-tremble) et les résineux (pin gris et sapin baumier), la structure anatomique du bois est plus homogène que pour les feuillus à zone initiale poreuse (comme le frêne noir). Or, le densitomètre mesure la masse volumique du bois par un faisceau laser de 0,04 mm qui ne touche que quelques cellules alors que le résistographe mesure la masse volumique du bois via une aiguille de 3 mm de diamètre; soit une mesure réalisée sur plusieurs centaines de cellules. Donc potentiellement pour les feuillus à zone initiale poreuse comme le frêne noir, le densitomètre peut échantillonner le vide cellulaire

d'un gros vaisseau alors qu'en parallèle le résistographe réalise une mesure sur plusieurs centaines de cellules, d'où différences entre les mesures des deux appareils. Ce phénomène expliquerait les faibles relations de corrélation entre le résistographe et le densitomètre pour les caractéristiques intracernes.

Mots clés : Densitomètre à rayon X, résistographe, masse volumique du bois, thuya, pin gris, sapin baumier, bouleau blanc, frêne noir, peuplier faux-tremble.



## PROBLÉMATIQUE

La masse volumique du bois (ou densité du bois) est une propriété physique qui permet de caractériser la masse de matière contenue dans un volume donné de bois (Bowyer *et al.* 2005; Zobel et Buijtenen, 1989). Elle sert généralement de critère descriptif de la qualité du bois, comme mesure indirecte de la résistance mécanique du bois en construction et en menuiserie (Bowyer *et al.* 2005), comme intrant au calcul de matière pour la production de pâtes (Bowyer *et al.* 2005; Gonzalez, 1990), des estimations de biomasse sur pied (Hackenberg *et al.* 2015) ou de comptabilité du carbone (Tremblay *et al.* 2006).

Si la densité moyenne du bois est la valeur la plus utilisée, il est important de comprendre qu'elle n'est pas homogène dans l'arbre d'une part et que ses patrons de variation ne sont pas aléatoires. À l'échelle macroscopique, la tendance liée à l'âge du bois induit une augmentation de la densité du bois de la moelle vers l'écorce (Bao *et al.* 2001; Trouy, 2015). À l'échelle des cernes, le bois initial formé du début du printemps à la fin de l'été est moins dense que le bois final formé du début de l'été au début de l'automne (Boulouf Lugo *et al.* 2012; Denneler, 2004). Plus généralement, la densité moyenne d'un cerne est la résultante des conditions de croissance: climat, occurrence d'épidémie d'insecte, site, traitements sylvicoles et de facteurs liés à l'arbre: âge cambial, origine clonale, provenance géographique (Lebourgeois and Merian, 2012; Payette and Filion, 2010). Les variations de la densité du bois à l'échelle des cernes constituent à cet égard des archives des conditions de croissance de l'arbre et peuvent servir de données utilisables en dendrochronologie (Lebourgeois and Merian, 2012; Payette et Filion, 2010). L'étude de la densité est appelée densitométrie (Payette et Filion, 2010) ou microdensitométrie lorsqu'elle est

effectuée à l'échelle des cernes. La microdensitométrie implique le prélèvement, destructif ou intrusif, d'échantillons sur les arbres (Gao *et al.* 2017; Lebourgeois Merian, 2012; Payette et Fillion, 2010). Les galettes prélevées pour les études de tiges nécessitent l'abattage des arbres (prélèvement destructif) alors que le carottage des troncs à la tarière de Pressler rompt la barrière biologique constituée par le cambium (prélèvement intrusif) (Gao *et al.* 2017). L'orifice formé par la tarière, d'environ 7 mm de diamètre sur un rayon de l'arbre, constitue un point d'entrée des agents pathogènes augmentant ainsi le risque d'infection et de mortalité des arbres (Mäkinen *et al.* 2007). Si le prélèvement des échantillons peut s'avérer long, leur conditionnement pour obtenir les variations de densité l'est encore plus puisqu'il est nécessaire de procéder à l'extraction des échantillons pour les débarrasser de leurs extractibles (Savva *et al.* 2010) avant de les scanner au moyen d'un laser à rayon X.

D'autres appareils de densitométrie des arbres sur pied existent, mais ne permettent pas d'obtenir les variations intracernes de la densité du bois des arbres sur pied. Dans cette optique, le résistographe est un appareil de mesure de densité du bois habituellement utilisé pour repérer la pourriture dans les arbres sur pied (Rinntech, 2016). Il effectue en une minute un perçage de 3 mm de diamètre et enregistre la résistance à l'enfoncement du bois (ou couple) rencontrée par la mèche. Le résistographe enregistre une mesure de résistance tous les 0,02 mm. Ainsi, lorsque le perçage est effectué selon le rayon d'un arbre, il est possible de visualiser les variations radiales de la résistance du bois (Gao *et al.* 2017; Rinntech, 2016; Wessels *et al.* 2011). Même s'il constitue un point d'entrée pour les pathogènes (Kerstenet Schwarze, 2005), l'orifice créé par le sondage est réduit par rapport à celui créé par la tarière de Pressler. Le constructeur de l'appareil montre que la résistance du bois est positivement corrélée à la densité du bois (Gao *et al.* 2017; Rinn *et al.* 1996) et qu'il est donc possible d'estimer les variations radiales de la densité du bois d'après les mesures effectuées par le résistographe. Ce niveau de résolution permet dans certains cas de distinguer les limites de cernes sur le profil obtenu avec un

résistographe et d'estimer ainsi les variations intracernes de la densité qui sont utilisées en microdensitométrie classique (Astrade et Miramont, 2010; Lukasziewicz *et al.* 2005; Rinn *et al.* 2009).

Rinn (1996) indique qu'une étape de calibration du résistographe est nécessaire avant de procéder aux estimations de la variabilité inter et intracerne de la densité du bois. Mais peu de travaux ont été effectués sur des essences canadiennes à l'exception du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) par Sharapov *et al.* (2018) et de l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.) par Rzem (2018). Dans cette optique, ce projet propose d'évaluer le potentiel du résistographe en microdensitométrie pour plusieurs essences commerciales de la forêt boréale.

Le cas échéant, la validation du résistographe en microdensitométrie permettrait de doter les forestiers d'un appareil calibré pour des essences locales, capable d'effectuer des mesures rapides et peu coûteuses du profil radial de la densité du bois des arbres sur pied qui pourraient être utilisées en sylviculture, par l'industrie des pâtes et de bois d'oeuvre ou dans le cadre des études de dendrochronologie.



## CHAPITRE I

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

#### 1.1 La densité du bois, une caractéristique physique de l'arbre

##### 1.1.1 Densité et masse volumique deux variables souvent confondues

La densité et la masse volumique du bois sont deux variables souvent confondues, mais qui n'expriment pas exactement la même donnée.

La masse volumique d'un échantillon de bois est le rapport entre la masse du bois et son volume (Bowyer *et al.* 2005; Briggs, 1994a; E. Boureau *et al.* 2016) et est exprimée en unité de masse par unité de volume pour le bois, par exemple. : kg/m<sup>3</sup>.

La densité, variable adimensionnelle est le rapport de la masse d'un liquide ou d'un solide à la masse d'eau occupant le même volume à la température de 4 °C (Bowyer *et al.* 2005; Zobel et Buijtenen, 1989). En pratique, la densité d'un matériau est sa masse volumique rapportée à la masse volumique de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>). Par exemple, si la masse volumique d'un bois est de 520 kg/m<sup>3</sup> sa densité est de 0,520.

##### 1.1.1.1 Mesure de la densité moyenne de l'arbre

Historiquement, l'estimation de la densité du bois d'un arbre est effectuée par volumétrie selon un échantillonnage destructif (Gonzalez, 1990; Kollmann, 1968). En

effet, l'arbre est débité en galettes desquelles sont extraits des échantillons cubiques. La mesure du volume (volumétrie) dans de l'eau ou du mercure (Kollmann, 1968; Polge, 1962) et du poids de ces échantillons permet de calculer leur densité (Bowyer *et al.* 2005; Gonzalez, 1990; Kollmann, 1968). Polge (1962) indique que les résultats de calcul de la masse volumique du bois par volumétrie des carottes et/ou des cubes de bois sont similaires.

La valeur moyenne de la densité du bois d'un arbre est issue de la compilation des valeurs de la densité des échantillons de cet arbre. La valeur moyenne de la densité d'une essence est issue de la compilation des valeurs moyennes de densité d'un ensemble d'arbres. La densité d'une essence est décrite principalement pour trois valeurs d'humidité du bois : à l'état vert lorsque l'arbre est encore vivant, à l'état sec (pour des conditions standards : à une humidité de l'air ambiant de 12% et une température de 21°C) et à l'état anhydre. La densité du bois à l'état sec est celle qui est utilisée en pratique, car elle correspond à des conditions standards de mise en œuvre des éléments de bois: menuiserie, ossature, charpente, etc (Bowyer *et al.* 2005).

Par la suite, l'utilisation de méthodes de mesures indirectes comme la radiométrie appliquée à des carottes de bois (Gonzalez, 1990; Kollmann, 1968; Polge, 1966, 1962) ont permis de mettre en œuvre des méthodes d'échantillonnages semi-destructives moins dommageables pour l'arbre. En effet, contrairement aux galettes, le prélèvement de carottes ne nécessite pas l'abattage de l'arbre. Le principe de la méthode est de mesurer l'absorption de rayons (X, bêta, ou gamma) par un échantillon de bois et de convertir cette donnée en densité (Payette et Filion, 2010; Polge, 1977, 1966; Quintek Measurement Systems, Inc., 1999). En pratique, un échantillon de bois d'épaisseur constante est placé sur un support mobile qui déplace l'échantillon sur une rampe à raison d'un pas fixe. À chaque pas, un faisceau laser de rayons X d'intensité  $I_0$  (intensité du rayon incident) traverse l'échantillon (Équation

1.1). Une partie du spectre de rayon X est absorbée par l'échantillon.  $I$ , l'intensité résultante (soit la partie du spectre qui n'a pas été absorbée) est mesurée par un capteur (Équation 1.1). La différence d'intensité entre  $I$  et  $I_0$  est positivement corrélée à la densité du bois et à l'épaisseur de l'échantillon (Payette et Filion, 2010; Polge, 1977, 1966) (Équation 1.1). La relation liant  $I$  et  $I_0$  est une fonction exponentielle conditionnée par la densité du bois  $\rho$ , l'épaisseur de l'échantillon  $x$  et le coefficient d'absorption  $c$ . Le coefficient d'absorption caractérise l'énergie absorbée par 1 cm<sup>3</sup> de l'échantillon lorsque le faisceau est de section 1 cm<sup>2</sup> (Équation 1.1); il dépend de la longueur d'onde du faisceau et de la matière composant l'échantillon (Polge, 1966).

$$I = I_0 e^{-c\rho x} \quad (1.1)$$

Équation 1.1 Relation exponentielle liant le rayon incident au rayon réfracté, avec  $I$  : intensité du rayon réfracté,  $I_0$  : intensité du rayon incident,  $c$  : coefficient d'absorption,  $\rho$  : densité et  $x$  : épaisseur de l'échantillon (Polge, 1966)

À l'inverse, il est possible de calculer la densité  $\rho$  (Équation 1.2) (Polge, 1966).

$$\rho = \frac{1}{cx} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (1.2)$$

Équation 1.2 Calcul de la densité d'après la différence d'intensité entre rayon incident et rayon réfracté, avec  $I$  : intensité du rayon réfracté,  $I_0$  : intensité du rayon incident,  $c$  : coefficient d'absorption,  $\rho$  : densité et  $x$  : épaisseur de l'échantillon (Polge, 1966)

La mesure de cette donnée sur l'ensemble de l'échantillon permet d'obtenir un graphique représentant les variations de la densité du bois le long des carottes. De même que pour la volumétrie, une valeur moyenne pour l'arbre est calculée après compilation des valeurs de la densité des différents échantillons.

La radiométrie<sup>1</sup> permet d'obtenir des estimations microscopiques des valeurs de densité, mais la méthode est chronophage à cause du prélèvement des carottes à la tarière de Pressler, des durées d'extraction d'autre part (48 heures par échantillon) et de la durée du séchage de 4 à 7 jours à l'air ambiant, ce qui restreint son utilisation à de petits jeux d'échantillons (Astrade et Miramont, 2010; Gao *et al.* 2017; Rinn *et al.* 1996)

De nos jours, des méthodes de mesures complémentaires sont utilisées pour estimer la densité moyenne de l'arbre sur pied en une mesure selon des méthodes de forage ou de tomographie du bois. Pour la méthode de forage utilisée, le principe est que la force nécessaire à l'enfoncement d'une aiguille dans le bois est corrélée positivement à la densité du bois (Chen *et al.* 2015; Gao *et al.* 2017, 2017; Palaia *et al.* 2008). Dans cette famille figurent le torsiomètre et le pylodin. Le principe du torsiomètre a été mise au point en 1970 par Polge et Keller (Cown, 1978; Gao *et al.* 2017, 2017), il consiste à mesure le couple (en  $\text{m}^2.\text{kg}.\text{s}^{-2}$ ) nécessaire au forage du bois sur une profondeur connue. Le torsiomètre est une tarière associée à un cadran (Polge et Keller, 1970). La force nécessaire au forage du bois est positivement corrélée à la densité du bois (Cown, 1978; Gao *et al.* 2017; Polge et Keller, 1970). La mesure peut s'effectuer in situ sur des arbres vivants (Polge et Keller, 1970). Pour ce faire, l'opérateur enlève un carré d'écorce sur l'arbre à échantillonner et appose le torsiomètre sur la partie dénudée pour effectuer un forage de 3,8 cm de profondeur sur 5 mm de diamètre. Lorsque le torsiomètre est stabilisé (Polge et Keller, 1970), la force nécessaire au forage est lue sur un cadran.

---

<sup>1</sup> Plusieurs constructeurs proposent des dispositifs de microdensitométrie par radiométrie à rayon X. Néanmoins l'appareil dont il est question dans ce mémoire provient du constructeur Quintek Measurement System Inc.

Polge et Keller (1970) initiateurs de la méthode rapportent une corrélation positive entre la force de forage et la densité du bois pour un coefficient de Pearson de 95%. Néanmoins, des expériences de répétabilité menées par Cown (1978) n'ont permis d'obtenir que des coefficients de Pearson de 60%. Ainsi, la précision de la corrélation entre force de forage et densité du bois est variable pour le torsiomètre, de 60 à 95% (Gao *et al.* 2017), ce qui incite à utiliser d'autres appareils potentiellement plus rapides pour lesquels la corrélation entre la mesure effectuée et la densité du bois présente un coefficient de Pearson stable, proche de 90% (Gao *et al.* 2017). Dans cette optique, le pilodyn (mis au point par Hoffmeyer en 1978) est un appareil concurrent du torsiomètre, plus rapide et dont les estimations de densité semblent être plus stables (Cown, 1978; Gao *et al.* 2017). Il se présente sous la forme d'une seringue. Comme pour le torsiomètre, l'opérateur enlève un carré d'écorce, appose le pilodyn et appuie sur un déclencheur qui actionne l'aiguille. Pour le torsiomètre, l'opérateur mesure la force nécessaire pour enfoncer l'aiguille à une profondeur connue. À l'inverse pour le pilodyn, l'opérateur applique une force connue pour enfoncer l'aiguille dans le bois (Cown, 1978; Gao *et al.* 2017) et mesure la profondeur à laquelle l'aiguille s'est enfoncée. La profondeur à laquelle l'aiguille s'enfonce est négativement corrélée avec la densité de -80 à -96% (Gao *et al.* 2017). La rapidité, l'exactitude des mesures et leur répétabilité de 90% (Greaves *et al.* 1996) permettent même d'utiliser l'appareil pour la sélection des cultivars d'après leur densité dans le cadre des programmes d'amélioration génétique (Gao *et al.* 2017; Greaves *et al.* 1996). Greaves *et al.* (1996) suggère un nombre de deux mesures pour estimer la densité moyenne de l'arbre. Il est à noter que le torsiomètre ne permettent d'effectuer que des mesures à en surface du tronc de l'arbre. Ainsi, des mesures locales et superficielles sont assimilées à la densité moyenne de l'arbre.

En tomographie, la méthode consiste à cartographier les variations de la densité du bois d'après les variations de la vitesse de propagation d'ondes acoustiques (Argus electronic gmbh, 2016; Bucur, 2006; Gilbert et Smiley, 2004) ou ultrasoniques (Fang *et al.* 2017). En pratique, une source apposée directement sur l'arbre émet des ondes qui se propagent dans le bois. Un émetteur dont la distance à la source est connue est apposé sur l'arbre et mesure le temps nécessaire à la propagation des ondes pour calculer leur vitesse. La vitesse de propagation des ondes est négativement corrélée avec la densité (Équation 1.3; Bucur, 2006; Fang *et al.* 2017).

$$V = \sqrt{\frac{\mu g}{\rho}} \quad (1.3)$$

Équation 1. 3 Relation de corrélation négative liant la célérité des ondes  $V$ , la densité  $\rho$  du matériau, le module d'élasticité du matériau  $\mu$  et la constante gravitationnelle universelle  $g$

Le Picus ® Sonic Tomograph (Argus electronic gmbh, 2016) est un exemple d'appareil qui cartographie les variations de la densité interne de l'arbre sur pied d'après l'analyse de la vitesse de propagation d'ondes sonores dans une section ou un volume d'arbre (Argus electronic gmbh, 2016; Gilbert et Smiley, 2004). Le Picus ® Sonic Tomograph est utilisé pour caractériser l'état de dégradation interne des arbres et se prête bien à l'expertise d'arbres ou d'éléments en bois tels que des poutres. Mais la mise en place des capteurs de l'appareil et de ses capteurs est chronophage, ce qui limite son utilisation à de petits nombres d'échantillons.

### 1.1.1.2 La densité, un indicateur de la qualité du bois indispensable à l'industrie forestière<sup>2</sup>

La densité du bois est le dénominateur commun entre toutes les filières de l'industrie forestière, de l'estimation de la biomasse sur pied en forêt à la description de la qualité des pièces en bois mises en œuvre en construction.

#### 1.1.1.2.1 La densité du bois en forêt, indicateur de la productivité des peuplements

La densité du bois sert d'intrant au calcul de la biomasse sèche contenue dans un peuplement (Hackenberg *et al.* 2015) et à l'estimation des stocks de carbone (Tremblay *et al.* 2006). La quantité de biomasse sèche peut être utilisée pour étudier la productivité des peuplements (Bouriaud *et al.* 2005; Hackenberg *et al.* 2015; Wassenberg *et al.* 2015) et permettre aux aménagistes d'ajuster leurs prescriptions sylvicoles (Polge, 1963; Polge et Keller, 1973; Zobel et Buijtenen, 1989). Par exemple, la fabrication de palettes, de placages, de pâtes ou de panneaux est inhérente à la valeur de la densité du bois (Gonzalez, 1990; Dickman *et al.* 2002). À cet égard, la densité est l'un des paramètres surveillés dans la recherche d'augmentation de productivité des peuplements de peupliers via une croissance plus rapide, car si elle diminuait, la qualité des produits issus de la transformation du bois serait amoindrie (Seco et Barra, 1996).

Comme la densité du bois est une propriété à forte composante héréditaire (Latutrie *et al.* 2016; Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010; Yu *et al.* 2001), elle est aussi utilisée dans les programmes d'amélioration génétique des variétés comme marqueur de l'origine clonale (Bouffier *et al.* 2008; Isik et Li, 2003; Pliura *et al.* 2007, 2007). Il s'agit donc d'un indicateur qui permet de sélectionner les cultivars qui présenteront la meilleure valeur de densité (Zobel et Buijtenen, 1989).

---

<sup>2</sup> La liste des utilisations présentée n'est pas exhaustive.

#### 1.1.1.2.2 Utilisations de la densité pour la transformation du bois

La densité du bois est aussi utilisée en papeterie pour estimer la quantité de matière nécessaire à la fabrication de la pâte (Briggs, 1994a; Hart, 2010). Il en est de même pour la fabrication des panneaux et des matériaux composites à base de bois (Gonzalez, 1990; Hart, 2010; Dickman *et al.* 2002). Dans le domaine du bois d'œuvre, la densité, en tant que caractéristique physique du bois, est souvent utilisée comme approximation de la qualité du bois (Bowyer *et al.* 2005; Gonzalez, 1990; Palaia *et al.* 2008). Dans le cas des feuillus nobles (érables, chênes, frênes), une densité élevée est recherchée afin d'assurer aux éléments de menuiserie (escaliers, parquets, meubles) une bonne résistance aux chocs (Centre de recherche industrielle du Québec, 2002).

#### 1.1.1.2.3 La densité du bois, approximation des propriétés mécaniques en construction

En construction, le module d'élasticité longitudinal du bois (MOEL), c'est-à-dire le taux de déformation d'une pièce de bois selon une contrainte donnée (Bowyer *et al.* 2005), est une propriété mécanique du bois positivement corrélée à la densité et utilisée pour calculer les reprises de charges des bâtiments (Bowyer *et al.* 2005) (Gonzalez, 1990; Hart, 2010; Kollmann, 1968; Palaia *et al.* 2008; Pollet *et al.* 2018). Néanmoins, la densité seule ne permet pas de calculer directement le MOEL (Hart, 2010; Pollet *et al.* 2018). Elle est utilisée comme intrant dans les dispositifs utilisant des ultrasons pour estimer le MOEL (Fang *et al.* 2017; Gao *et al.* 2017). En effet l'équation 3 fait apparaître que la célérité des ondes est fonction du MOEL ( $\mu$  dans l'équation.3), de la densité du bois et de la constante gravitationnelle universelle  $g$ . De fait, lorsque la densité du bois et la célérité des ondes sont connues, il est possible d'estimer le MOEL (Fang *et al.* 2017; Wang *et al.* 2007). Dans cette optique, la surveillance de l'état de dégradation des éléments structuraux en bois d'un bâtiment

peut être réalisée à partir de l'analyse de la densité du bois (Astrade et Miramont, 2010; Bertolini Cestari *et al.* 2002; Palaia *et al.* 2008).

### 1.1.2 La densité moyenne de l'arbre est une résultante des variations macro et microscopiques de la densité

#### 1.1.2.1 Notion de densité dans un matériau poreux, le bois

Le bois est un tissu végétal secondaire lignifié (Trouy, 2015). Il contribue au port érigé des arbres grâce à sa résistance mécanique. Le bois est une structure poreuse constituée de cellules, qui conduit les flux de sèves nécessaires à la croissance des organes reproducteurs et végétatifs, stocke des réserves de composés carbonés (Payette et Filion, 2010; Ruelle, 2016; Trouy, 2015) et des substances protectrices antifongiques (Trouy, 2015). Les parois cellulaires sont composées de celluloses, d'hémicelluloses, de pectines et de lignines qui s'agencent autour du lumen (vide cellulaire) (Bowyer *et al.* 2005; Bucur, 2006; Payette et Filion, 2010; Trouy, 2015). La densité du bois est négativement corrélée à sa porosité (Bowyer *et al.* 2005; Briggs, 1994b; Bucur, 2006). La fonction du bois est similaire entre feuillus et résineux, mais les structures anatomiques diffèrent entre ces deux groupes (Bowyer *et al.* 2005; Payette et Filion, 2010; Trouy, 2015).

##### 1.1.2.1.1 Résineux et bois homoxylé

Dans le bois homoxylé des résineux, le soutien mécanique de la tige et la conduction des sèves sont assurés par un seul type de cellules lignifiées: les trachéides, qui constituent 90% du volume de l'arbre, d'où l'appellation homoxylé (Ruelle, 2016). Les cellules parenchymateuses radiales conduisent la sève le long des rayons ligneux et stockent les réserves (Ruelle, 2016; Trouy, 2015). D'autres tissus peuvent être présents en fonction des espèces considérées (Trouy, 2015). Les canaux résinifères, par exemple, sécrètent la résine et contribuent à la protection de l'arbre contre les

pathogènes (Trouy, 2015). Chez certaines espèces, du parenchyme longitudinal peut être présent et contribuer aussi au transport de sève (Trouy, 2015).

#### 1.1.2.1.2 Feuillus et bois hétéroxylé

À l'inverse des résineux, les feuillus présentent un bois hétéroxylé, c'est à dire que la conduction de sève et le soutien mécanique sont assurés par des cellules différentes (Payette et Filion, 2010; Trouy, 2015). Les éléments de vaisseaux qui conduisent la sève sont constitués d'un empilement de cellules mortes dont le diamètre est plus important dans le bois initial que dans le bois final (Payette et Filion, 2010; Ruelle, 2016; Trouy, 2015). Les cellules parenchymateuses stockent des réserves carbonées, des gommés (substances cicatrisantes), ou des composés antifongiques et transportent de l'eau (Ruelle, 2016; Trouy, 2015). Le parenchyme est organisé en rayons ligneux - de la moelle vers l'écorce- ou en files longitudinales -des racines au houppier- (Ruelle, 2016; Trouy, 2015). Les éléments de vaisseaux peuvent être accompagnés de trachéides pour compléter la conduction vasculaire. Des canaux résinifères traumatiques peuvent aussi être présents en plus des vaisseaux et autres parenchymes (Ruelle, 2016; Trouy, 2015). Les fibres quant à elles représentent entre 50 et 60 % de la masse de bois et confèrent au bois des propriétés physiques (densité) et mécaniques (modules d'élasticité, résistance à l'enfoncement) variables (Huber, 2011; Ruelle, 2016; Trouy, 2015). La densité est positivement corrélée à la proportion de fibres dans le bois (Ruelle, 2016; Trouy, 2015).

#### 1.1.2.1.3 Le cambium est l'organe de production du bois dans l'arbre

Les arbres en tant que végétaux ligneux se développent grâce à deux types d'organes de croissance que sont les méristèmes apicaux, situés à l'extrémité des branches et le cambium, situé sur la périphérie du tronc entre l'écorce et le bois (Payette et Filion, 2010; Trouy, 2015). Les méristèmes apicaux assurent la croissance primaire en hauteur, tandis que le cambium, organe de croissance secondaire, est à l'origine de l'accroissement en diamètre du tronc, des racines et des branches (Morel, 1960;

Trouy, 2015). Le cambium est donc le tissu à partir duquel sont formées toutes les cellules constitutives du bois (Trouy, 2015). Cet organe est le siège de divisions cellulaires (mitoses) qui génèrent des cellules initiales dont la différenciation permet la mise en place d'éléments structuraux (fibres, trachéides), de stockage (parenchyme) ou conducteur de sève (vaisseaux, trachéides) (Bannan, 1954; Trouy, 2015).

#### 1.1.2.2 Variations macroscopiques de la densité du bois

##### 1.1.2.2.1 La densité du bois est inhérente à la provenance des individus

Pour une population d'arbres de la même espèce située sur un même site, la synchronicité de croissance entre les individus, incarnée par la variation de la largeur des cernes, est d'autant plus importante que la provenance (origine géographique, famille, clone) est différente (Housset *et al.* 2016; Latutrie *et al.* 2016). À ce titre, la densité du bois est aussi une caractéristique des cernes dépendante de la provenance des arbres (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion 2010; Polge, 1977; Zobel et Buijtenen, 1989).

Pour les conifères à bois dur (pins, mélèzes, douglas, etc), l'héritabilité de la densité varie entre 0,40 et 0,70 % (Zobel et Buijtenen, 1989). Nepveu (1982) trouve une héritabilité de 0,65% pour la densité du bois sur des jeunes rameaux de chêne. L'héritabilité peut être modérée (environ 20%) à forte (supérieure à 50%) (Gallo *et al.* 2018) pour les peupliers (Brouard, 2018; Huda, 2014; Zobel et Buijtenen, 1989) et l'eucalyptus (Gallo *et al.* 2018; Zobel et Buijtenen, 1989) pour lesquels les programmes d'amélioration génétique utilisant la densité comme approximation de la qualité du bois existent depuis longtemps (Zobel et Buijtenen, 1989).

#### 1.1.2.2.2 La densité du bois varie avec l'âge cambial.

La qualité des cellules produites par le cambium varie avec son âge. Le cambium jeune produit le bois juvénile peu dense et prompt à assurer la flexibilité de la tige (Trouy, 2015). Au fur et à mesure du développement de l'arbre, le cambium devenu mature produit le bois mature plus dense conférant une rigidité suffisante à l'arbre pour son maintien (Trouy, 2015). La dichotomie de fonctionnement entre cambium jeune et cambium mature est responsable de la variation macroscopique de la densité (R1, Figure 1.1).

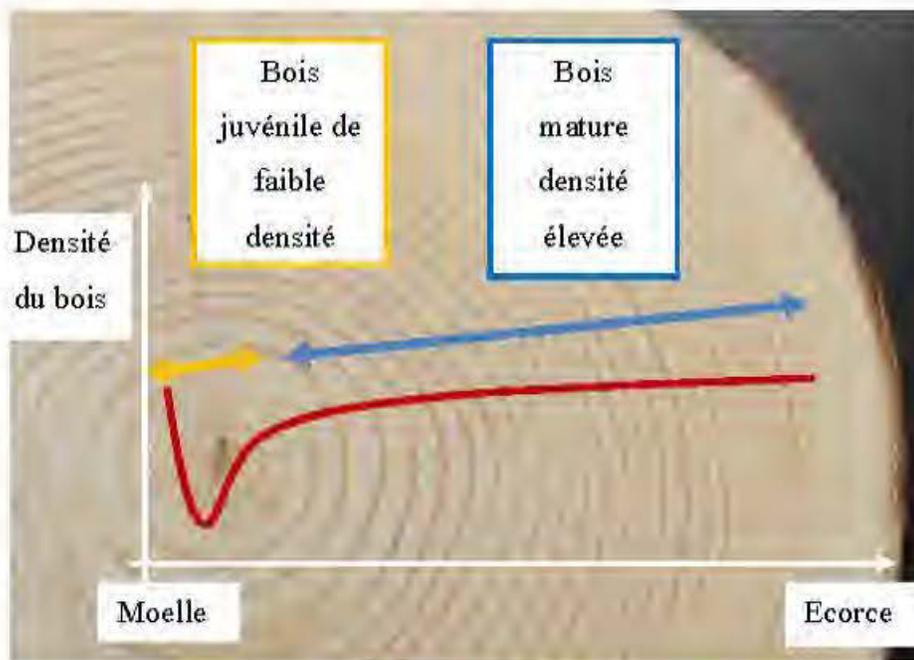


Figure 1.1 Représentation de la variation de la densité avec l'âge cambial, sur une galette de pin gris, tiré de Payette et Filion, (2010), Trouy, (2015) et Caceres Cuadros (2016). Les zones de bois juvénile et de bois mature sont délimitées respectivement par les doubles-flèches jaune et bleue.

De manière générale, l'industrie de la transformation du bois est friande de bois à la densité élevée. Les résineux ayant subi une croissance rapide en bas-âge peuvent présenter une proportion importante de bois juvénile peu dense, ce qui est à éviter (Bowyer *et al.* 2005; Zobel et Buijtenen, 1989). Les traitements sylvicoles ou l'amendement du sol peuvent causer une augmentation de la proportion du bois juvénile (Bowyer *et al.* 2005; Zobel et Buijtenen, 1989) et leur utilisation doit donc être prudente si l'objectif sylvicole est d'obtenir des arbres à bois de haute densité (Bowyer *et al.* 2005; Polge, 1966; Zobel et Buijtenen, 1989). Il est à noter que la proportion du bois juvénile est aussi fortement dépendante de la provenance. À cet égard, le choix des semis à utiliser pour les plantations est important lorsque l'objectif final de la transformation est inhérent à la densité du bois (Zobel et Buijtenen, 1989).

#### 1.1.2.2.3 Bois de réaction

Lorsque les arbres sont soumis à des contraintes de gravité fortes, par exemple topographie accidentée et chablis, le cambium peut développer du bois de réaction pour permettre au tronc de se redresser (Clair et Thibaut, 2014; Payette et Filion, 2010; Trouy, 2015). Il s'agit d'un tissu de soutien qui assure la persistance du port dressé des arbres (Clair et Thibaut, 2014; Trouy, 2015).

Si la fonction du bois de réaction est la même pour les résineux et les feuillus, les modalités de formation de ce tissu sont différentes pour les deux groupes (Clair et Thibaut, 2014; Payette et Filion, 2010; Trouy, 2015). Les résineux forment le bois de réaction sur la portion du tronc qui subit une compression alors qu'à l'inverse, il est localisé sur la portion du tronc qui subit une traction pour les feuillus (Clair et Thibaut, 2014; Payette et Filion, 2010; Trouy, 2015, Figure 1.2). Dans les deux cas, la densité du bois de réaction est supérieure à la densité du bois normal et les cernes affectés sont aussi plus sombres et plus larges (Clair et Thibaut, 2014).

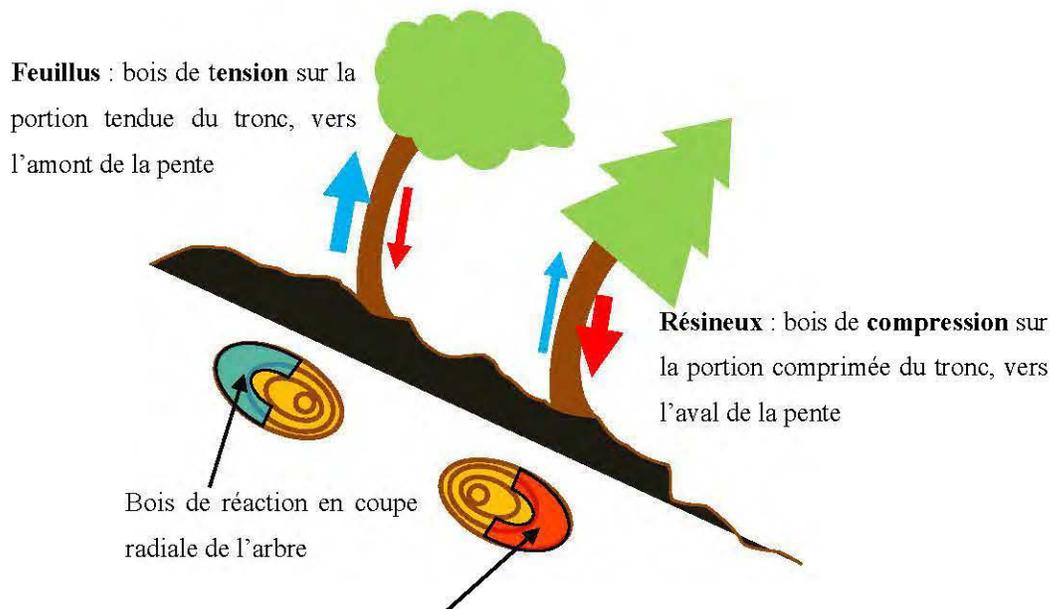


Figure 1.2 Schéma explicatif de la localisation du bois de réaction: compression (en rouge) pour les résineux et tension (en bleu) pour les feuillus. Adapté de Trouy (2015) et Payette et Fillion (2010)

### 1.1.2.3 Les variations microscopiques de la densité du bois: effet des conditions de croissance

#### 1.1.2.3.1 L'activité saisonnière du cambium et variations intracernes de la densité du bois

Dans les pays tempérés, l'activité de divisions cellulaires (mitoses) du cambium est cyclique et corrélée au défilement des saisons (Catesson et Lachaud, 1993). La reprise d'activité mitotique du cambium au printemps est liée à l'augmentation de la température (Begum *et al.* 2013; Morel, 1960), de l'ensoleillement (Huber, 1984; Jacquiot, 2009; Morel, 1960) et de l'action de phytohormones (Catesson et Lachaud, 1993). Ce phénomène est illustré en Figure 1.3.

Les cellules formées à cette période constituent le bois initial plus clair (bois initial (BI) en vert sur la Figure 1.3) soit de la mi-mai à mi-juin au Québec (Boulouf Lugo *et al.* 2012; Denneler, 2004). Les cellules conductrices de sève présentent un lumen large et des parois cellulaires fines pour assurer la conduction de gros volumes de sève et permettre la croissance de l'arbre du printemps à la fin de l'été, ce qui confère au bois initial une densité faible (Figure 1.3). Du début de l'automne jusqu'en septembre, le cambium produit le bois final plus foncé (bois final (BF) en rouge sur la Figure 1.3) avant l'arrêt annuel de croissance (Boulouf Lugo *et al.* 2012). Les parois des cellules vasculaires sont plus épaisses, le lumen est réduit et la conduction de sève est alors limitée (Jacquiot, 2009; Morel, 1960; Ruelle, 2016) ce qui confère au bois final une densité élevée (Figure 1.3). Les divisions cellulaires et autres activités métaboliques cessent progressivement, jusqu'au printemps suivant (Catesson et Lachaud, 1993). Ce fonctionnement cyclique induit une dichotomie des valeurs de la densité du bois formé entre le printemps et l'automne, ainsi le bois initial est moins dense (Figure 1.3) que le bois final (Payette et Fillion, 2010; Trouy, 2015). De fait, la densité du cerne est positivement corrélée à la proportion du bois final (Zhang *et al.* 2006).

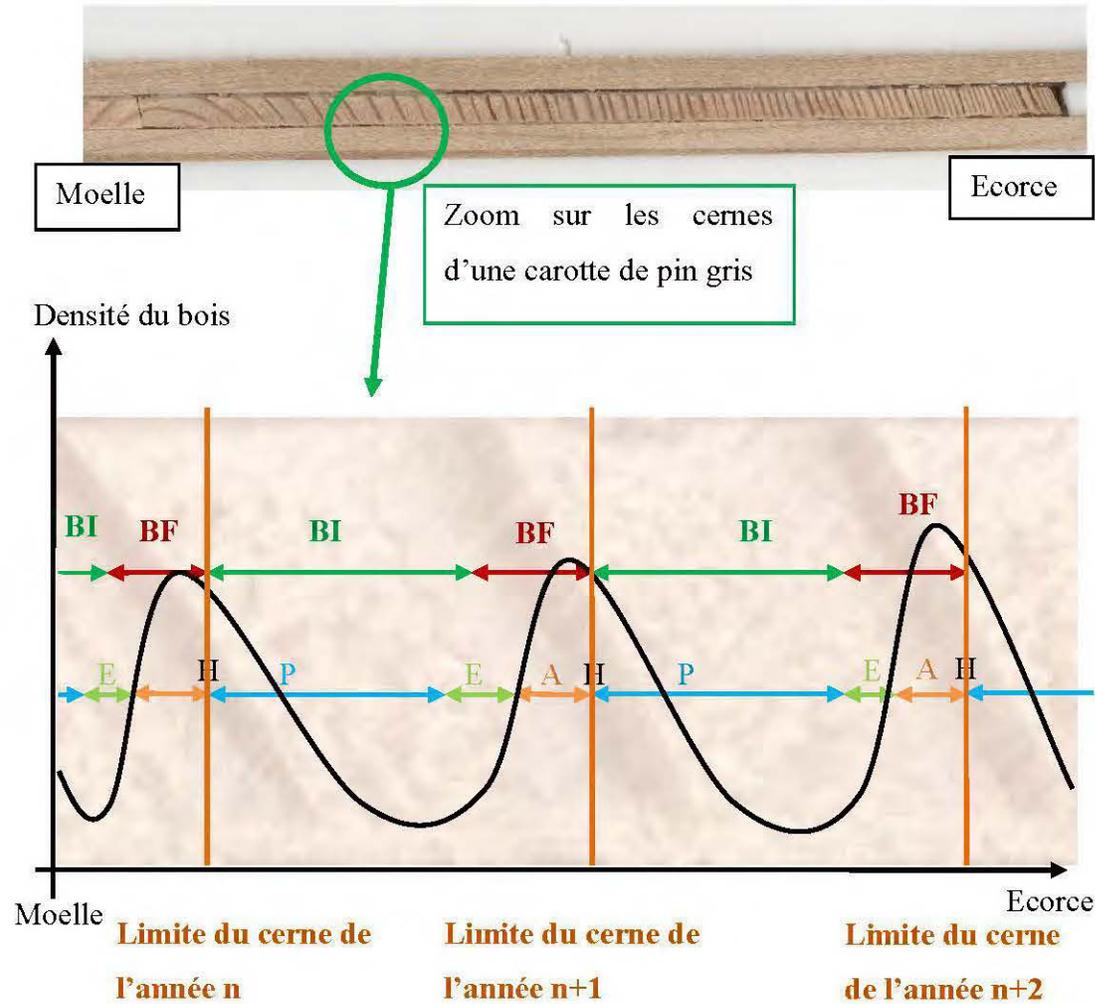


Figure 1.3 Variations microscopiques intracernes de la densité du bois liée au fonctionnement saisonnier du cambium, tiré de Catesson and Lachaud, (1993); Payette et Filion, (2010); Trouy, (2015). Le cambium produit le bois initial peu dense (BI en vert) du début du printemps (P en bleu) au milieu de l'été (E en vert) et du bois final dense (BF en rouge) du milieu de l'été à la fin de l'automne (A en orange). L'activité du cambium est nulle durant l'hiver (H en noir).

La répartition et l'anatomie des vaisseaux dans la largeur du cerne permettent de distinguer trois catégories de feuillus. Les arbres à zone initiale poreuse (ZIP) – par exemple, le chêne rouge (*Quercus rubra*) et le frêne noir (*Fraxinus nigra*) – présentent des vaisseaux larges dans le bois initial et réduits dans le bois final (Trouy, 2015). Les feuillus à zone initiale semi-poreuse (ZSP) – par exemple, les peupliers faux-trembles<sup>3</sup> – produisent des vaisseaux dont la taille diminue progressivement entre le bois initial et le bois final (Trouy, 2015). Les vaisseaux d'arbres à bois homogènes ou à pores diffus – par exemple le bouleau à papier et les peupliers faux-trembles – ne présentent pas de variation de taille et sont répartis uniformément dans la largeur du cerne (Trouy, 2015). Pour cette catégorie, la limite du cerne annuel est marquée par une rangée de cellules aplaties.

La répartition spatiale des vaisseaux dans le bois induit une variation intracerne du profil de la densité entre les différents groupes de vascularisation (Payette et Fillion, 2010; Polge, 1966; Rinn, 2012b; Rinn *et al.* 1996). Pour les feuillus à zones semi-poreuses ou à pores diffus, les variations de la densité du bois entre le bois final et le bois initial sont minimales, ce qui implique que les variations intracernes et intercernes de la densité peuvent se confondre comparativement aux conifères pour lesquels la délimitation entre le bois initial et le bois final est marquée (Payette et Fillion, 2010; Rinn *et al.* 1996). Pour les feuillus à zone initiale poreuse comme le chêne, les variations de la densité entre le bois initial et le bois final sont marquées (Payette et Fillion, 2010; Polge, 1966). Néanmoins, la présence irrégulière de parenchyme et des fibres peut conduire à des erreurs d'estimation de la densité lorsque le densitomètre à rayon X est utilisé (Polge, 1966). Les allures des profils intracernes de la densité sont illustrés à la Figure 1.4.

---

<sup>3</sup> Le peuplier faux-tremble est classé dans les deux catégories de vascularisation : à pores diffus et à zone initiale semi-poreuse.

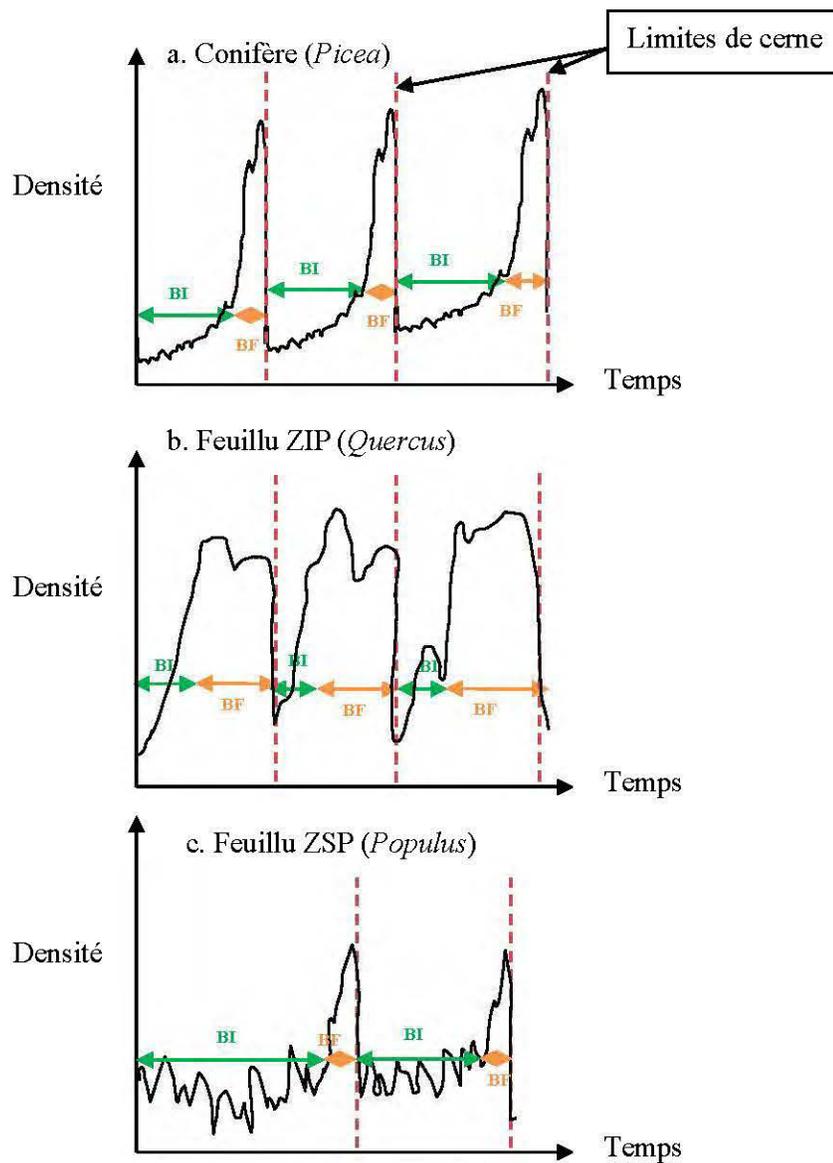


Figure 1.4 Schéma représentatif des variations des patrons intracernes de la densité , tiré de Payette et Fillion ( 2010). Les limites de cernes se discernent facilement pour les conifères (a) et les feuillus à zone initiale poreuse (b). De même la distinction entre bois initial (BI, en vert) et bois final (BF, en orange) est aisée. En revanche les variations intra et intercernes de la densité se confondent pour les feuillus à pores diffus et à zone semi-poreuse (c)

#### 1.1.2.3.2 Accroissement radial et densité des cernes

Toute modification des conditions de croissance modifie potentiellement l'activité cambiale (Locosselli, 2018) et de manière indirecte la densité du bois (Mer, 1892; Zobel et Buijtenen, 1989). Il est néanmoins délicat d'établir un modèle conceptuel généralisé concernant les variations de la densité du bois, car si la fonction du cambium est identique entre feuillus et résineux, les cellules de bois formées n'en demeurent pas moins différentes et pour une même modification des conditions de croissance, les variations de la densité du bois peuvent être différentes entre les deux groupes (résineux et feuillus) (Bowyer *et al.* 2005; Payette et Filion, 2010), voire entre les espèces, en particulier pour les feuillus (Payette et Filion, 2010; Zobel et Buijtenen, 1989).

Dans le groupe des résineux, deux catégories se distinguent par rapport à l'effet de la croissance sur la densité du bois (Ruelle, 2016; Trouy, 2015; Zobel et Buijtenen, 1989). Pour les résineux de genres *Abies*, *Picea* et *Cupressus*, un accroissement radial rapide est négativement corrélé à la densité des cernes. En effet, lorsque la croissance radiale de l'année  $N$  est supérieure à celle des années précédentes, la largeur du cerne  $N$  est supérieure à celles des cernes antérieurs (Trouy, 2015). La proportion en bois initial moins dense est plus importante et induit une diminution de la densité du cerne annuel par rapport aux cernes précédents (Ait Si Said, 2017; Barbour *et al.* 1994; Dutilleul *et al.* 1998; Zhang *et al.* 2006). Pour les autres résineux du genre *Pinus* (à bois dur), *Pseudotsuga* et *Larix*, les variations de l'accroissement radial sont sans conséquence sur la densité des cernes, car les proportions de bois initial et final sont inchangées (Pollet *et al.* 2018; Trouy, 2015; Zobel et Buijtenen, 1989).

Dans le groupe des feuillus, les essences à zone semi-poreuse se distinguent des autres, car la densité est positivement corrélée à l'accroissement radial (Bowyer *et al.* 2005; Trouy, 2015; Zobel et Buijtenen, 1989). En effet pour les feuillus à zone semi-poreuse, une augmentation de la largeur du cerne avec une plus grande proportion du

bois final (Fritts, 1962), augmente ainsi la densité du bois (Polge et Keller, 1973; Ruelle, 2016; Trouy, 2015). Ces effets de la croissance sur la densité du bois pour les résineux et les feuillus sont des assertions générales et beaucoup d'exceptions ont été relevées (Bowyer *et al.* 2005; Zobel et Buijtenen, 1989). Il peut en effet arriver que la relation entre le taux de croissance et la densité des cernes ne soit pas toujours évidente. Par exemple, Zobel et Buijtenen (1989) indiquent dans leur revues de littérature que la corrélation entre le taux de croissance et la densité des cernes pour le pin taeda (*Pinus taeda*) est nulle pour certaines études et négative pour d'autres. Polge et Keller (1973) montrent que pour les chênes pédonculés et sessiles (*Quercus robur* et *Quercus petraea*), la corrélation entre le taux de croissance et la densité des cernes n'est pas toujours positive et peut être nulle même pour des individus d'une même parcelle, ce qui est mentionné aussi par Zobel et Buijtenen (1989).

Ainsi, les variations d'accroissement radial seules ne permettent pas de prédire la densité du bois (Bowyer *et al.* 2005; Polge et Keller, 1973; Zobel et Buijtenen, 1989). Il est préférable de s'intéresser à la proportion du bois final dans les cernes (Bowyer *et al.* 2005; Zobel et Buijtenen, 1989) avec laquelle la densité est positivement corrélée (voir section 1.1.2.2, paragraphe 1). De manière générale, de nombreux facteurs (climats, génétique, pratiques sylvicoles, âge) peuvent avoir des effets antagonistes et des interactions sur la densité du bois. En ce sens, il peut être difficile d'identifier l'influence d'un facteur seul sur la densité des cernes (Zobel et Buijtenen, 1989).

### 1.1.3 La dendrochronologie, utiliser les arbres comme archives

Comme expliqué en section 1.1.2, toute variation des conditions de croissance a des conséquences sur la croissance radiale et la densité du bois et réciproquement toute variation des conditions de croissance est visible par observation des cernes du bois (Dutilleul *et al.* 1998; Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010). Dans cette optique, la dendrochronologie est un domaine qui propose d'utiliser les caractéristiques des cernes du bois comme archives des variations des conditions de croissances (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010). Elle repose sur la mesure des largeurs des cernes annuels de croissance, éventuellement de leur densité et leur datation précise. En dendroécologie, l'étude de la croissance radiale par rapport à différents facteurs - conditions climatiques (Leonelli *et al.* 2008; Tardif et Conciatori, 2006), traitements sylvicoles (Barbour *et al.* 1994; Koga *et al.* 2007; Zhang *et al.* 2006), génome (Beaulieu et Bousquet, 2010) - peut être une fin pour permettre de guider les aménagistes à choisir leurs traitements sylvicoles (Yu *et al.* 2001). Elle peut aussi servir d'outil pour les reconstructions à l'échelle du paysage ou du peuplement: évolution du climat et de ses anomalies (Graumlich et Brubaker, 1986; Ols *et al.* 2016), cycles d'épidémies d'insectes (Huang *et al.* 2008; Sutton et Tardif, 2007) ou de feu (Bergeron et Charron, 1994), voire les variations de la pollution atmosphérique (Innes et Cook, 1989; McLaughlin, 1998) et la datation d'objets anciens en archéologie (Lebourgeois et Merian, 2012; Stokes et Smiley, 1996). À chaque type d'étude correspond ses techniques de dendrochronologie qui sont recensées dans le Tableau 1.1.

### 1.1.3.1 Application de la densitométrie en dendrochronologie

Tout comme les variations de la largeur de cernes, les variations microdensitométriques de la densité du bois constituent une archive des conditions et des évènements passés subis par l'arbre (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010; Polge et Keller, 1969). La densitométrie en plus de fournir les largeurs de cernes permet de connaître les variations microscopiques radiales de la densité du bois (variations intracernes et intercernes).

Tableau 1.1 Les domaines d'études de la dendrochronologie – tiré de Lebourgeois et Mérian (2012), Payette et Filion (2010)

Domaine	Discipline	Applications
Écologie	Dendroécologie	Historique des feux, dépérissement des forêts, dynamique et croissance...
Aménagement forestier	Sylviculture	Effet des traitements sylvicoles, programmes d'amélioration génétique des cultivars
Climatologie	Dendroclimatologie	Reconstruction du climat passé...
Géologie	Dendrogéomorphologie	Éruptions volcaniques...
Anthropologie	Dendroarchéologie	Datation des constructions anciennes, arbres fossiles, monuments historiques...

L'analyse microdensitométrique consiste à déterminer les valeurs de densité des cernes du bois sur un profil radial de l'arbre et d'analyser les variations intra et intercernes. Initiée par Polge (1966), la méthode de microdensitométrie par clichés radiographiques a été améliorée et son utilisation s'est répandue (Payette et Filion, 2010). De même que pour les méthodes précédentes, des carottes de bois sont prélevées sur un arbre à l'aide d'une sonde de Pressler (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010). Elles sont ensuite débarrassées de leurs extractibles (Grabner *et al.* 2005) -terpènes, phénols, matières grasses, sucres (Kebbi-Benkeder *et al.* 2016)- à l'aide de bains de solvants organiques et d'eau (Savva *et al.* 2010). Cette étape permet d'améliorer la lisibilité du profil densitométrique par l'appareil, car les extractibles présents dans le bois peuvent fausser les valeurs de la densité du bois (Grabner *et al.* 2005). En pratique, un échantillon est placé sur un support mobile qui le déplace sur une rampe à raison d'un pas fixe. À chaque pas un faisceau laser de rayons X traverse l'échantillon. Le taux d'absorption de rayon X par l'échantillon (rayon réfracté/rayon incident) traduit la densité du bois, plus le bois est dense plus il absorbe de rayons (voir section 1.1.1.2). La mesure de cette donnée sur l'ensemble de l'échantillon permet d'obtenir un graphique représentant les variations de la densité du bois le long d'une carotte pour une résolution au mieux de 0,02 mm (Quintek Measurement Systems, Inc., 1999, Figure 1.5). Les cernes annuels des carottes de bois sont dénombrés avec le logiciel QMS Tree Ring System (Quintek Measurement Systems, Inc., 1999). Les limites de cernes sont figurées par un triangle jaune sur la Figure 1.5. La carotte de bois photographiée est superposée à son profil radial microdensitométrique. L'étape suivante la délimitation des portions du bois initial et du bois final des cernes qui permettra d'évaluer les effets de l'environnement, des traitements sylvicoles sur la croissance cambiale (voir sections 1.2.2.2 et 1.1.3.1). Un algorithme rédigé sur matlab par Koubaa *et al.* (2002) permet de calculer automatiquement les proportions de bois initial et de bois final.

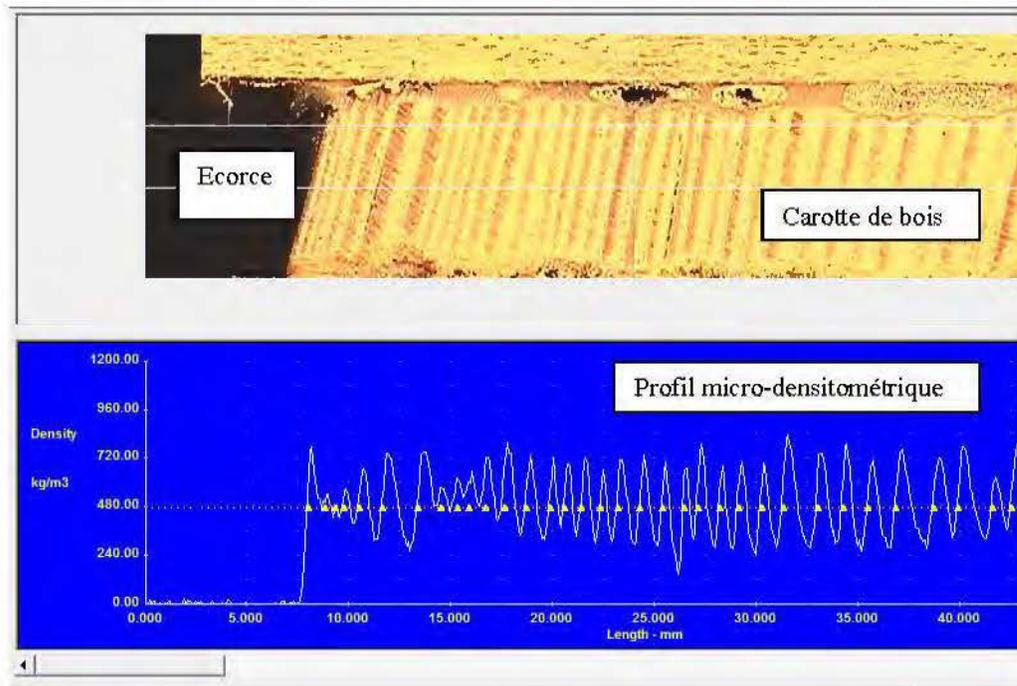


Figure 1.5 Exemple de profil microdensitométrique d'une carotte de pin gris mesuré avec le logiciel QMS Tree ring analyzer (Quintek Measurement Systems, Inc., 1999). La carotte de bois photographiée est superposée à son profil radial microdensitométrique

Néanmoins, la délimitation du point de transition entre bois initial et bois final est déterminée d'après une valeur fixe : soit une valeur de densité moyenne des échantillons calculée par l'opérateur (représentée par la ligne en tiret et les étoiles en bleu sur la Figure 1.6). L'utilisation de cette méthode induit un biais à cause des variations du profil de densité intercerne (Payette et Filion, 2010; Polge et Keller, 1969). La méthode de calcul du point de transition proposée par Koubaa *et al.* (2002) est la plus recommandée car elle reflète mieux la variabilité intercernes (Payette et Filion, 2010). En assimilant les variations radiales intracernes de densité à une courbe polynomiale, il est possible de calculer la largeur des bois initial et final des cernes annuels via une analyse de fonction, en partant du principe que le point de transition bois initial/ bois final correspond à un point d'inflexion du polynôme (Koubaa *et al.*

2002). Le point de transition calculé par Koubaa *et al.* (2002) est figuré par une étoile rouge sur la Figure 1.6.

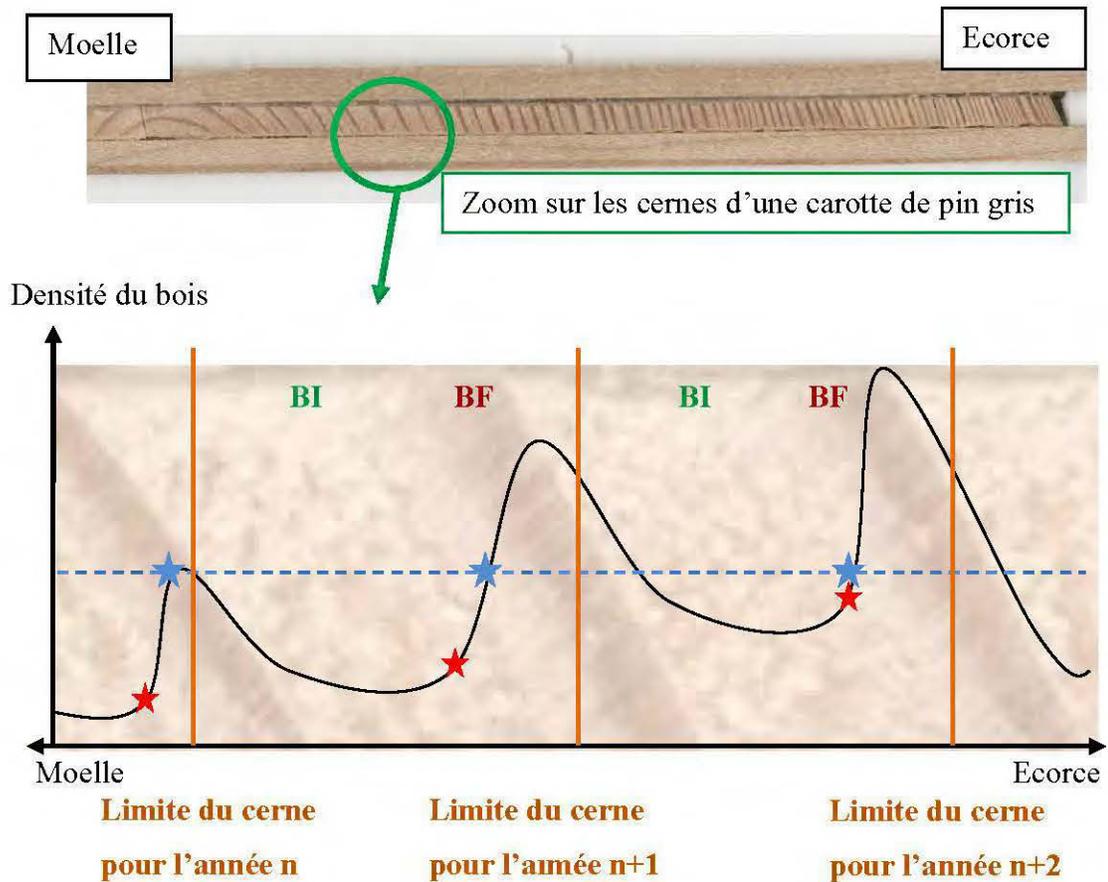


Figure 1.6 Représentation des écarts de position des points de transition BI/BF, d'après Koubaa *et al.* (2002) et Payette et Filion (2010). La méthode de Koubaa *et al.* (2002) (étoile rouge) est adaptée à chaque cerne comparativement à la méthode du point de transition à valeur fixe (étoile bleue). Sur le premier cerne à gauche par exemple, la méthode du point fixe assimile le maximum de densité du cerne au point de transition, alors que la méthode Koubaa *et al.* (2002) permet de trouver une position plus adaptée au cerne.

### 1.1.3.2 Avantages de la microdensitométrie

#### 1.1.3.2.1 Décomposition des variations radiales de la densité du bois

La densité des cernes est une résultante des conditions environnementales, du site, de l'âge cambial, de l'origine clonale, et des perturbations internes et externes au peuplement (Bowyer *et al.* 2005; Payette et Filion, 2010; Zobel et Buijtenen, 1989). Comme chaque cerne représente une année de vie de l'arbre, il est possible de la considérer comme variable en fonction du temps, c'est le principe de base de la dendrochronologie (voir section 1.1.3). L'application d'une décomposition de Fourier sur le signal brut de la variation radiale de la densité (soit en fonction du temps), permet de discerner les différentes fréquences de variations temporelles de la densité du bois: saison, année, décennie, siècle. Les études de dendrochronologie appliquée à la densitométrie permettent d'identifier les facteurs associés aux fréquences. Un exemple de la décomposition du profil de densité radial est proposé à la Figure 1.7. La variation macroscopique liée à l'âge du cambium par exemple présente la fréquence temporelle la plus basse (Figure 1.7a), car le pas de variations correspond à plusieurs décennies (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010) (Figure 1.7a). En parallèle, le fonctionnement cyclique du cambium lié aux saisons induit une variation annuelle de la densité entre le bois initial et le bois final (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010) (Figure 1.7b). Les variations des conditions météorologiques liées aux changements climatiques sont un facteur de basse fréquence, qui va influencer les variations macroscopiques de la densité du bois (Figure 1.7c) sur plusieurs années (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010). En somme, les variations microscopiques radiales de la densité du bois résultent de ces trois effets (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010) (Figure 1.7d).

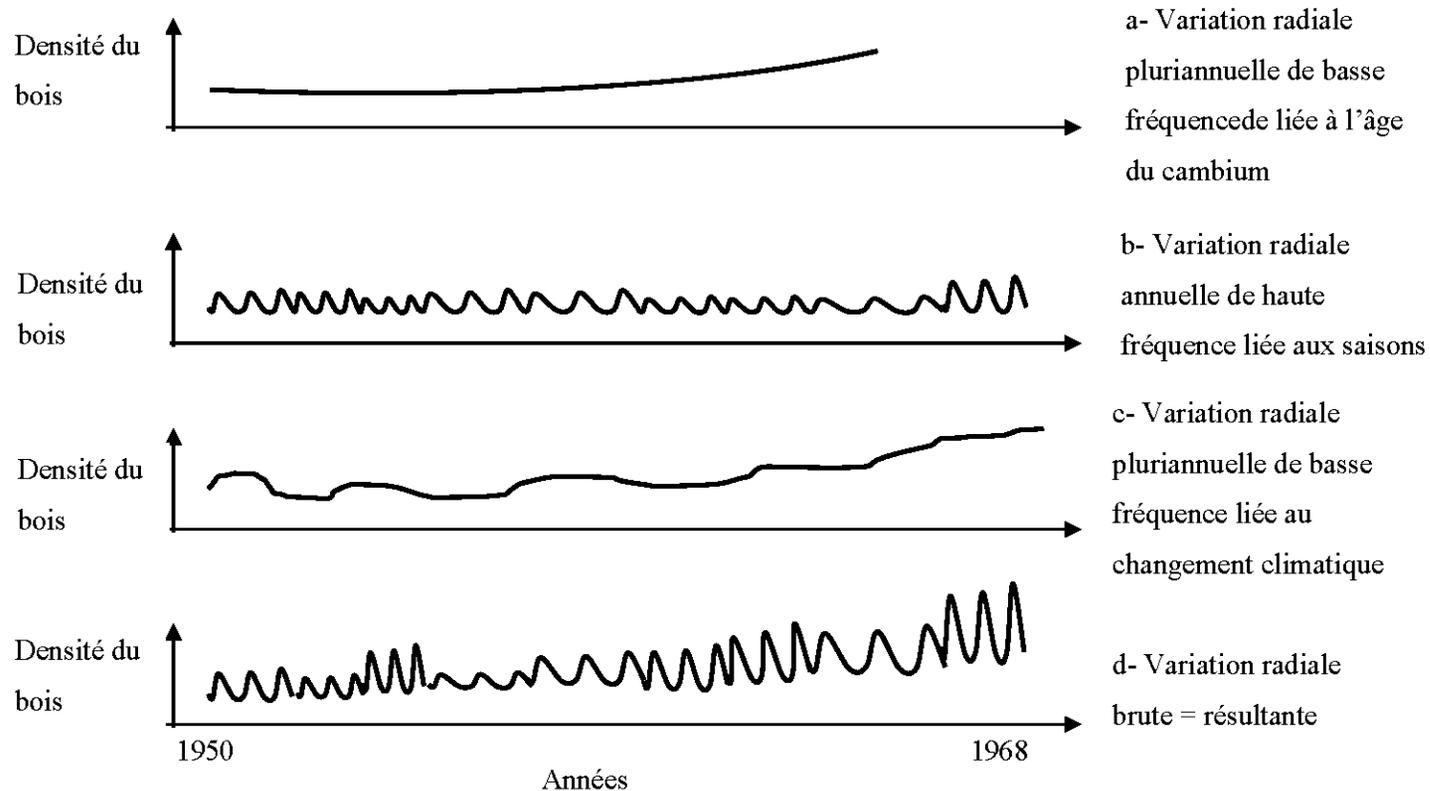


Figure 1.7 Décomposition des variations radiales de la densité d'un arbre par fréquence temporelle, tiré de Lebourgeois et Merian (2012); Payette et Fillion (2010). Le profil de densité radiale (brute figure d) est la résultante des signaux des figures a, b et c, respectivement associés à l'âge cambial, aux saisons et aux changements climatiques.

#### 1.1.3.2.2 Identification des variations de la densité du bois en lien avec les conditions de croissance

De manière générale, lorsqu'un événement induit une détérioration des conditions de croissance, la largeur du cerne diminue (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010). Les modifications de la densité en revanche sont reliées à la nature de l'évènement appliqué au cambium d'une part et à l'essence d'autre part. Les études de dendrochronologie ont permis d'identifier le climat, le site, les interventions sylvicoles, la défoliation par les insectes, l'origine clonale et l'âge cambial comme autant de facteurs qui peuvent affecter simultanément la croissance radiale et la densité du bois (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010; Zobel et Buijtenen, 1989). Ces facteurs ont été classés selon cinq pôles : variabilité individuelle, conditions environnementales, perturbations internes au peuplement, perturbations externes au peuplement et variabilité non expliquée (Lebourgeois et Merian, 2012; Payette et Filion, 2010; Zobel et Buijtenen, 1989). Les effets de ces pôles sur la largeur des cernes et leur densité sont illustrés à la Figure 1.8. Cette figure n'est pas exhaustive et ne sert qu'à illustrer le fonctionnement du cambium sous l'effet du génotype (Beaulieu et Bousquet, 2010; Bowyer *et al.* 2005; Zobel et Buijtenen, 1989), du climat, des épidémies d'insectes et des pratiques sylvicoles (Bowyer *et al.* 2005; Koga *et al.* 2007; Zobel et Buijtenen, 1989).

Le premier pôle représentant la variabilité individuelle comprend l'origine clonale souvent associée à l'origine géographique (Zobel et Buijtenen, 1989) et l'âge cambial (Lebourgeois et Merian, 2012; Zobel et Buijtenen, 1989). Par exemple, Kriebel *et al.* (1976) montrent que pour le chêne rouge, il existe une interaction entre la croissance en diamètre et la provenance des glands. Lorsque des semences nordiques sont implantées au sud de l'aire de répartition du chêne rouge, les semis ont une croissance en hauteur et en diamètre plus lente que s'ils étaient implantés dans leur zone de provenance. Il est important de noter que des interactions fortes existent entre l'origine clonale et l'emplacement géographique pour la croissance en diamètre

(Beaulieu et Bousquet, 2010; Zobel et Buijtenen, 1989). En effet, la croissance en diamètre peut se détériorer lorsque des provenances ne sont pas implantées dans leur région d'origine (Beaulieu *et al.* 1996; Housset *et al.* 2018; Kriebel, *et. al.*, 1976).

Le second pôle représente les conditions environnementales : climat, station, sol et emplacement géographique (Lebourgeois et Merian, 2012; Zobel et Buijtenen, 1989). Soit l'évènement: une période de sécheresse - exemple d'impact climatique. L'excès de chaleur et le manque d'eau (1 sur la Figure 1.8) induisent un déficit hydrique; la contrainte à laquelle doivent répondre les arbres est le risque de cavitation dans l'appareil vasculaire (Eilmann *et al.* 2011; Trouy, 2015) - trachéides pour les résineux et vaisseaux pour les feuillus. Le cambium du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) atténue ce risque par la production d'un moins grand nombre de trachéides optimisant la conduction des flux de sèves: les cellules formées en période de déficit hydrique estival de juin à juillet présentent un lumen plus grand et des parois plus fines que celles formées en condition optimale d'apport en eau (Eilmann *et al.* 2011; Martin-Benito *et al.* 2013), ce qui amoindrit la densité moyenne du cerne (Toïgo *et al.* 2015). Chez le peuplier hybride (*Populus nigra* L. × *P. maximowiczii* Henry, clone Kamabuchi) et les chênes (*Quercus*), les vaisseaux produits dans le bois initial en condition de sécheresse présentent un lumen plus étroit avec des parois cellulaires plus épaisses qu'à l'accoutumée (Arend et Fromm, 2007; Eilmann *et al.* 2011), ce qui induit une augmentation de la densité du bois (Toïgo *et al.* 2015). Pour l'influence du site, dans des expériences de fertilisation du sol pour le chêne et le pin maritime (*Pinus pinaster*), Polge (1975, 1969) montre que la fertilisation du sol induit une augmentation de la largeur des cernes pour les deux essences, mais une augmentation de la proportion du bois final et une densité des cernes plus élevée pour le chêne (Polge, 1975) et une augmentation de la proportion du bois initial et une densité des cernes plus faible pour le pin maritime (Polge, 1969).

Le troisième pôle, les perturbations internes au peuplement, se réfère à l'évolution du peuplement: densité de tiges/ha, compétition entre les tiges, interventions sylvicoles, ouvertures provoquées par la sénescence des arbres (Lebourgeois et Merian, 2012). Les interventions sylvicoles, telles que les éclaircies qui diminuent le nombre de tiges à l'hectare et qui sont assimilées à des perturbations internes au peuplement (Lebourgeois et Merian, 2012), permettent aux arbres résiduels de profiter de plus de ressources et de croître plus rapidement formant ainsi des cernes plus larges (3 sur la Figure 1.8). L'augmentation de l'accroissement radial associé aux éclaircies peut avoir des conséquences sur la densité des cernes, mais cet effet varie selon les espèces, diminution de la densité pour certains résineux, augmentation de la densité pour les chênes etc (voir section 1.1.2.2).

Le quatrième pôle est associé aux perturbations externes au peuplement telles que les incendies, tempêtes et autres épidémies de ravageurs (Lebourgeois et Merian, 2012). Dans le cas d'une défoliation causée par une épidémie d'insectes considérée comme une perturbation externe au peuplement (Lebourgeois et Merian, 2012), l'appareil photosynthétique est affecté et ne produit plus les composés nécessaires à la construction des parois cellulaires. Les cernes formés lors de ces événements sont pâles et de faible densité (2 sur la Figure 1.8).

Le cinquième et dernier pôle consitute la variabilité non expliquée par les quatre autres pôles (Lebourgeois et Merian, 2012).

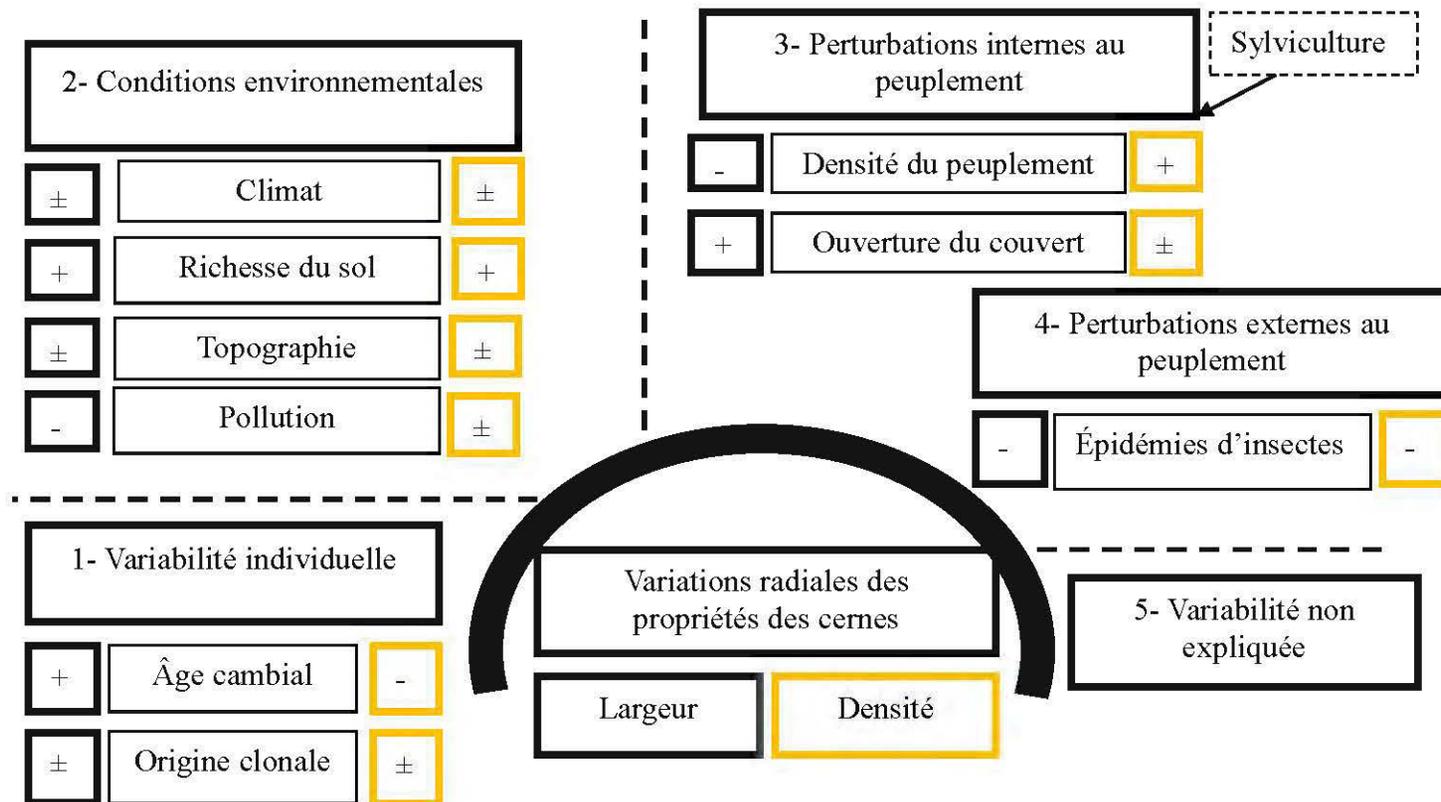


Figure 1.8 Effet de la variabilité individuelle, des conditions environnementales, des perturbations internes et externes au peuplement sur la largeur (cases grises) et la densité des cernes (cases jaunes). Les signes + et – indiquent une augmentation ou une diminution. Le signe ± indique une différence en fonction de l'essence considérée (Becker *et al.* 1988; Lebourgeois and Merian, 2012; Leonelli *et al.* 2008; Polge and Garros, 1971; Trouy, 2015).

#### 1.1.4 Le résistographe, un outil potentiel de microdensitométrie ?

Le résistographe<sup>4</sup>, même s'il est préférablement utilisé pour mesurer la densité moyenne des arbres (Gao *et al.* 2017), est un appareil conçu pour mener des études microdensitométriques (Rinn, 2012a). Il se présente sous la forme d'une perceuse (Figure 1.9) contenant une unité de stockage des données numériques et une imprimante (Rinntech, 2016, 2015).

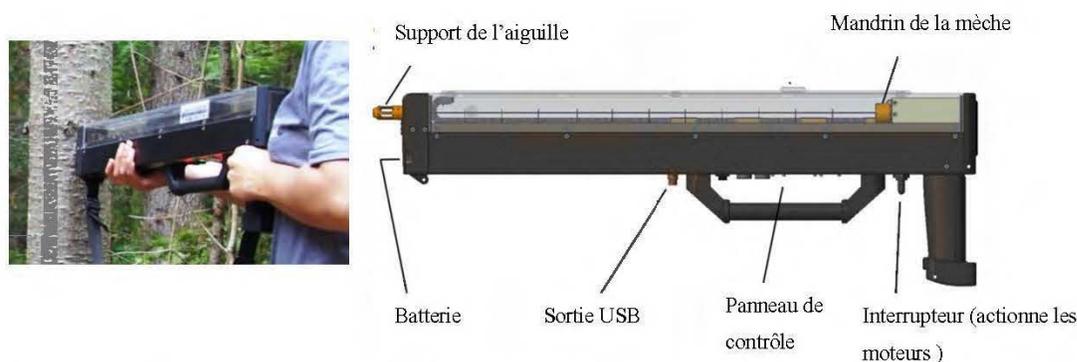


Figure 1.9 À gauche, utilisation du résistographe sur une tige de sapin baumier (crédit photo Johan Housset), illustration de droite : tiré du manuel d'utilisation du résistographe (Rinntech, 2015).

Deux moteurs actionnent une mèche en acier qui fore le bois (Figure 1.10). Le premier de ces moteurs (mandrin de la mèche) actionne la rotation de la mèche (maximum de 1000 tours/min), tandis que le second la fait avancer (Rinntech, 2015). La vitesse d'avance peut être modulée de 70 mm/min pour les bois durs à 1000 mm/min pour les bois tendres en fonction de l'essence à échantillonner (Rinn, 2012b; Rinn *et al.* 1996). La mèche de 1,5 mm de diamètre utilisée pour le perçage est amovible. Sa tête présente un empâtement de 3 mm qui permet d'attaquer le bois

<sup>4</sup> Il existe plusieurs constructeurs de résistographes, mais dans ce mémoire, le résistographe présenté est de la marque Rinntech ©

perpendiculairement à la direction de perçage par rotation (Rinn, 2012; Figure 1.10). Elle permet d'effectuer des sondages de 280 à 950 mm de profondeur (Rinn *et al.* 1996). Le résistographe peut effectuer de 310 à 350 perçages avant que les mesures ne soient affectées respectivement par le taux de charge de la batterie et l'usure de la mèche (Ukrainetz et O'Neill, 2010).

Lors d'une prise de mesure, le résistographe effectue un forage avec une vitesse d'avance constante (Rinntech, 2015). En parallèle, le capteur enregistre la consommation en énergie du mandrin animant l'aiguille à raison de 100 points par mm. L'énergie consommée par le mandrin le long du perçage correspond à la force nécessaire à l'aiguille pour forer le bois (ou couple en  $\text{m}^2.\text{kg}.\text{s}^{-2}$ ). La résistance du bois au forage rencontrée par l'aiguille est fonction de la densité locale du bois (Rinn, 2012a; Rinn *et al.* 2009a; Rinntech, 2015).

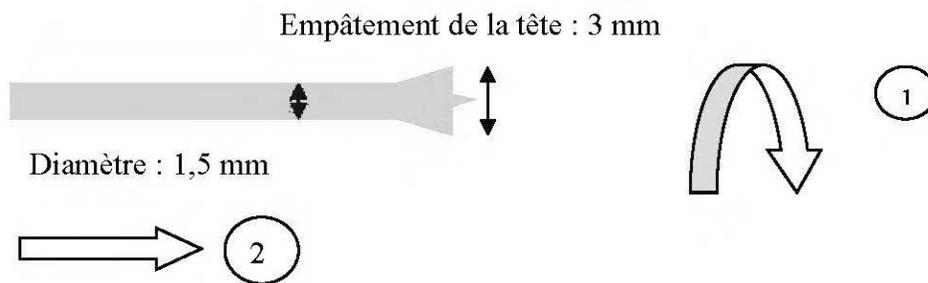


Figure 1.10 Apparence de la mèche de perçage du résistographe, tiré de Rinn (2012), elle est animée d'un mouvement de rotation (1) et de translation rectiligne (2)

Au fur et à mesure que l'aiguille progresse radialement dans l'arbre, l'imprimante trace le profil de résistance rencontrée (Rinntech, 2016, 2015). Le graphique ainsi tracé illustre les variations radiales de résistance du bois qui peuvent être converties en variations radiales de la densité du bois (Astrade et Miramont, 2010; Guller *et al.* 2012 b; Rinn *et al.* 1996; Figure 1.11).



Figure 1.11 Exemple de profil radial de résistance du bois tracé in situ par le résistographe, les extrema tracés sur le graphique correspondent aux limites des cernes (en rouge sur la figure) crédit photo : Johan Housset

Contrairement au procédé classique et chronophage de densitométrie (carottage par une sonde de Pressler, extraction des échantillons, scan au densitomètre à rayon X), le sondage au résistographe dure environ une minute et le profil de résistance est généré instantanément. Si le forage est réalisé radialement et perpendiculairement aux cernes, le profil généré fait apparaître les limites des cernes et donne potentiellement des valeurs de densité à une résolution du centième de mm (0,01 mm; Rinntech, 2015). Il n'y a donc plus qu'à travailler sur le profil pour obtenir dans un premier temps les limites des cernes et leurs largeurs puis les variations de la densité du bois, ce qui s'apparente à une étude de densitométrie (Astrade et Miramont, 2010; Rinn *et al.* 1996). Dans ce contexte de densitométrie, le résistographe est utilisé pour réaliser des tests de provenance génétique de cultivars de peuplier (Bouffier *et al.* 2008), pour estimer l'âge des arbres (Lukaszkiwicz *et al.* 2005), pour évaluer la présence de pourriture dans les arbres (Gao *et al.* 2017; Kaestner et Niemz, 2004; Palaia *et al.* 2008; Rinn, 2012), pour estimer l'état de dégradation du bois mort (Kahl *et al.* 2009), mais aussi en dendrogéomorphologie pour déceler les modifications anatomiques liées aux dépôts avalancheux (Astrade et Miramont, 2010) et en archéologie (Kraler *et al.* 2012).

À l'échelle macroscopique, les corrélations obtenues entre la résistance moyenne de l'arbre mesurée par le résistographe et la densité moyenne de l'arbre mesurée par le densitomètre à rayons X sont faibles (< 50%) à forte (>90%) (Gao *et al.* 2017). Il est à noter que la force de la corrélation entre les profils du densitomètre et du résistographe serait négativement corrélée avec la distance à l'écorce: 90% au niveau de l'écorce contre 70% vers la moelle. Les études effectuées rapportent aussi des limites à l'utilisation du résistographe en microdensitométrie, particulièrement lorsque celle-ci est appliquée en dendrochronologie (Gao *et al.* 2017; Rinn *et al.* 1996). En effet, la corrélation entre la densité du bois (mesurée au densitomètre à rayon X) et la résistance du bois (mesurée par le résistographe) est plus élevée au niveau macroscopique qu'au niveau microscopique (Gao *et al.* 2017; Rzem, 2018). De plus d'après les spécifications techniques du fabricant (Rinn, 2012a; Rinn *et al.* 1996), le résistographe ne peut pas détecter les cernes dont la largeur est inférieure à 0,5 mm; néanmoins d'autres études rapportent que cette limite serait plus grossière soit d'environ 2 mm (Gao *et al.* 2017; Guller *et al.* 2012; Szewczyk *et al.* 2018). Lors de l'utilisation du résistographe, l'opérateur doit s'assurer que la direction de perçage est effectivement radiale. Dans le cas contraire, la mesure des largeurs de cernes, des proportions des bois initial et final et des valeurs de la densité associées sont biaisées (Gao *et al.* 2017; Kraler *et al.* 2012; Rinn, 2012; Rzem, 2018; Figure 1.12). À cet égard, le choix du matériau constitutif de l'aiguille est aussi un paramètre à prendre en compte pour assurer l'absence de courbure lors du perçage (Rinn, 2012a).

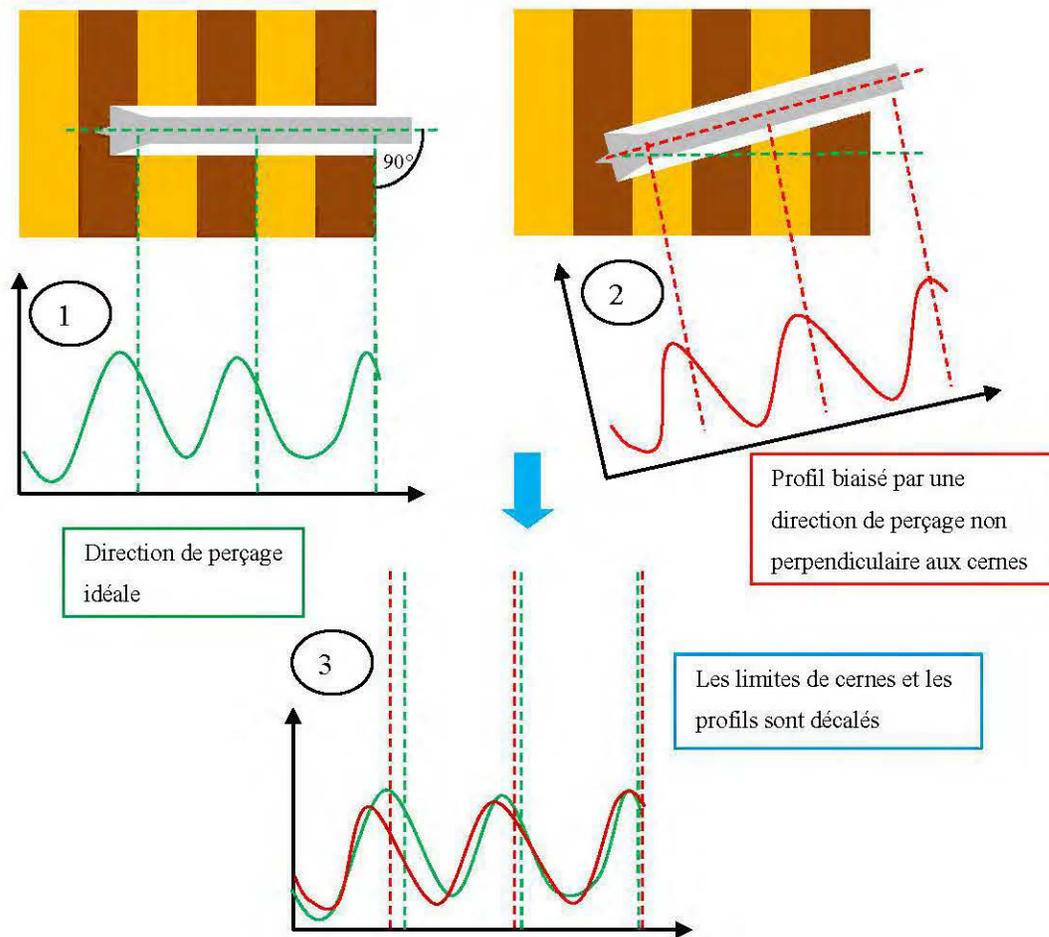


Figure 1.12 Décalage (3) causé par un mauvais angle de perçage. Un angle non perpendiculaire aux cernes (2, courbe rouge) induit un décalage de mesure dans les limites de cernes par rapport à une mesure perpendiculaire au cerne (1, courbe verte) tiré de Kraler *et al.* (2012) et Rinn (2012).

La justesse de corrélation entre la mesure prise par le résistographe et la densité du bois mesurée par densitométrie à rayon X (Rinn *et al.* 1996) est aussi fonction de l'anatomie du bois liée au type de vascularisation de l'essence ((Rinn, 2012a; Rinn *et al.* 1996). La différence de densité entre le bois initial et le bois final (si le cerne est assez large) notamment est un élément clé qui permet de déterminer les limites de cernes sur les profils tracés par le résistographe (Rinn, 2012; Rinn *et al.* 2009). Cette

différence est plus importante pour les résineux et les feuillus à zone initiale poreuse que pour les feuillus à pores diffus car la différence de densité entre le bois initial et le bois final est plus marquée (voir 1.1.2.3, Figure 1.13). Elle est plus visible par densitométrie à rayon X (voir 1.1.2.3, Figure 1.13) que par mesure au résistographe (Rinn *et al.* 1996). Pour les feuillus à pores diffus en particulier (les peupliers notamment), les limites des cernes sont difficiles à distinguer car les variations de résistance du bois intracernes sont de même amplitude que les variations intercernes (Rinn *et al.* 1996; Figure 1.13).

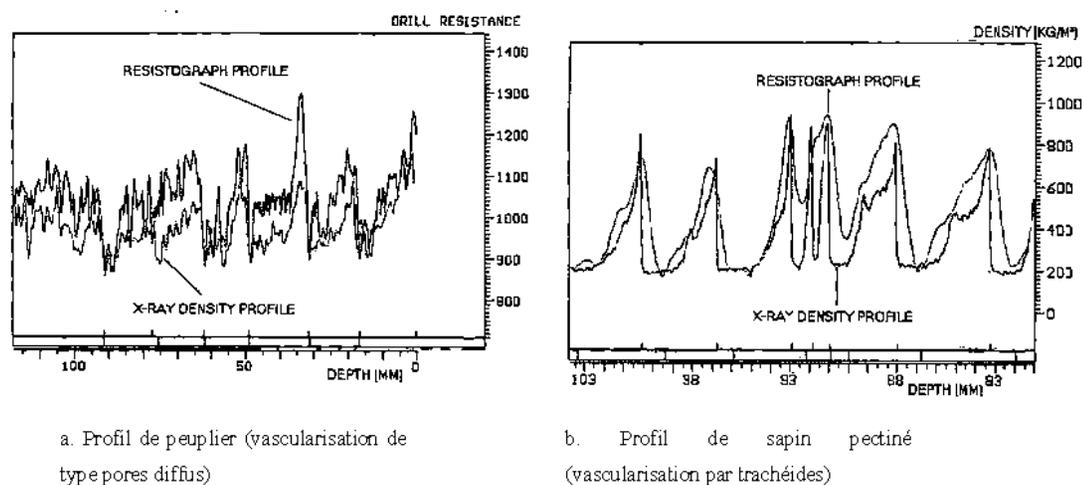


Figure 1.13 Comparaison des différences de densité intra et intercernes d'un peuplier (*Populus* sp.) (a) et d'un sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) (b) d'après Rinn (1996). De même que pour la densitométrie à rayon X, les variations de densité entre le bois initial et le bois final sont plus visibles pour les résineux (sapin pectiné à droite) que pour les feuillus à pores-diffus (peuplier à gauche). Pour les feuillus à pores diffus, les variations intra et intercernes de densité se confondent.

## 1.2 Cadre du projet

### 1.2.1 But

Le résistographe est un outil potentiellement utilisable en dendrochronologie. Mais beaucoup des études portant sur la calibration du résistographe en microdensitométrie sont effectuées pour des essences européennes (Acuña *et al.* 2011; Astrade et Miramont, 2010; Gao *et al.* 2017; Rinn, 2012), à l'exception de l'épinette noire par Rzem (2018) et du bouleau jaune (*Betulla alleghaniensis*, Britton) par Sharapov *et al.* (2018). En continuité avec les travaux de Rzem (2018) et dans une optique de caractérisation non destructive du matériau bois, le but du projet est d'évaluer le potentiel d'utilisation du résistographe en microdensitométrie (variations intercernes et intracerne sur une large gamme de densité du bois (masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m<sup>3</sup>), pour six essences commerciales de la forêt boréale: bouleau à papier, frêne noir, peuplier faux-tremble, pin gris, sapin baumier et thuya occidental.

### 1.2.2 Objectifs et hypothèses

L'objectif général de ce projet est d'évaluer le potentiel du résistographe, pour la mesure des variations radiales de la masse volumique et de la croissance du bois pour différentes essences de la forêt boréale. Il propose d'utiliser une étude comparative multi-échelles des attributs de la qualité du bois en se basant sur les données de densitométrie à rayon X comme référence. Les échelles d'observation retenues sont : l'ensemble des essences, l'essence, l'arbre (variation intercernes) et le cerne (variation intracerne).

Pour répondre à l'objectif général, le projet est divisé en deux sous-objectifs : calibration du résistographe et validation du potentiel de mesure du résistographe en microdensitométrie.

### 1.2.2.1 Sous-objectif 1 : calibration du résistographe

La première étape du projet est la calibration du résistographe par régression linéaire entre les données de résistance du bois mesurées par cet instrument et les valeurs de la masse volumique du bois mesurées par le densitomètre à rayons X, Gao, *et al.* (2012) et Rinn *et al.* (1996) rapportent qu'à l'échelle macroscopique, le coefficient de corrélation ( $r^2$ ) entre la masse volumique mesurée par le densitomètre et la résistance du bois mesurée par le résistographe varie entre 0,60 et 0,90. De fait, pour cet objectif, l'hypothèse formulée est que : la pente de la régression linéaire entre la résistance de perçage mesurée par le résistographe et la masse volumique du bois mesurée par le densitomètre à rayon X est positive avec un coefficient de régression linéaire  $R^2$  supérieur à 0,6.

### 1.2.2.2 Sous-objectif 2 : évaluation quantitative et qualitative du potentiel de mesure du résistographe en microdensitométrie

Le second objectif du projet est l'évaluation qualitative et quantitative du potentiel du résistographe pour mesurer huit attributs de la qualité du bois soit: les largeurs du cerne, du bois initial et du bois final et les masses volumiques du cerne 1, du bois initial 2, du bois final 3, minimale et maximale 4, pour chaque essence, d'une part et pour toutes les essences confondues, d'autre part. Ces huit attributs ont été sélectionnés d'après Gao *et al.* (2012), Rinn *et al.* (1996) et Polge (1966). Pour cet objectif, deux hypothèses sont formulées.

Hypothèse 2.1 : qualitativement, à l'échelle des cernes, les patrons de variation des attributs mesurés par les deux instruments dépendent de la structure anatomique des essences :

- Pour les feuillus à pores diffus, et les résineux à transition bois initial/bois final abrupte, les patrons des variations intracernes générés par les deux appareils sont similaires.
- Pour les feuillus à zone initiale poreuse ou semi-poreuse et les résineux à transition bois initial/bois final graduelle, les patrons des variations intracernes générés par les deux appareils ne concordent pas.

Hypothèse 2.2 : quantitativement, pour chacun des attributs de la qualité du bois, les relations entre les données du résistographe et du densitomètre à rayon X sont :

- Moyennes à l'échelle de l'essence car l'étendue de variation des attributs à l'intérieur des arbres d'une même essence est faible.
- Fortes pour toutes les essences confondues car l'étendue de variation des attributs à l'intérieur des arbres de plusieurs essences est importante compte-tenu des différences anatomiques du bois entre les essences.

## CHAPITRE II

### MÉTHODOLOGIE

#### 2.1 Aire d'étude

Pour couvrir l'étalonnage du résistographe sur une large gamme de densité du bois, six essences commerciales de la forêt boréale ont été choisies: bouleau à papier, frêne noir, peuplier faux-tremble, pin gris, sapin baumier et thuya occidental (Blouin *et al.* 2002; MFFP, 2014) dans des peuplements mixtes de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet (FERLD), territoire localisé dans la région écologique 5a, Plaine de l'Abitibi du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'Ouest (Blouin et Berger, 2002; Harvey et Leduc, 2009). Cette région écologique de 27 000 km<sup>2</sup> située entre les 47°30' et 49°30' de latitude nord et les 76°30' et 79°30' de longitude ouest appartient au bassin versant de la Baie James qui est alimenté par de nombreux cours d'eau, dont les lacs Duparquet et Hébécourt, près desquels est localisée la FERLD (Figure 2.1). La majorité de la région écologique 5a est recouverte de plaines à l'exception de l'unité de paysage régionale de Rouyn-Noranda qui présentent un relief de coteaux (Blouin et Berger, 2002). Les dépôts de surface dominants d'argile fine d'origine glacio-lacustre se sont formés lors de la succession du lac pro-glaciaire Ojibway au recul de l'inlandsis Laurentidien (Blouin et Berger, 2002). Ainsi, les buttes de roches des coteaux sont serties de tills dont

l'épaisseur augmente du sommet des buttes aux bas de versants (Blouin et Berger, 2002). Dans les fonds de vallons où les cuvettes sont mal drainées peuvent se développer des dépôts organiques, alors que les terrains plats sont recouverts de dépôts glaciolacustres de texture fine (argile) à grossière (sable) (Blouin *et al.* 2002).

Le couvert forestier est dominé par les résineux: épinette noire, pin gris et sapins baumiers qui à l'occasion sont accompagnés de peupliers faux-trembles et de bouleaux à papier (Blouin et Berger, 2002). Les sites pauvres plus ou moins sablonneux à texture grossière sur les pentes sont recouverts de pins gris et d'épinettes noires tandis que les argiles plus riches à texture fine (Blouin et Berger, 2002) abritent des feuillus -bouleaux à papier et peupliers faux-tremble- en mélange avec les résineux -sapins baumiers, épinettes blanches (*Picea glauca* [Moench] Vosse), pins gris en contrebas. Sur les zones entourées ne sont présentes que l'épinette noire et le mélèze laricin (*Larix laricina* [Du Roi] Koch), alors que les quelques lacs sont bordés de sapin baumier, thuya et feuillus dont le frêne noir (Blouin et Berger, 2002). La végétation aux environs de Rouyn-Noranda s'accommode de températures moyennes journalières variant entre -25°C au minimum en hiver et 24°C au maximum en été (Environnement et Changement climatique Canada, 2013)<sup>5</sup> pour une moyenne annuelle de 1,02°C (Environnement et Changement climatique Canada, 2013) et une saison de croissance de 160 jours (Blouin et Berger, 2002). Les précipitations annuelles moyennes sont de 688,5 mm par an, dont 286 mm, sous forme de neige (Environnement et Changement climatique Canada 2013). La FERLD est scindée en une aire d'aménagement, où sont situés les peuplements échantillonnés et une aire de conservation (Figure 2.2). Elle présente une topographie de coteaux où l'altitude varie de 200 à 400 m. Le territoire est bordé des lacs Hébécourt au Nord, Duparquet à l'Est et par la rivière Magusi au Sud (Harvey et

---

<sup>5</sup> Moyennes pour la période 1981-2010

Leduc, 2009), voir Figure 2.1. Huit feux notables ont affecté la forêt en 1760, 1797, 1823, 1870, 1907, 1919, 1923 et 1944 (Harvey et Leduc, 2009). Les feux de 1760 et 1923 sont ceux qui ont affecté les superficies les plus importantes respectivement 3608 et 1630 ha (Harvey et Leduc, 2009).

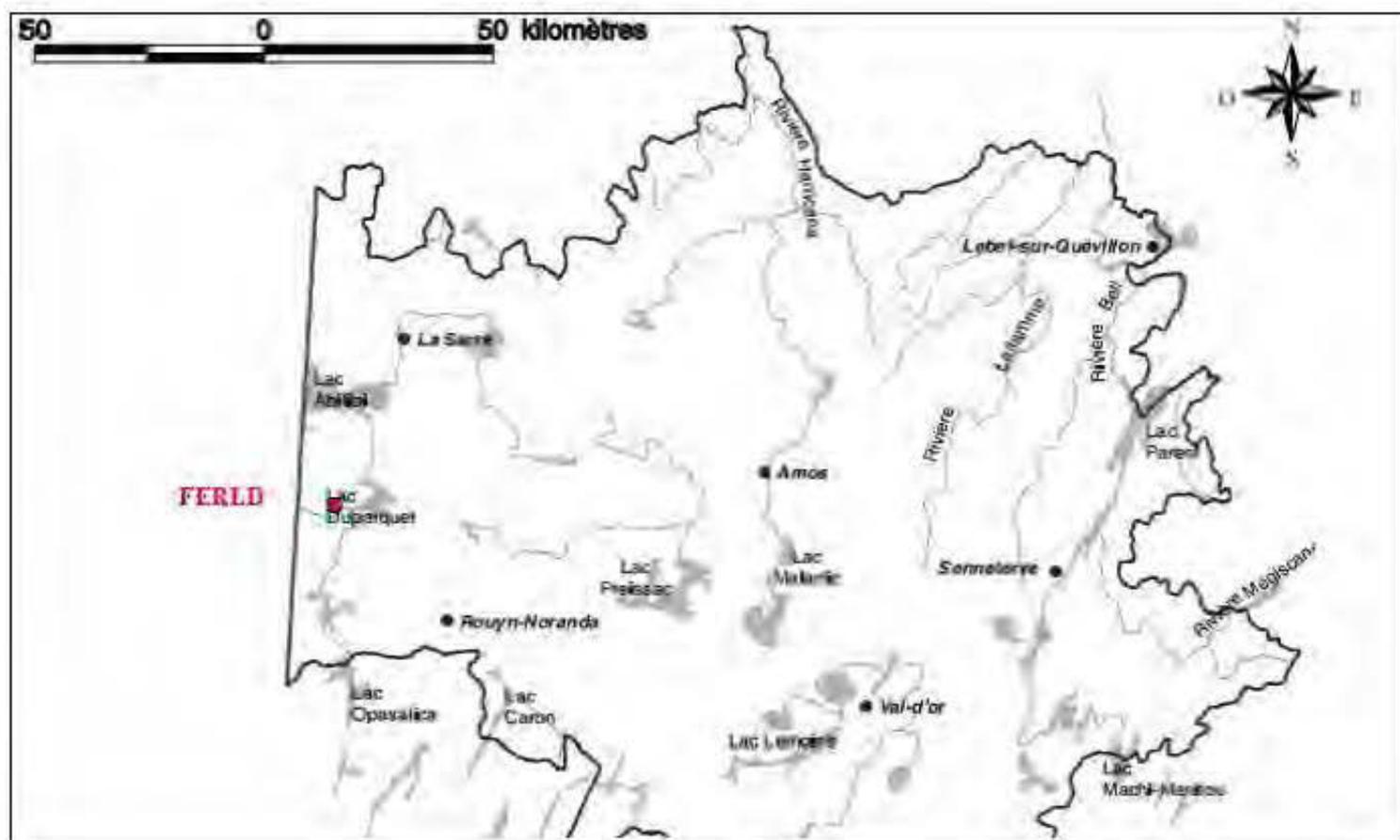


Figure 2.1 Localisation de la FERLD (point rouge) près du lac Duparquet dans la région écologique 5a Plaine de l'Abitibi, extrait de (Blouin et Berger, 2002). Rouyn-Noranda, Amos, Val d'Or et La Sarre sont les villes principales de la région.

## 2.1.1 Plan d'échantillonnage

### 2.1.1.1 Emplacement et caractérisation des sites d'échantillonnage

Les peuplements échantillonnés ont été sélectionnés d'après leur accessibilité depuis la route d'une part et de l'abondance en essences cibles d'autre part. En tout, cinq sites répartis sur le territoire de la FERLD ont été sélectionnés (Figure 2.2).

Les tiges de bouleaux ont été échantillonnées dans un peuplement mixte de sapins baumiers et de bouleaux blancs régénéré naturellement après un feu en 1923 (Harvey et Leduc, 2009) (Tableau 2.1) situé au sud du lac Hébecourt (Figure 2.2). Le sapin baumier et le pin gris ont été échantillonnés non loin de ces sites dans des peuplements résineux mixtes en portion basse de pentes de buttes rocheuses, non loin du site utilisé pour le bouleau blanc (Figure 2.2), dans un peuplement résineux de pin gris en mélange avec le sapin baumier (Tableau 2.1.). Le peuplement s'est régénéré naturellement après un feu datant de 1923 (Harvey et Leduc, 2009). Les arbres échantillonnés pour le peuplier faux-tremble sont situés au sud de la FERLD dans un peuplement pur de la même espèce issu d'une coupe à blanc datant des années 1980. Le peuplement de frênes utilisé pour l'échantillonnage bordait la rivière Magusi au sud de la FERLD (Figure 2.2), dans une frênaie noire à sapins régénérée naturellement après le feu de 1923 (Harvey et Leduc, 2009) (Tableau 2.1). Enfin pour le thuya, un peuplement de soixante ans régénéré naturellement après une coupe progressive a été choisi au nord le FERLD (Figure 2.2), dans une sapinière à thuya (Tableau 2.1). La plupart des sites présentaient des dépôts de surface similaires: argilo-limoneux pour le peuplement de frêne noir, limono-argileux pour le bouleau à papier et le peuplier faux-tremble et sablo-limoneux pour le pin gris et le sapin baumier, le peuplement de thuya en revanche est implanté sur des dépôts organiques (Tableau 2.1). Le régime hydrique des peuplements était de type xérique à mésique pour la plupart des sites à l'exception de la frênaie à sapin et de la sapinière à thuya dont le régime est hydrique (Tableau 2.1).

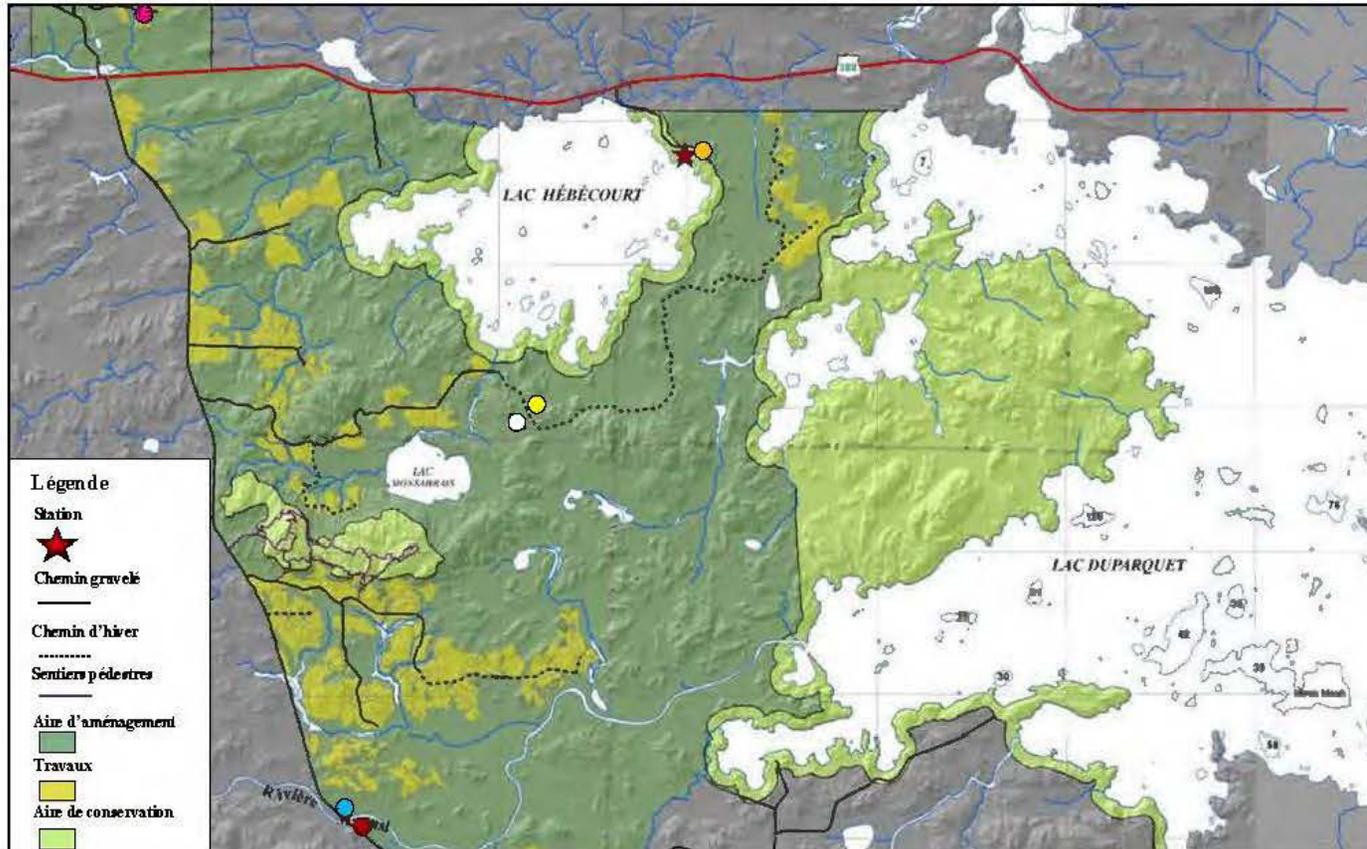


Figure 2.2 Emplacement des sites d'échantillonnage à la FERLD. Les points rose, blanc, jaune, bleu, rouge et orange représentent les peuplements échantillonnés respectivement pour le thuya, le bouleau à papier, le sapin baumier et le pin gris, le frêne noir, le peuplier faux tremble et quelques autres sapin baumier. Carte extraite du site web de la FERLD, (2016)

Tableau 2.1 Description de l'origine, du type, du dépôt de surface et du régime hydrique des peuplements échantillonnés, d'après Harvey et Leduc (2009).

<b>Essence</b>	<b>Point sur la carte</b>	<b>Type de peuplement</b>	<b>Origine du peuplement</b>	<b>Dépôt de surface</b>	<b>Régime hydrique</b>
<b>Bouleau à papier</b>	blanc	Mixte sapin baumier/bouleau blanche	Feu 1923, - régénération naturelle	Limono-argileux	Mésique
<b>Frêne noir</b>	bleu	Frênaie noire à sapin	Feu 1923 - régénération naturelle	Argilo-limoneux	Hydrique
<b>Peuplier faux-tremble</b>	vert	Peuplement pur de peuplier faux-tremble	Coupe totale années 1980 - régénération naturelle	Limono-argileux	Mésique
<b>Pin gris</b>	jaune	Résineux mixte pin gris/sapin baumier	Feu 1923 + Coupes progressives 2010- régénération naturelle	Sablo-limoneux	Mésique à Xérique
<b>Sapin baumier</b>	jaune	Résineux mixte pin gris/sapin baumier	Feu 1923 + Coupes progressives années 1980- régénération naturelle	Sablo-limoneux	Mésique à Xérique
<b>Thuja</b>	rose	Sapinière à Thuja	Feu 1760 + Coupes progressives années 1980- régénération naturelle	Dépôt organique	Hydrique

### 2.1.2 Description des essences sélectionnées

La recherche d'un gradient de masse volumique dans les essences a mené à la sélection de trois essences résineuses (pin gris, sapin baumier, thuya occidental) et trois essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau à papier, frêne noir) pour une gamme de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m<sup>3</sup> (Tableau 2.2). Le pin gris, le sapin baumier et le thuya occidental présentent un bois homoxylé constitué principalement de trachéides (Tableau 2.2). Le frêne noir, le peuplier faux-tremble et le bouleau à papier ont un bois hétéroxylé. La vascularisation est de type zone initiale poreuse pour le frêne noir et zone semi poreuse ou à pores diffus pour le bouleau à papier et le peuplier faux-tremble.

Le sapin baumier, le thuya et le frêne noir sont des essences de fin de succession à croissance moyenne à lente alors que le pin gris, le peuplier faux-tremble et le bouleau à papier sont des essences pionnières (Tableau 2.2). La dynamique naturelle de croissance est rapide pour le peuplier faux-tremble et le bouleau à papier, lente pour le thuya et intermédiaire pour le pin gris.

L'essence présentant la masse volumique moyenne la plus faible est le thuya : environ 240-420 kg/m<sup>3</sup> à 12% d'humidité d'air. À l'inverse, l'essence présentant la masse volumique moyenne la plus élevée est le frêne noir : 450-650 kg/m<sup>3</sup> à 12% d'humidité d'air (Tableau 2.2).

Tableau 2.2<sup>6</sup> Descriptions des essences d'après Jessome (1977), Alemdag (1985), Gonzales (1990), Bowyer (2005), Zhang et Koumba (2009), Wheeler

<b>Essence</b>	<b>Dynamique écologique naturelle</b>	<b>Vascularisation</b>	<b>Masse volumique moyenne du bois sec (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masse volumique moyenne du bois vert (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Thuya</b>	Croissance lente -essence pionnière	Trachéïdes	240-420	290 - 350
<b>Sapin baumier</b>	Croissance variable – fin de succession	Trachéïdes	270-400	330-350
<b>Peuplier faux-tremble</b>	Croissance rapide – essence pionnière	Zone initiale semis poreuse - Pores diffus	290-500	350-390
<b>Pin gris</b>	Croissance moyenne – essence pionnière	Trachéïdes	300-530	313-440
<b>Bouleau blanc</b>	Croissance rapide à moyenne – essence pionnière	Pores diffus	460-640	480-540
<b>Frêne noir</b>	Croissance moyenne à lente- essence de fin de succession	Zone initiale poreuse	450-650	450-550

r (2011), MFFP (2014).

<sup>6</sup> Les valeurs de masse volumique moyenne figurant dans le tableau sont des ordres de grandeur compilés d'après plusieurs ouvrages : Jessome (1977), Alemdag (1985), Gonzales (1990) Zhang et Koumba, (2009)et Bowyer (2005)

## 2.2 Protocole expérimental

### 2.2.1 Prélèvement des carottes et sondage au résistographe

Pour chaque arbre, deux mesures ont été effectuées par le résistographe et deux carottes ont été prélevées pour le densitomètre à raison de trente arbres pour chacune des six essences soit un total de 360 carottes et 360 sondages au résistographe. Une attention particulière a été portée à la direction de perçage du résistographe, afin qu'elle soit parallèle à la direction de prélèvement de la carotte de bois. A cet égard une sonde de Pressler usagée<sup>7</sup> a été arrimée au dessus du résistographe et servait de guide lors du forage, (Figure 2.3).

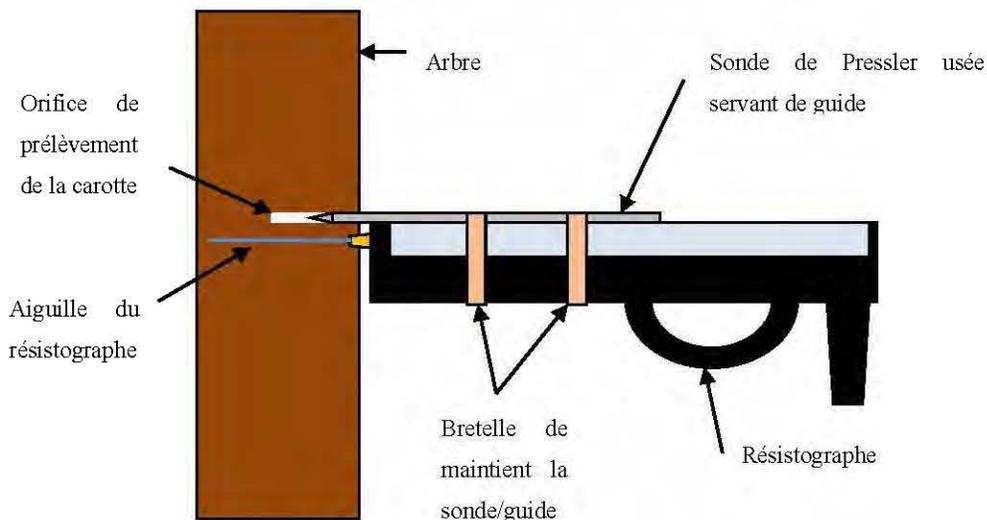


Figure 2.3 Dispositif d'optimisation de la trajectoire suivie par l'aiguille du résistographe utilisé sur le terrain. La sonde arrimée au résistographe sert de guide pour optimiser le parallélisme entre l'aiguille du résistographe et l'orifice de perçage de la carotte de bois

<sup>7</sup>NB : le filetage de la sonde a été limé pour faciliter son entrée dans l'orifice de la carotte

Pour chaque arbre, les deux carottes de bois ont été prélevées à la sonde de Pressler à hauteur de poitrine. Par la suite, le résistographe était positionné contre l'arbre à l'aide du guide. Le guide fixé sur le résistographe est enfoncé dans l'orifice de prélèvement de la carotte, ce qui permet de positionner le résistographe parallèlement à la direction de prélèvement de la carotte (Figure 2.3). De fait, le forage du résistographe a été effectué en dessous de l'emplacement de l'orifice de prélèvement de chaque carotte (Figure 2.3). Sur le terrain, les carottes de bois ont été stockées dans des pailles en plastique pour le transport, puis conditionnées en laboratoire.

### 2.2.2 Conditionnement des carottes de bois

Les 360 carottes ont subi un conditionnement en six étapes (Figure 2.4). Tout d'abord, de retour du terrain, elles ont été pesées puis séchées à l'air libre pendant une semaine dans une rigole en bois (étape 1, Figure 2.4). Suite au séchage (étape 2), les carottes ont de nouveau été pesées pour obtenir leur masse sèche (étape 3, Figure 2.4). En parallèle, le volume de chaque carotte sèche a été mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée remplie d'eau. La mesure du volume d'eau déplacé par insertion de la carotte dans l'éprouvette revient à mesurer le volume de la carotte. De fait la masse volumique de chaque échantillon a été calculée d'après le rapport masse sèche/volume sec, aux conditions ambiantes du laboratoire: humidité de l'air de 12% et température de 21°C. L'étape 4 a permis d'éliminer les extractibles du bois, pour une meilleure lisibilité des valeurs de densité (Grabner *et al.* 2005) par le densitomètre. Dans un montage soxhlet, les carottes ont subi une première extraction durant 24 h dans un solvant organique composé d'éthanol et de cyclohexane (1 :2) (Savva *et al.* 2010). Un rinçage a ensuite été appliqué pendant 24h à l'eau distillée toujours sur le montage soxhlet. Ces extractions successives ont débarrassé le bois des composés extractibles -terpènes, phénols, matières grasses, sucres (Kebbi-Benkeder *et al.* 2016)- qui pouvaient nuire à la propagation des rayons X dans la matière et fausser la mesure de densité (Grabner *et al.* 2005). Suite à cette étape, les carottes ont

été séchées une seconde fois à l'air libre pendant une semaine avant d'être collées sur leur support et débitées en lamelle de  $1,5 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$  d'épaisseur -étape 5 (Figure 2.4)- (Quintek Measurement Systems, Inc., 1999). Pour chaque carotte débitée, la lamelle comportant le moins de défauts (carotte complète, cœur présent) a été scannée dans un densitomètre à rayon X (modèle QMS-QTRS-01X) afin d'obtenir les variations de densité sur un profil radial (étape 6, Figure 2.3).

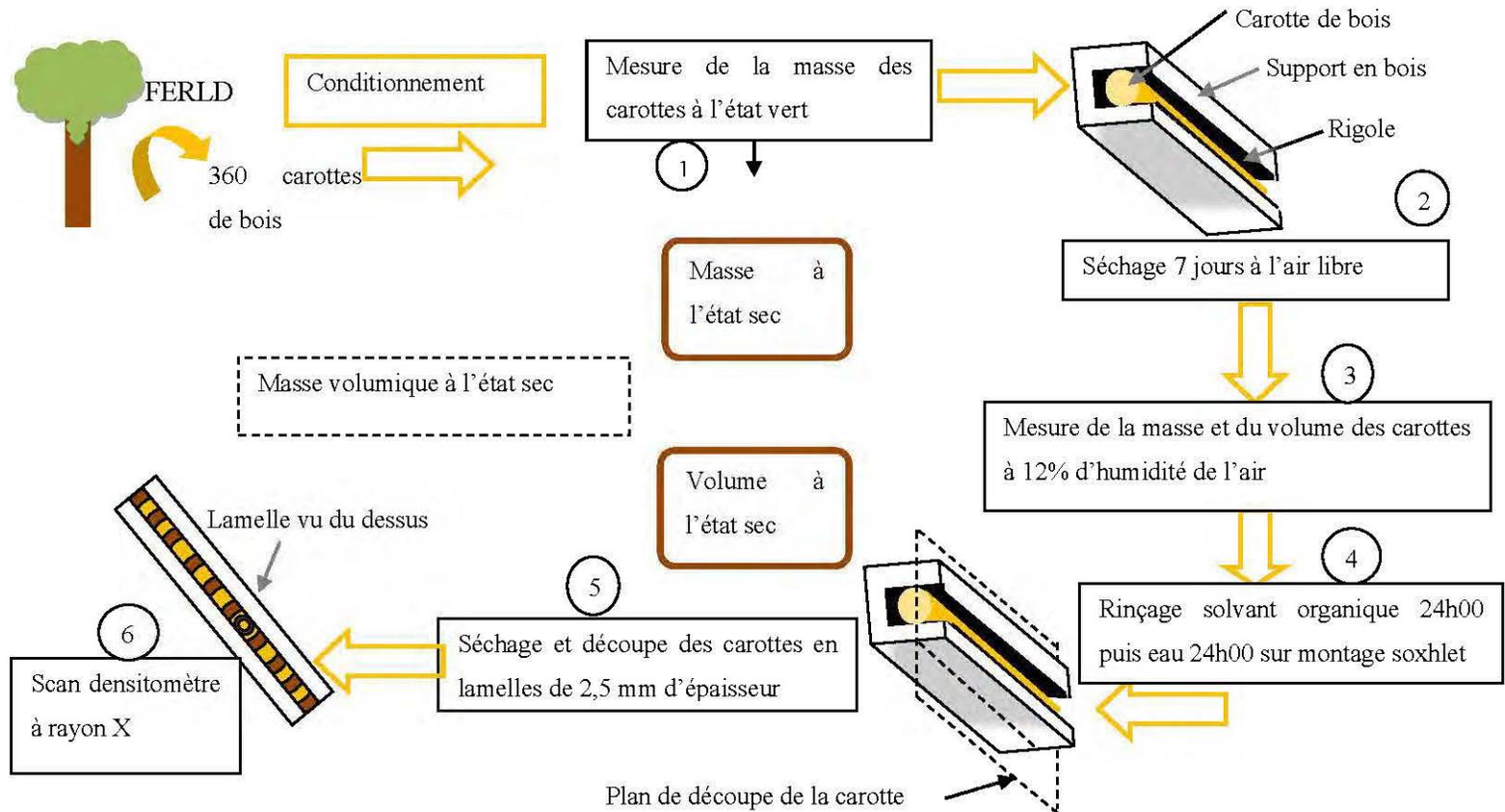


Figure 2.4 Schématisation de conditionnement des carottes : 1 mesure de la masse à l'état vert, 2 séchage, 3 mesure de la masse et du volume à l'état sec, 4 rinçage au montage soxhlet, 5 séchage final et découpe des lamelles, 6 scan au densitomètre. Les étapes 1 et 3 permettent de calculer l'humidité du bois à l'état vert et la masse volumique à l'état sec.

## 2.3 Traitement des données

### 2.3.1 Exemples de profils

Les profils générés par le résistographe et le densitomètre, même s'ils sont issus du même arbre, présentent des allures différentes. En effet, le résistographe -courbe rouge sur les deux graphiques de la Figure 2.5- présente un aspect plus lisse que le densitomètre.

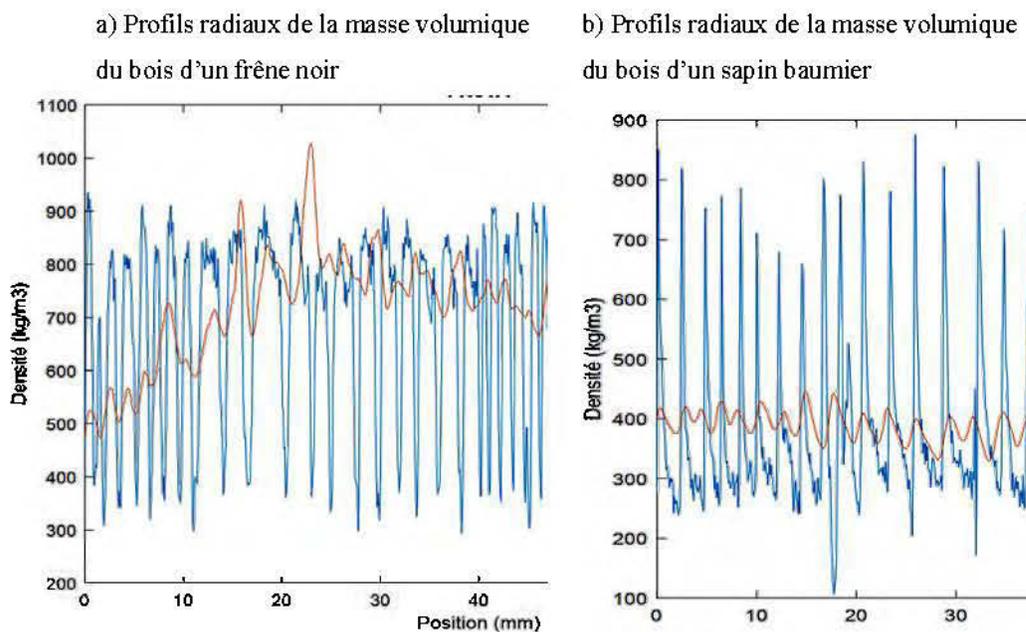


Figure 2.5 Exemple de profils radiaux de la masse volumique du bois générés par le résistographe (courbe rouge déjà calibrée) et le densitomètre (courbe bleu) pour : a) un frêne noir et b) un sapin baumier

### 2.3.2 Analyses à l'échelle macroscopique: calibration de la résistance (mesurée par le résistographe) par la masse volumique du bois (mesurée par le densitomètre à rayon $x$ )

La première étape de la calibration est le calcul de la masse volumique moyenne du bois mesurée par le densitomètre (en kg/m<sup>3</sup>) et la résistance moyenne mesurée par le résistographe (en kg/m<sup>3</sup>) pour chaque arbre. Soit un arbre  $x$ ,  $D(x)$  est la masse volumique moyenne de l'arbre  $x$  mesurée par le densitomètre (courbe bleu Figure 2.5) et  $R(x)$  est la résistance moyenne de l'arbre  $x$  mesurée par le résistographe (courbe rouge Figure 2.5). D'après l'hypothèse 1.1, les valeurs  $D(x)$  et  $R(x)$  sont reliées par la fonction affine 1 de pente  $c$  et d'ordonnée à l'origine  $d$ , voir Équation 2.1.

$$D(x) = R(x) \times c + d \quad (2.1)$$

Équation 2.1: Fonction affine 1 de pente  $c$  et d'ordonnée à l'origine  $d$  exprimant la masse volumique moyenne  $D(x)$  (en kg/m<sup>3</sup>) mesurée par le densitomètre en fonction de la résistance  $R(x)$  de l'arbre  $x$  mesurée par le résistographe (en kg/m<sup>3</sup>).

Les coefficients  $c$  et  $d$  de la fonction affine 1 sont déterminés par une simple régression linéaire de l'ensemble des valeurs moyennes de la masse volumique du bois mesurées par le densitomètre à rayon  $X$  sur l'ensemble des valeurs moyennes de la résistance du bois mesurées par le résistographe selon la méthode des moindres carrés.

La fonction affine 1 est utilisée comme fonction de calibration du résistographe. Elle est utilisée pour estimer la masse volumique du bois à partir des valeurs de la résistance du bois mesurées par le résistographe. Cette étape de calibration consiste à convertir les valeurs de résistance du bois mesurées par le résistographe (délivrées en kg/m<sup>3</sup>) en masse volumique en kg/m<sup>3</sup>. La calibration est donc adimensionnelle.

### 2.3.3 Analyses à l'échelle microscopique – validation du résistographe en microdensitométrie

Pour les analyses microscopiques, tous les profils de variation radiale de la masse volumique des arbres tracés par le résistographe sont dans un premier temps calibrés d'après la fonction affine 1. Dans une seconde étape, tous les cernes sont délimités sur les profils de variation de la masse volumique générés par le densitomètre et le résistographe. En complément, l'utilisation de la méthode de calcul du point de transition de Koubaa *et al.* (2002) est utilisée pour modéliser la transition du bois initial au bois final et par conséquent pour déterminer les variations intracernes (largeur et masse volumique du bois initial et du bois final). Le potentiel de mesure du résistographe à l'échelle microscopique a été évalué par essence et pour toutes les essences confondues.

#### 2.3.3.1 Dénombrement des cernes et calcul des largeurs du bois final et du bois initial

Le dénombrement des cernes a été effectué sur le logiciel Decom ® (Rinntech, 2015) pour le résistographe et QTRS ® (Quintek Measurement Systems, Inc., 1999) pour le densitomètre. Pour chaque arbre, la vérification du dénombrement des cernes entre les deux appareils a été effectuée par superposition des profils tracés par le résistographe et le densitomètre, comme les graphiques affichés en Figure 2.5. Dans certains cas, ce comptage s'est avéré difficile pour les cernes proche de la moelle pour les deux appareils. De fait, un comptage manuel à la loupe binoculaire a donc été effectué pour obtenir le véritable âge cambial du dernier cerne de tous les échantillons. Pour chaque profil, lorsque les cernes ont été dénombrés, les zones du bois initial et du bois final ont été distinguées d'après la méthode de calcul du point d'inflexion proposée par Koubaa *et al.* (2002). L'application de cette méthode a permis de définir pour chaque cerne de chaque échantillon les largeurs du bois final et du bois initial. L'étape de dénombrement des cernes a conduit à l'élimination du

bouleau à papier et du thuya occidental de l'échantillonnage pour lesquelles la distinction des cernes n'était pas possible sur les profils du résistographe. L'analyse à l'échelle du cerne est donc menée seulement pour le frêne noir, le peuplier faux-tremble, le pin gris, le sapin baumier et ces quatre essences confondues.

#### 2.3.3.1.1 Mesure des caractéristiques de cernes

Pour chaque cerne de chaque échantillon, huit caractéristiques de cernes ont été mesurées simultanément pour les deux profils générés par les résistographe et le densitomètre : largeur du cerne, largeur du bois initial, largeur du bois final, masse volumique moyenne du cerne, masse volumique moyenne du bois initial, masse volumique moyenne du bois final, masse volumique minimale du cerne, masse volumique maximale du cerne.

#### 2.3.3.1.2 Compilation des caractéristiques des cernes par âge cambial

Pour comparer les variations radiales de la masse volumique entre le résistographe et le densitomètre, les valeurs des différentes caractéristiques des cernes ont été compilées par âge cambial et par essence. Les caractéristiques des cernes ont été compilées pour le résistographe d'une part et le densitomètre d'autre part (Figure 2.6) pour tous les cernes visibles par les deux appareils. Ce processus a donc permis d'obtenir la variation radiale moyenne des huit caractéristiques de cernes choisies pour chaque essence pour les deux appareils.

#### 2.3.3.1.3 Corrélations entre les profils du résistographe et ceux du densitomètre.

Pour vérifier les hypothèses, les variations radiales annuelles (moyenne par cerne) des huit caractéristiques ont été analysées par essence d'une part et pour toutes les essences confondues d'autre part. Soit  $C_i$  l'une des huit caractéristiques de cernes étudiées ;  $C_{id}(essence)$  est la variation radiale de la caractéristique  $i$  estimée par le densitomètre et  $C_{ir}(essence)$  la variation radiale de la caractéristique  $i$  estimée par le

résistographe.  $C_{id}(essence)$  est liée à  $C_{ir}(essence)$  par la fonction affine  $2i$  de pente  $a_i$  et d'ordonnée à l'origine  $d_i$ , voir Équation 2.2

$$C_{id}(essence) = a_i \times C_{ir}(essence) + d_i \quad (2.2)$$

Équation 2.2 Fonction affine  $2i$  reliant l'estimation de la caractéristique du cerne  $i$  par le résistographe à l'estimation de la caractéristique du cerne  $i$  par le densitomètre ;  $a_i$  et  $d_i$  sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la fonction affine  $2i$ .

Ainsi, pour chaque caractéristique du cerne, les coefficients  $a_i$  et  $d_i$  de la fonction affine  $2i$  ont été estimés par simple régression linéaire selon la méthode des moindres carrés ordinaire. L'évaluation quantitative du potentiel du résistographe en microdensitométrie passe par la classification des coefficients des fonctions affines trouvées : la pente et le coefficient de régression linéaire d'après les critères relevés dans la littérature. La valeur du coefficient de régression linéaire  $R^2$  est utilisée pour définir la force de la relation entre les profils du résistographe et du densitomètre selon les intervalles suivants inspirées de Gao *et al.* (2017):

- $R^2 \in [0-0,4[$  : Corrélation faible ;
- $R^2 \in [0,4-0,6[$  : Corrélation moyenne ;
- $R^2 \in [0,6-0,8[$  : Corrélation modérée;
- $R^2 \in [0,8-1[$  : Corrélation forte.

La valeur de la pente permet de statuer quant à la cohérence de la relation :

- Pente  $< 0$  : relation incohérente;
- Pente  $\in [0-1[$  : l'attribut est sous-estimé par le résistographe;
- Pente = 1 : l'attribut est estimé correctement par le résistographe;
- Pente  $> 1$  : l'attribut est surestimé par le résistographe.

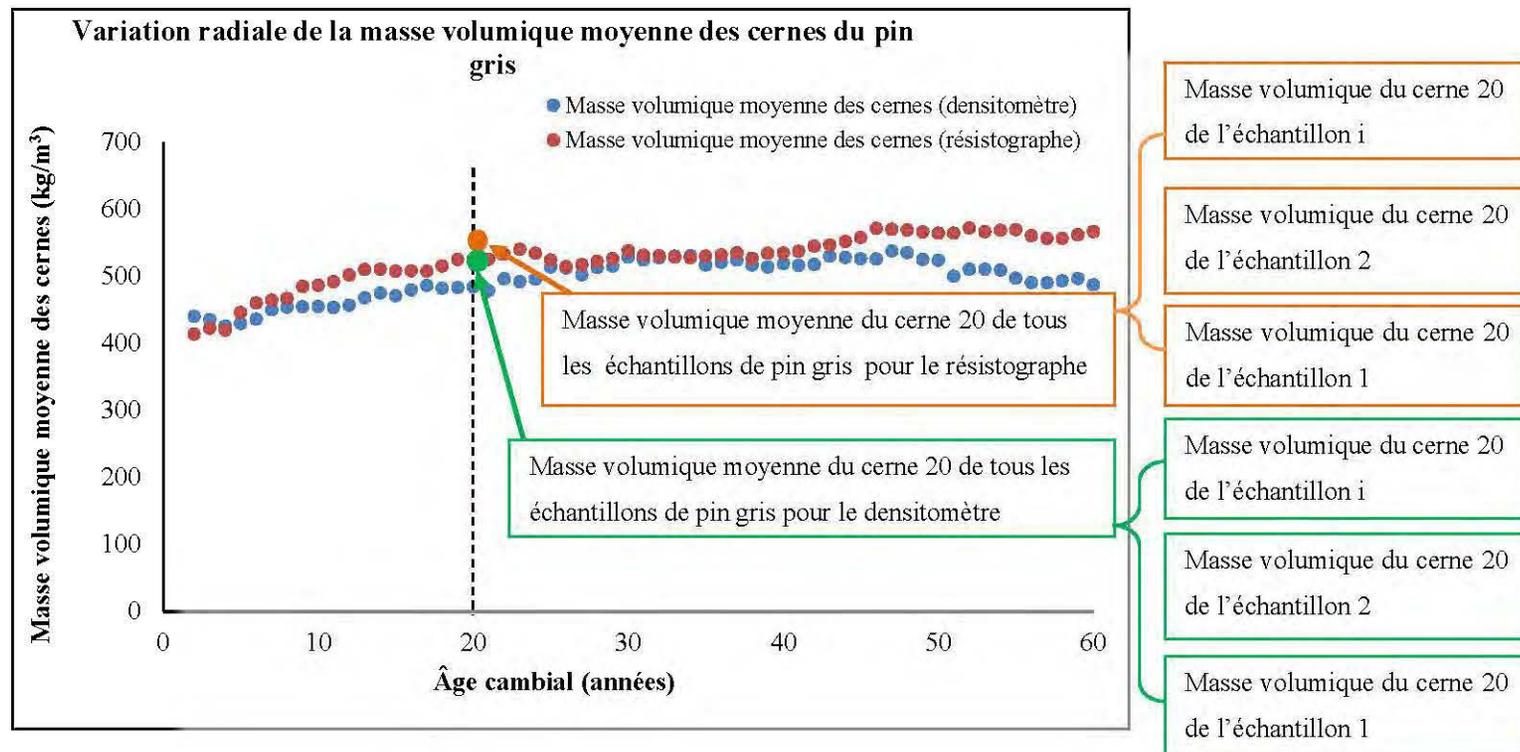


Figure 2.6 Schéma explicatif du processus de calcul des variations radiales de la masse volumique moyenne des cerne pour le pin gris. La moyenne de l'ensemble des échantillons est calculée pour la masse volumique de chaque cerne. L'opération est exécutée pour les huit caractéristiques de cerne sélectionnées. Ainsi, chaque point figurant sur le graphique est une valeur moyenne des échantillons pour le résistographe (point orange) et pour le densitomètre (point vert).



## CHAPITRE III

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

*Avant de traiter les analyses relatives à la validation du résistographe en microdensitométrie figure une présentation des caractéristiques générales des échantillons. La masse volumique à l'état sec et l'âge des arbres sondés ont été calculés pour évaluer leur concordance respectivement avec les valeurs de masses volumiques trouvées dans la littérature et l'historique des sites sélectionnés (section 2.1.2).*

*Rappel : aucune correction liée à l'humidité du bois n'a été apportée dans les analyses (voir 2.2)*

#### 3.1 Caractéristiques générales des échantillons prélevés : masse volumique et âge des arbres

##### 3.1.1 Les masses volumiques mesurées sont proches des valeurs trouvées dans la littérature

Les valeurs de masse volumique mesurées à l'état sec (Tableau 3.1) sont légèrement supérieures aux valeurs trouvées dans la littérature. Les masses volumiques moyennes mesurées pour le bouleau à papier, le peuplier faux-tremble, le pin gris et le thuya occidental sont incluses dans les intervalles de masses volumiques moyennes trouvées dans la littérature mais sont proches de la limite supérieure de l'intervalle

(Tableau 3.1). Pour le frêne noir et le sapin baumier, les valeurs de masse volumique moyenne mesurées sont plus élevées que les valeurs trouvées dans la littérature. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les données trouvées dans la littérature sont issues de compilation d'un nombre d'échantillons important (plusieurs centaines par essences) qui proviennent de sites divers au travers du Canada. Dans cette étude, le nombre d'échantillon est réduit (30 arbres par essence) et les arbres sondés ont crû en forêt boréale; la saison de végétation est plus courte, la croissance plus lente, ce qui induit une masse volumique de l'arbre plus élevée. Un autre biais pourrait être induit par la méthode de volumétrie utilisée pour mesurer le volume des échantillons. En effet, dans la littérature citée, le volume est mesuré d'après une méthode normée qui utilise des cubes de bois, alors que dans cette étude, la masse volumique a été mesurée pour des carottes de bois. Néanmoins Polge (1962) indique que les résultats de mesure de volumétrie pour des carottes et des cubes de bois sont similaires.

Ainsi, la gamme de masse volumique explorée par l'échantillonnage (360 à 700 kg/m<sup>3</sup>) permet bien de travailler sur une gamme de densité proche de celle qui était attendue 300 à 600 kg/m<sup>3</sup>. Néanmoins l'utilisation d'un plus grand nombre d'échantillons pourrait permettre de limiter la dispersion des valeurs mesurées et d'accroître la robustesse de la calibration du résistograhe.

Tableau 3.1 Comparaison des valeurs de masses volumiques mesurées avec les valeurs trouvées dans la littérature d'après Jessome (1977), Alemdag (1985), Gonzales (1990), Bowyer (2005), Zhang et Koubaa (2009), Wheeler (2011) et MFFP (2014).

<b>Essence</b>	<b>Masse volumique moyenne à l'état anhydre (kg/m<sup>3</sup>) ± coefficient de variance</b>	<b>Étendu des masses volumiques moyennes de la littérature (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Âge des peuplements</b>	<b>Âge cambial moyen des arbres</b>	<b>Écart-type de l'âge moyen</b>
<b>Bouleau à papier</b>	611±16%	460-640	97	70	10,6
<b>Frêne noir</b>	666±8%	450-650	97	54	12,7
<b>Peuplier faux-tremble</b>	462±16%	290-500	39	40	3,4
<b>Pin gris</b>	474±10%	300-530	97	76	7,2
<b>Sapin baumier</b>	429±12	270-400	97	48	13,5
<b>Thuya occidental</b>	389±15	240-420	257	66	8,5

### 3.1.2 Variation de l'âge des arbres par essence

La plupart des peuplements qui ont servis à l'échantillonnage se sont développés après un feu ayant eu lieu en 1923, soit environ 90 ans avant l'échantillonnage effectué pour cette étude à l'exception des peuplements de peuplier faux-tremble et de thuya. Pour le peuplier faux-tremble, le peuplement s'est régénéré naturellement après une coupe rase effectuée dans les années 70, soit il y a presque 50 ans. Pour le thuya, il est possible que des coupes aient eu lieu, ce qui expliquerait l'écart d'âge entre le peuplement et l'âge cambial moyen. Conformément à cet historique, les plus vieux arbres échantillonnés ont au plus 93 ans pour toutes les essences à l'exception du peuplier faux-tremble pour lequel l'âge maximal est de 47 ans (voir Tableau 3.1).

### 3.2 Analyses à l'échelle macroscopique – calibration du résistographe

La fonction affine 1 trouvée par régression linéaire des valeurs de masse volumique moyenne du bois mesurées par le densitomètre sur les valeurs de résistance moyenne du bois mesurées par le résistographe présente une pente positive de 1,54 et le coefficient de régression linéaire associé est de 0,75 (équation bleue sur la Figure 3.1). La relation de régression linéaire entre la résistance du bois mesurée par le résistographe et la masse volumique mesurée par volumétrie est présentée à titre indicatif (équation et droite oranges sur la Figure 3.1). Il est à noter que les valeurs des pentes, des ordonnées à l'origine et du coefficient de régression linéaire sont proches pour les deux régression linéaires.

Les hypothèses 1.1 et 1.2 sont vérifiées car la pente est positive et le coefficient de régression linéaire est supérieur à 0,7. Ce résultat est encourageant pour évaluer le potentiel du résistographe en microdensitométrie, mais il est inférieur aux résultats rapportés par Rinntech®. En effet, d'après le fabricant du résistographe, il est

possible d'obtenir des courbes de calibrations dont le coefficient de régression linéaire est supérieur à 0,9 (Rinn *et al.* 1996).

*Dans la suite des analyses, toutes les données de masse volumique présentées pour le résistographe ont été calibrées en utilisant la fonction affine 1 décrite par l'équation bleue sur la Figure 3.1.*

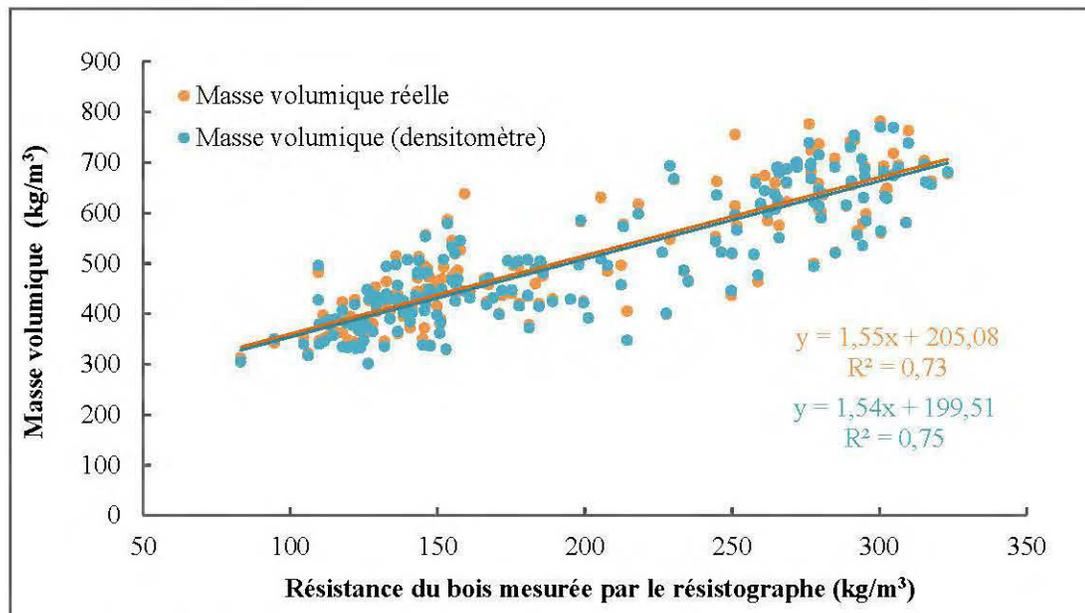


Figure 3.1 Résultats des régressions linéaires entre la masse volumique mesurée par le densitomètre et la résistance du bois mesurée par le résistographe (en bleu) et entre la masse volumique réelle mesurée par volumétrie et la résistance du bois mesurée par le résistographe (en orange).

### 3.3 Validation du potentiel du résistographe en microdensitométrie – analyses à l'échelle microscopique

*Rappel : Les résultats ne sont présentés que pour le frêne noir, le peuplier faux-tremble, le pin gris, le sapin baumier et toutes essences confondues.*

#### 3.3.1 Frêne noir

##### 3.3.1.1 Largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

###### 3.3.1.1.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont présentés à la Figure 3.2. La variation radiale de la largeur moyenne du cerne estimée par le résistographe est semblable à celle estimée par le densitomètre et les deux courbes sont superposées (Figure 3.2). Pour les largeurs du bois initial et du bois final, les variations radiales estimées par le résistographe ne concordent pas avec celles du densitomètre. Pour le bois final, la courbe du densitomètre est au dessus de celle du résistographe et à l'inverse pour le bois initial, la courbe du densitomètre est en dessous de celle du résistographe (Figure 3.2).

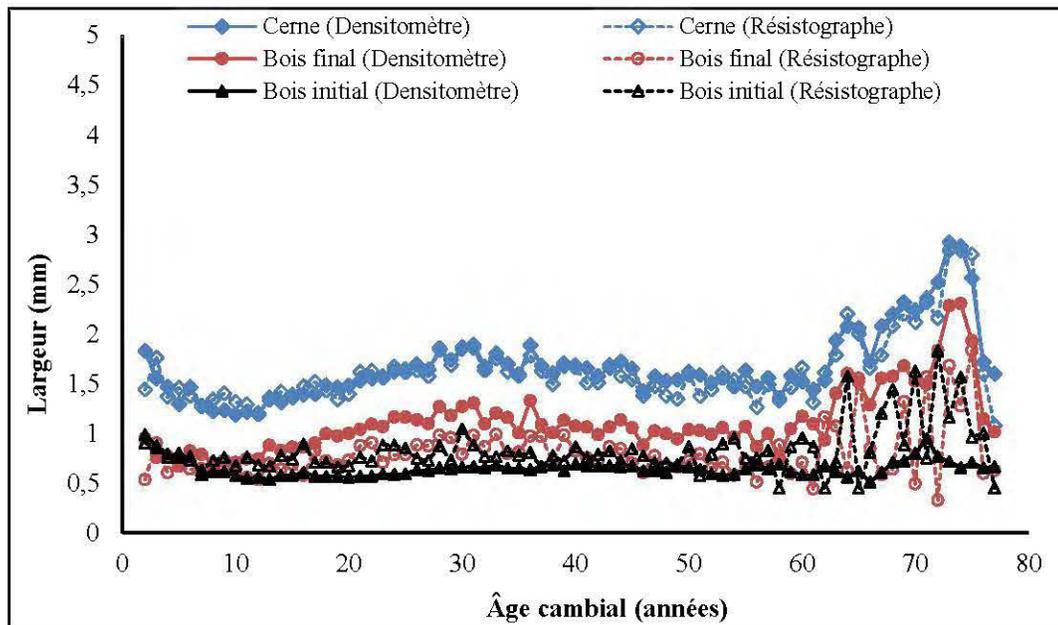


Figure 3.2 Profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le frêne noir mesurées par le résistographe et le densitomètre

### 3.3.1.1.2 Relation entre les données de largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les coefficients trouvés par régression linéaire des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour la variation radiale de la largeur moyenne du cerne sont illustrés à la Figure 3.3. La pente de 0,95 est proche de 1, ce qui indique que le résistographe sous-estime de 5% la largeur du cerne par rapport au densitomètre. Le coefficient de régression linéaire ( $r^2$ ) de 0,86 est supérieur à 0,8 donc la corrélation est forte. En revanche, les résultats de régression linéaire sont faibles pour les largeurs du bois initial et du bois final. En effet, pour le bois initial, la pente de 0,06 est très inférieure à 1, et le coefficient de régression est de 0,04 (Figure 3.3). Pour la largeur du bois final, la pente est de 0,69, ce qui suggère que le résistographe surestime la

largeur du bois final par rapport au densitomètre. Toutefois le coefficient de régression linéaire est de 0,33, ce qui indique une faible corrélation (Figure 3.3).

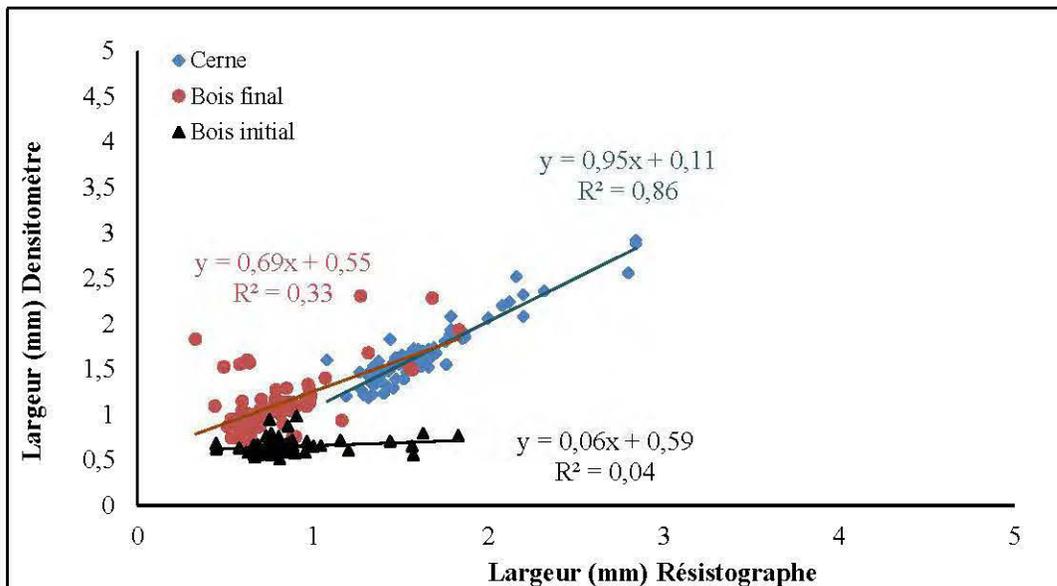


Figure 3.3 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le frêne noir.

### 3.3.1.2 Masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

#### 3.3.1.2.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe sont présentées à la Figure 3.4. Les variations radiales de la masse volumique du cerne ne sont pas similaires entre le résistographe et le densitomètre. Les profils de variation radiale de la largeur du bois final du résistographe et du densitomètre présentent des variations inversées. En effet, pour le densitomètre, la masse volumique moyenne du cerne diminue

graduellement avec l'âge cambial alors que pour le résistographe, la masse volumique moyenne du cerne augmente avec l'âge cambial. Il est à noter que pour le résistographe, les variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont faibles et les courbes se superposent tandis que pour le densitomètre, les courbes de variations radiales du cerne, du bois initial et du bois final sont distinctes ( $192 \text{ kg/m}^3$  d'écart en moyenne) et présentent des variations inverses (Figure 3.4).

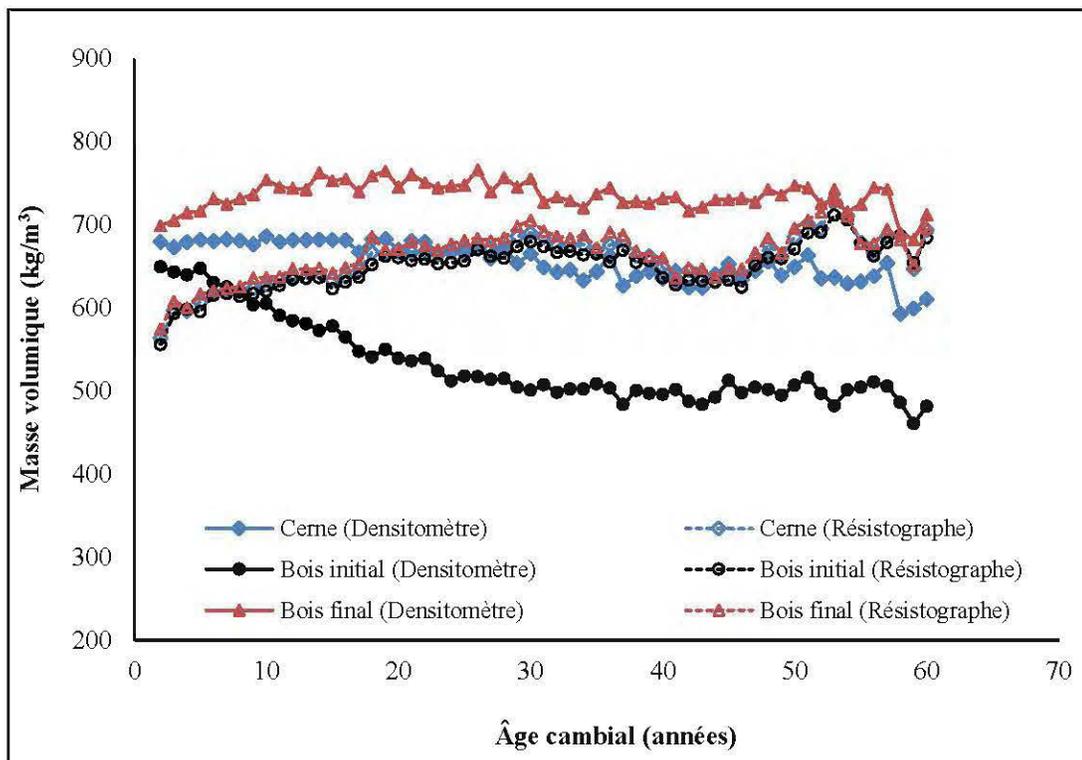


Figure 3.4 Profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le frêne noir mesurés par le résistographe et le densitomètre.

### 3.3.1.2.2 Relation entre les données de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les coefficients de corrélations trouvés pour la régression linéaire des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre en fonction de celles estimées par le résistographe sont illustrés à la Figure 3.5. Pour la masse volumique du cerne, la pente négative de -0,34 et le coefficient de régression de 0,20 indiquent que la corrélation est faible et peu cohérente (Figure 3.5). Pour le bois initial, la pente est de -1,33, et le coefficient de régression linéaire de 0,58 (Figure 3.5), donc la régression linéaire n'est pas cohérente. Pour le bois final, la pente de 0,14 et le coefficient de régression linéaire de 0,06 indiquent que la corrélation entre les deux signaux est très faible voire nulle (Figure 3.5).

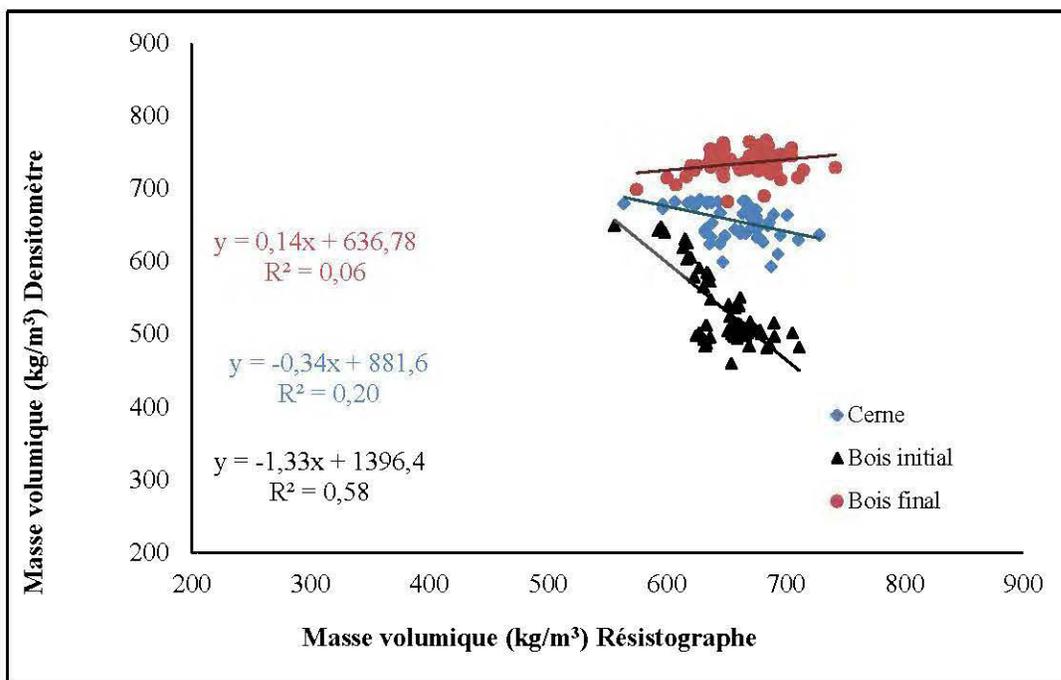


Figure 3.5 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le frêne noir.

### 3.3.1.3 Contraste entre les masses volumiques extrêmes

#### 3.3.1.3.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des masses volumiques maximale, minimale et moyenne du cerne mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les variations radiales des masses volumiques moyenne, minimale et maximale mesurées par le densitomètre et le résistographe sont présentées à la Figure 3.6. Les variations radiales des masses volumiques extrêmes mesurées par le résistographe sont semblables, alors que pour le densitomètre les variations sont inversées entre les masses volumiques minimale et maximale : la masse volumique maximale augmente avec l'âge cambial alors que la masse volumique minimale diminue avec l'âge cambial (Figure 3.6). En moyenne, la différence entre la masse volumique maximale et la masse volumique minimale est de  $75 \text{ kg/m}^3$  pour le résistographe et de  $385 \text{ kg/m}^3$  pour le densitomètre (Figure 3.6).

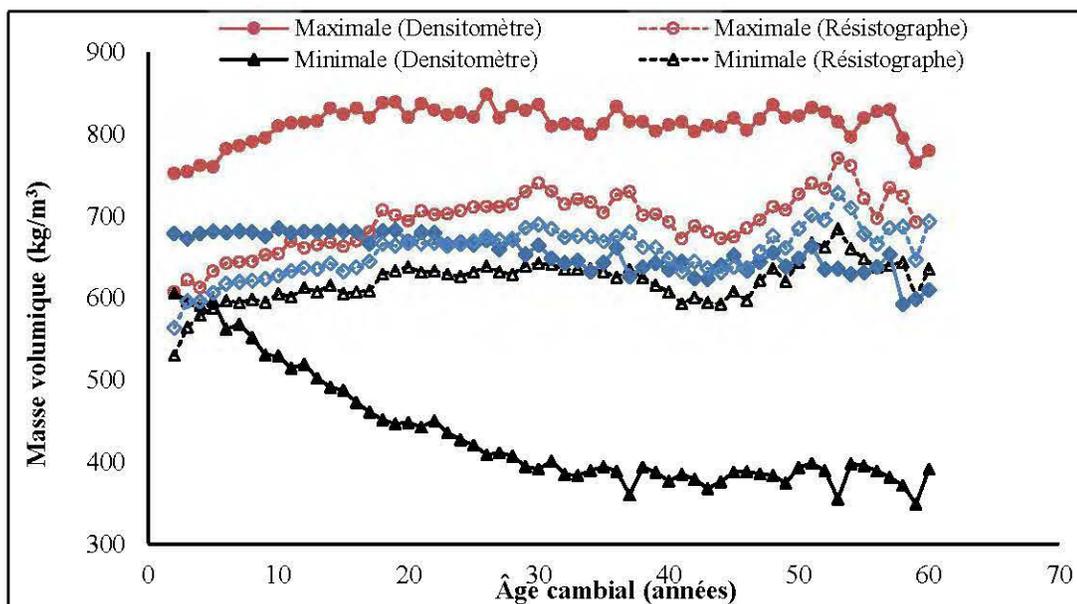


Figure 3.6 Profils de variation radiale des masses volumiques moyenne (bleu), minimale (noir) et maximale (rouge) du cerne mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le frêne noir

### 3.3.1.3.2 Relation entre les données de masse volumique minimale et maximale du cerne mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les coefficients de corrélations trouvés pour la régression linéaire des masses volumiques minimale et maximale mesurées par le densitomètre en fonction de celles estimées par le résistographe sont illustrés à la Figure 3.7. Comme pour les masses volumiques du bois initial et du bois final, les relations sont faibles entre les données du résistographe et du densitomètre. Pour la masse volumique minimale du cerne, la pente est de 0,33 et le coefficient de régression est de 0,29. Pour la masse volumique maximale du cerne, la pente est négative de -1,78 et le coefficient de régression linéaire est de 0,41.

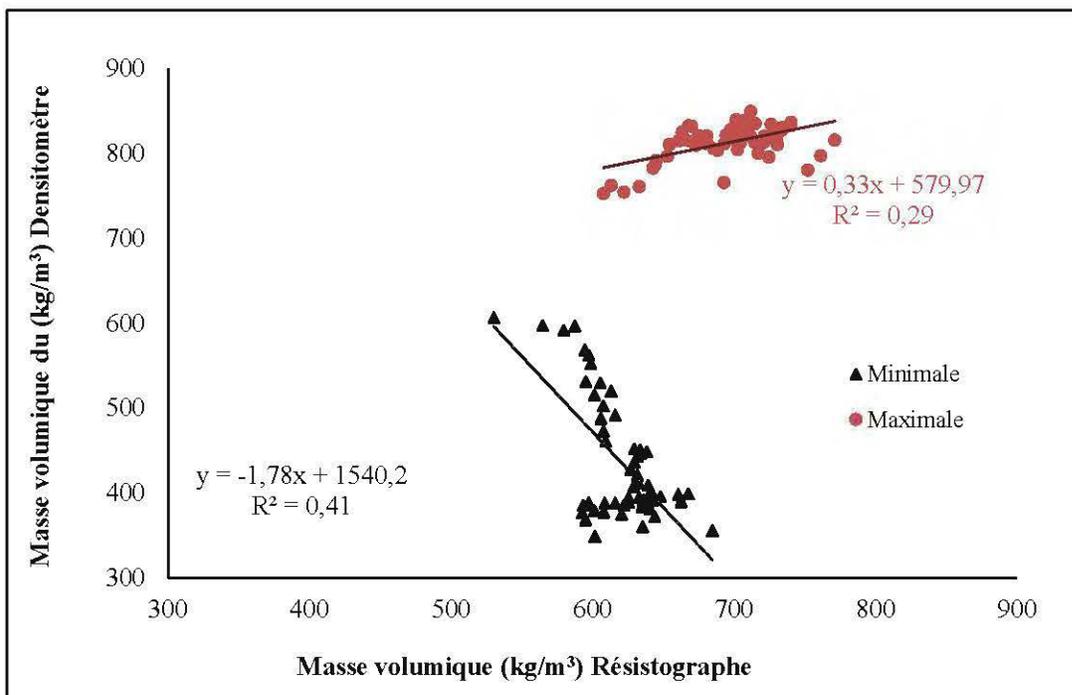


Figure 3.7 Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) pour le frêne noir.

### 3.3.2 Peuplier faux-tremble

#### 3.3.2.1 Largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

##### 3.3.2.1.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont présentés à la Figure 3.8. La largeur moyenne du cerne diminue graduellement de la moelle vers l'écorce et les courbes du résistographe et du densitomètre sont superposées (Figure 3.8). Les profils de variations radiales des largeurs du bois initial et du bois final sont semblables pour le résistographe et le densitomètre et diminuent graduellement avec l'âge cambial (Figure 3.8). Néanmoins la courbe de variation radiale de la largeur moyenne de bois final mesurée par le densitomètre est superposée à celle du bois initial du résistographe (Figure 3.8). Donc le résistographe surestime la largeur du bois initial par rapport au densitomètre. De même, la courbe de variation radiale de la largeur moyenne du bois initial du densitomètre est superposée à celle du bois final du résistographe (Figure 3.8), donc le résistographe sous-estime la largeur du bois final par rapport au densitomètre.

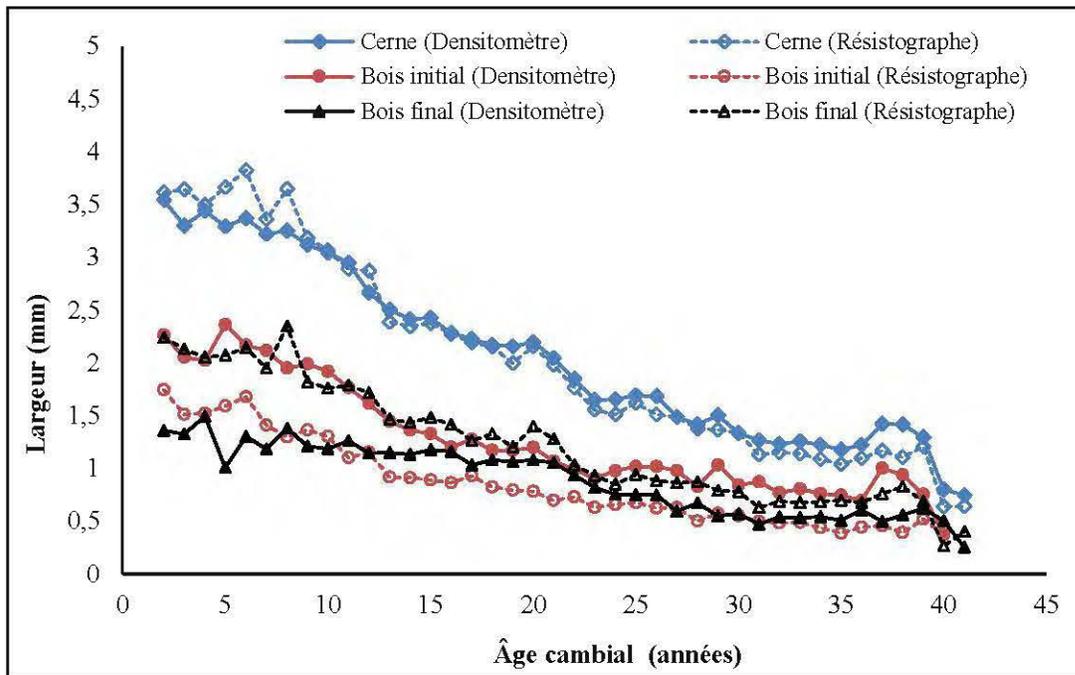


Figure 3.8 Profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le peuplier faux-tremble.

### 3.3.2.1.2 Relation entre les données de largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les coefficients de corrélations trouvés pour la régression linéaire des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre en fonction de celles estimées par le résistographe sont illustrés à la Figure 3.9. Les coefficients trouvés par régression linéaire des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour la variation radiale de la largeur moyenne du cerne sont bons; la pente de 0,85 est proche de 1. Donc, le résistographe sous-estime la largeur du cerne de 18% par rapport au densitomètre. L'ordonnée à l'origine est de 0,31 et le coefficient de corrélation de 0,98 est lui aussi proche de 1, ce qui indique une corrélation forte entre les signaux des deux appareils (Figure 3.9).

Les coefficients trouvés par régression linéaire des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour la variation radiale de la largeur moyenne du bois initial sont intéressants mais traduisent une sous-estimation de 20% de la largeur du bois initial par le résistographe par rapport au densitomètre. En effet, la pente de 1,26 et le coefficient de corrélation de 0,95 est lui aussi proche de 1, donc la corrélation entre les signaux des deux appareils est forte (Figure 3.9).

Les coefficients trouvés par régression linéaire des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour la variation radiale de la largeur moyenne du bois final sont intéressants mais traduisent une surestimation de 38% de la largeur du bois final par le résistographe par rapport au densitomètre. En effet, la pente est de 0,53 et le coefficient de corrélation de 0,87 est lui aussi proche de 1, ce qui indique une corrélation forte entre les signaux des deux appareils (Figure 3.9).

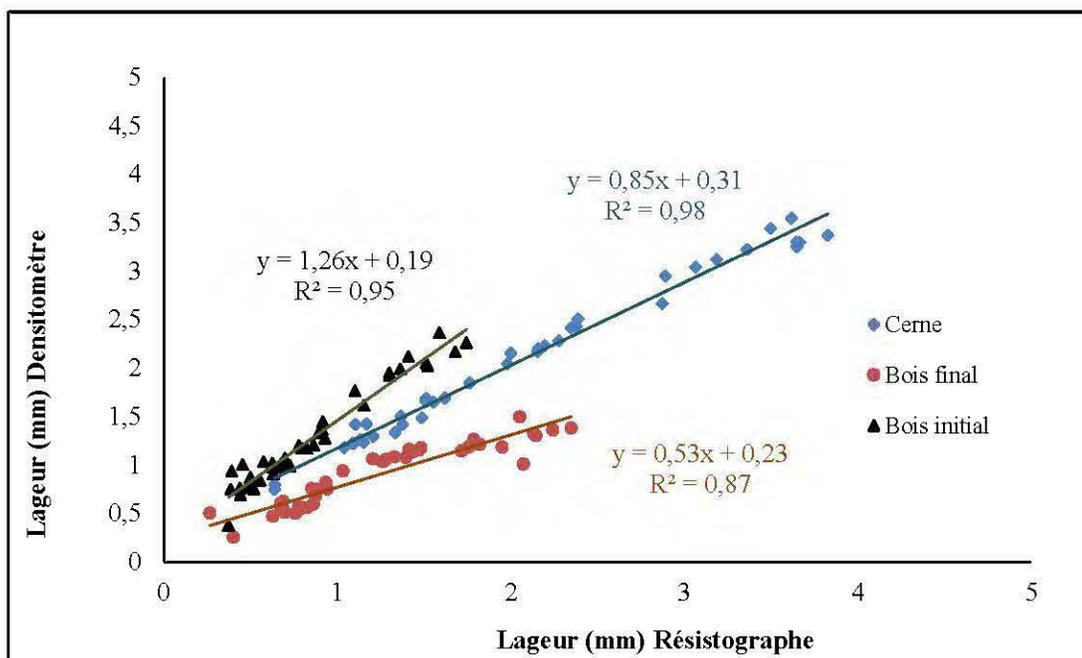


Figure 3.9 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le peuplier faux-tremble.

### 3.3.2.2 Masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

#### 3.3.2.2.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont présentés à la Figure 3.10. Pour le densitomètre, les masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final diminuent graduellement avec l'âge cambial, selon le même patron (Figure 3.10). Si les courbes ont des variations semblables, elles ne sont pas superposées et l'écart de masse volumique entre le bois initial et le bois final est en moyenne de  $96 \text{ kg/m}^3$  (Figure 3.10). Pour le résistographe, les trois courbes présentent les mêmes variations d'augmentation avec l'âge cambial (contrairement au densitomètre) et ont tendance à être superposées (Figure 3.10). Autrement dit, l'écart de masse volumique entre le bois final et le bois initial est plus important pour le densitomètre que pour le résistographe (Figure 3.10).

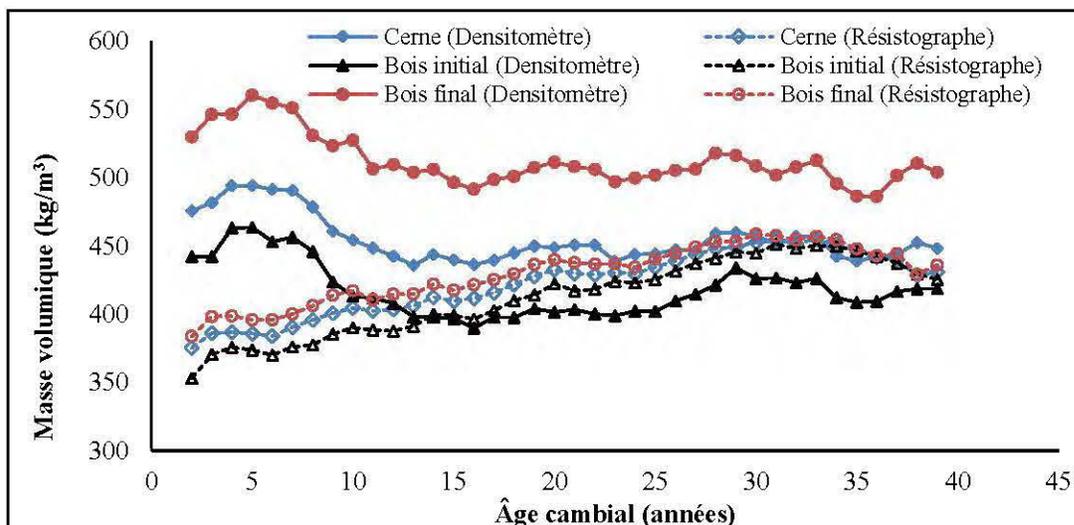


Figure 3.10 Profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le résistographe et le densitomètre pour le peuplier faux-tremble.

### 3.3.2.2.2 Relation entre les données de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les résultats des régressions linéaires entre les données du résistographe et celles du densitomètre sont illustrés à la Figure 3.11. Pour la régression linéaire des valeurs de la masse volumique moyenne du cerne, la pente de -0,42 est négative, donc incohérente et le coefficient de régression linéaire de 0,33 indique une faible corrélation entre les signaux des deux appareils (Figure 3.11). Pour le bois initial, la pente est de -0,27 donc la relation est incohérente et le coefficient de corrélation de 0,15 indique une faible corrélation entre les deux signaux (Figure 3.11). Pour le bois final, la pente de -0,60 et le coefficient de régression linéaire de 0,44 indiquent une corrélation faible et incohérente (Figure 3.11).

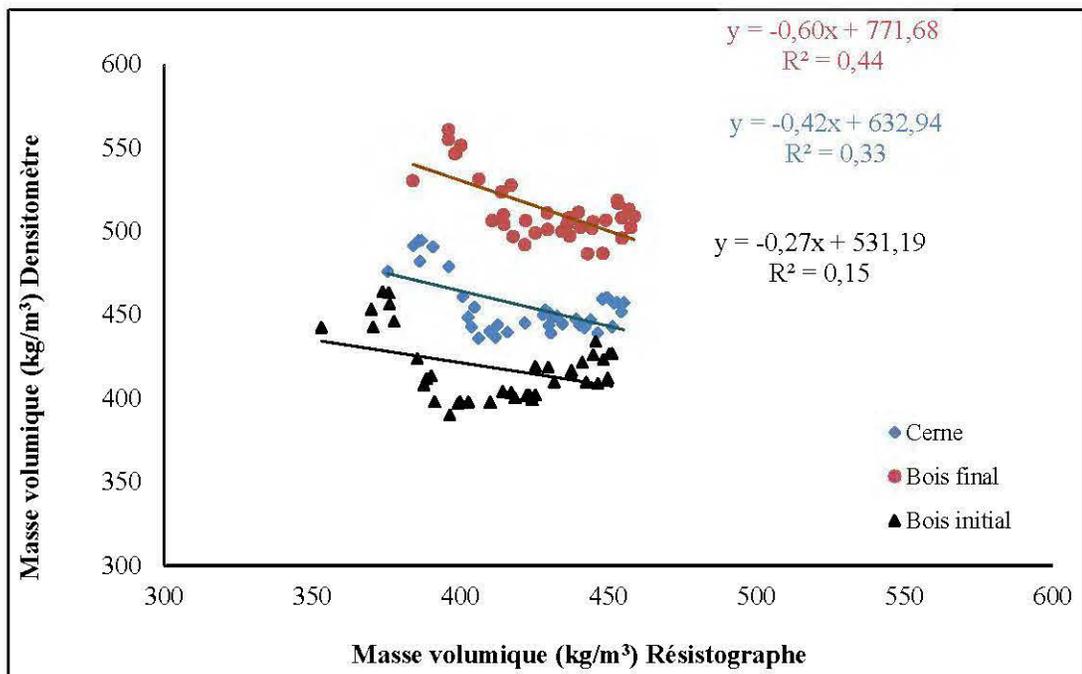


Figure 3.11 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le peuplier faux-tremble.

### 3.3.2.3 Contraste entre les masses volumiques extrêmes

#### 3.3.2.3.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des masses volumiques maximale, minimale et moyenne du cerne mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les variations radiales des masses volumiques minimale et maximale sont illustrées à la Figure 3.12. Leurs oscillations sont similaires pour le densitomètre, mais l'écart de masse volumique entre les deux courbes est en moyenne de  $212 \text{ kg/m}^3$  (Figure 3.12). Pour le résistographe, les courbes de variations radiales des masses volumique minimale et maximale présentent les mêmes oscillations (Figure 3.12). Néanmoins, l'écart de valeur entre les masses volumiques extrêmes est plus réduit que pour le densitomètre et les deux courbes ont tendance à se superposer ( $39 \text{ kg/m}^3$  d'écart en moyenne) (Figure 3.12), ce qui indique que le résistographe a tendance à sous-estimer le contraste entre les masses volumiques minimale et maximale.

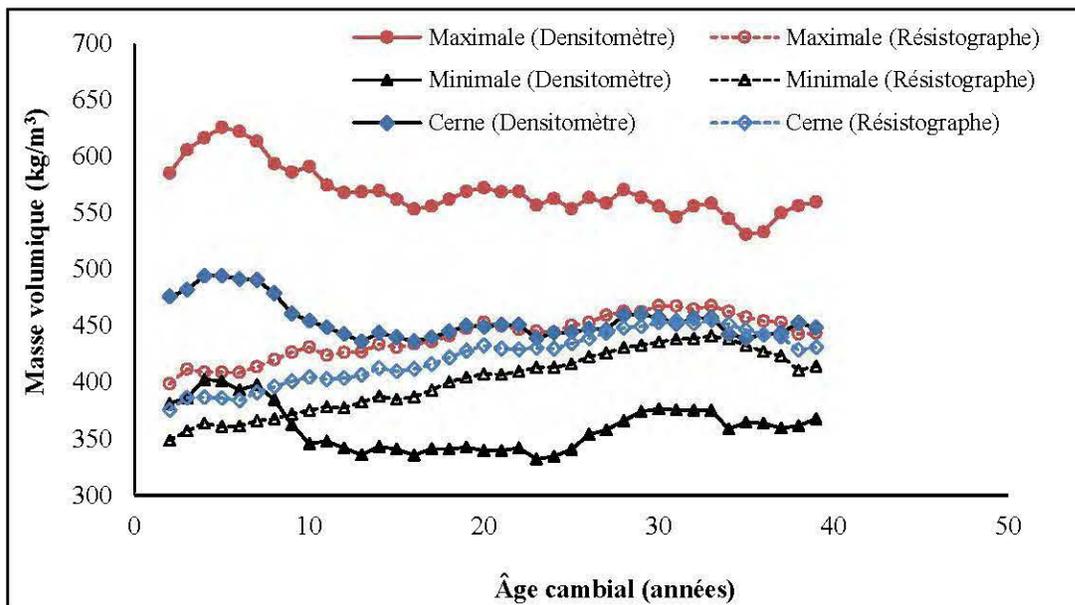


Figure 3.12 Profils de variations radiales des masses volumiques moyenne (bleu), minimale (noir) et maximale (rouge) du cerne mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le peuplier faux-tremble.

### 3.3.2.3.2 Relation entre les données de masse volumique minimale et maximale du cerne mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les résultats des régressions linéaires entre les valeurs des masses volumiques extrémales mesurées par le densitomètre et le sont présentés à la Figure 3.13. Pour la masse volumique maximale, la pente de -0,92 indique une relation incohérente entre les données des deux appareils, même si le coefficient de régression linéaire est de 0,61 (Figure 3.13). De même pour la masse volumique minimale, la pente négative de -0,17 et le coefficient de régression linéaire de 0,05 indiquent une relation incohérente entre les données du résistographe et celles du densitomètre (Figure 3.13).

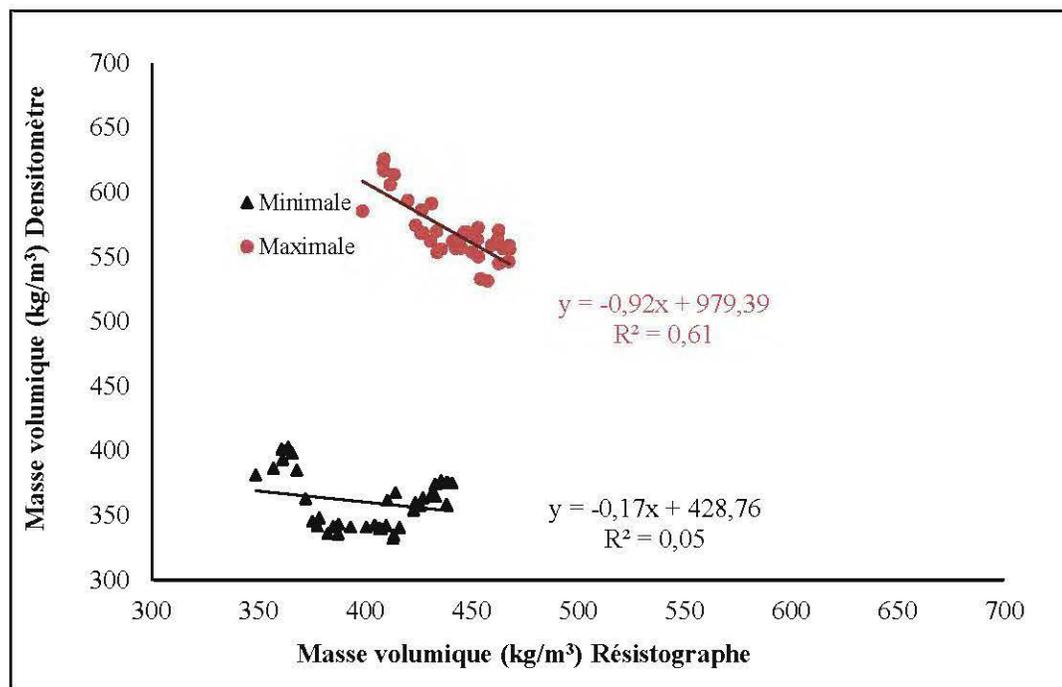


Figure 3.13 Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) pour le peuplier faux-tremble.

### 3.3.3 Pin gris

#### 3.3.3.1 Largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

##### 3.3.3.1.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont présentés à la Figure 3.14. La largeur moyenne du cerne diminue avec l'âge pour le résistographe et le densitomètre et les courbes sont superposées (Figure 3.14). La largeur du bois initial diminue avec l'âge cambial mais la courbe du résistographe est légèrement en dessous de celle du densitomètre (Figure 3.14), donc le résistographe a tendance à sous-estimer la largeur du bois initial. La largeur moyenne du bois final diminue avec l'âge cambial pour les deux appareils et les courbes sont superposées (Figure 3.14).

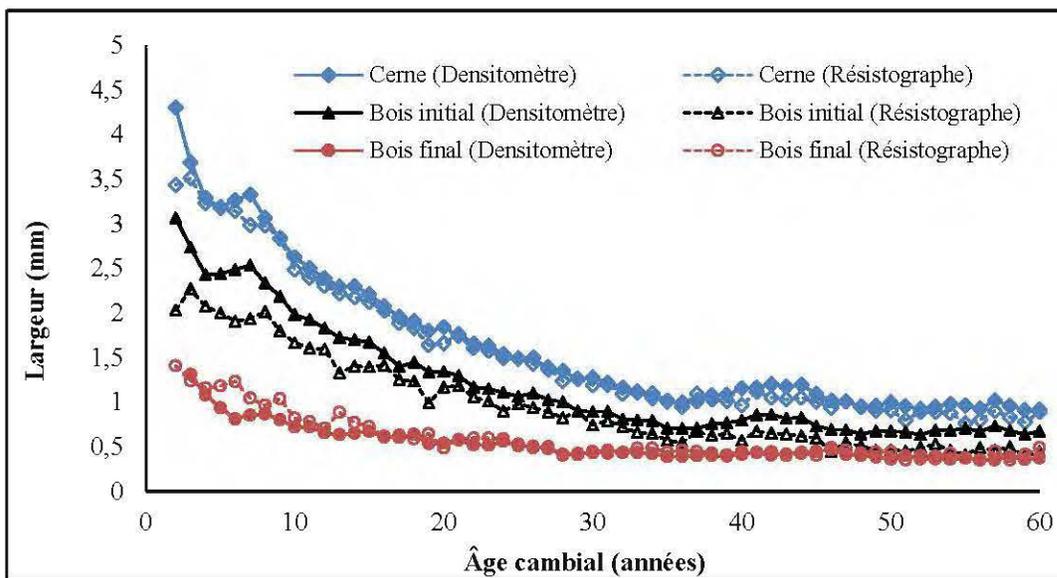


Figure 3.14 Profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le résistographe et le densitomètre pour le pin gris.

### 3.3.3.1.2 Relation entre les données de largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les coefficients de corrélations trouvés pour la régression linéaire des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre en fonction de celles estimées par le résistographe sont illustrés à la Figure 3.15. Ces résultats sont cohérents avec les observations graphiques : la pente est de 1,05 et le coefficient de régression linéaire est de 0,98, donc la corrélation est forte entre les signaux des deux appareils pour la largeur du cerne. Pour le bois initial, la pente est de 1,19 ce qui confirme que le résistographe sous-estime la largeur du bois initial de 20% par rapport au densitomètre. La corrélation est forte entre les signaux des deux appareils car le coefficient de régression linéaire est de 0,95 (Figure 3.15). Pour le bois final, la pente est de 0,72, donc le résistographe surestime la largeur du bois final de 40% par rapport au densitomètre et le coefficient de régression linéaire de 0,91 indique une bonne corrélation (Figure 3.15).

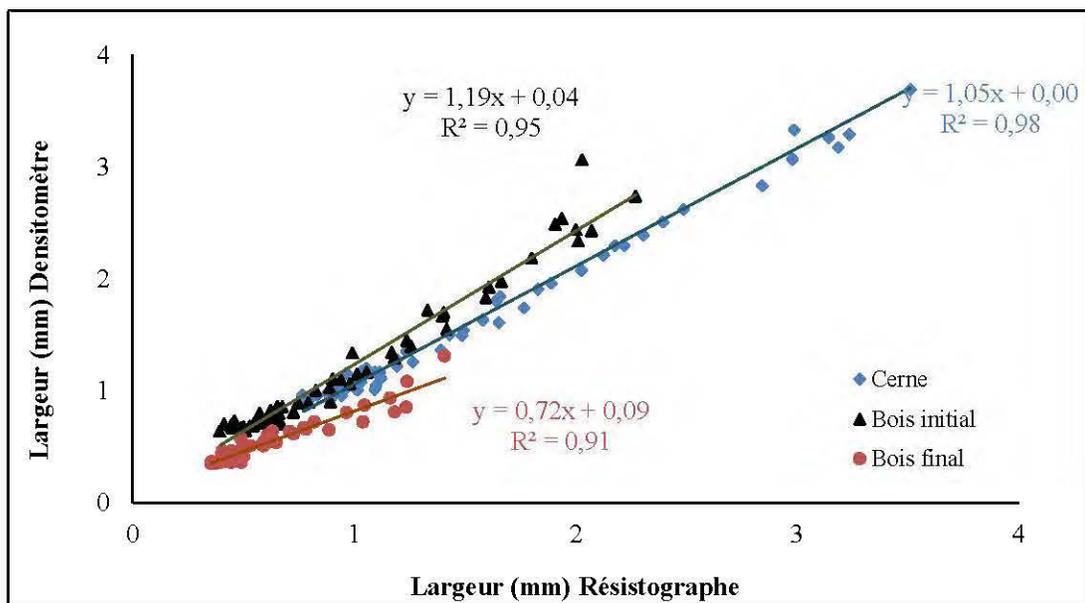


Figure 3.15 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe et leurs équations descriptives pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le pin gris.

### 3.3.3.2 Masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

#### 3.3.3.2.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont présentés à la Figure 3.16. La masse volumique moyenne du cerne augmente avec l'âge cambial pour les deux appareils. Néanmoins, la courbe du résistographe est au dessus de celle du densitomètre, donc le résistographe a tendance à surestimer la masse volumique du cerne par rapport au densitomètre. L'écart de masse volumique entre le bois initial et le bois final est plus important pour le densitomètre ( $300 \text{ kg/m}^3$  en moyenne) que pour le résistographe ( $22 \text{ kg/m}^3$  en moyenne) (Figure 3.16). Les courbes de variations radiales des masse volumiques du cerne, du bois initial et du bois final ont tendance à être superposées pour le résistographe (Figure 3.16).

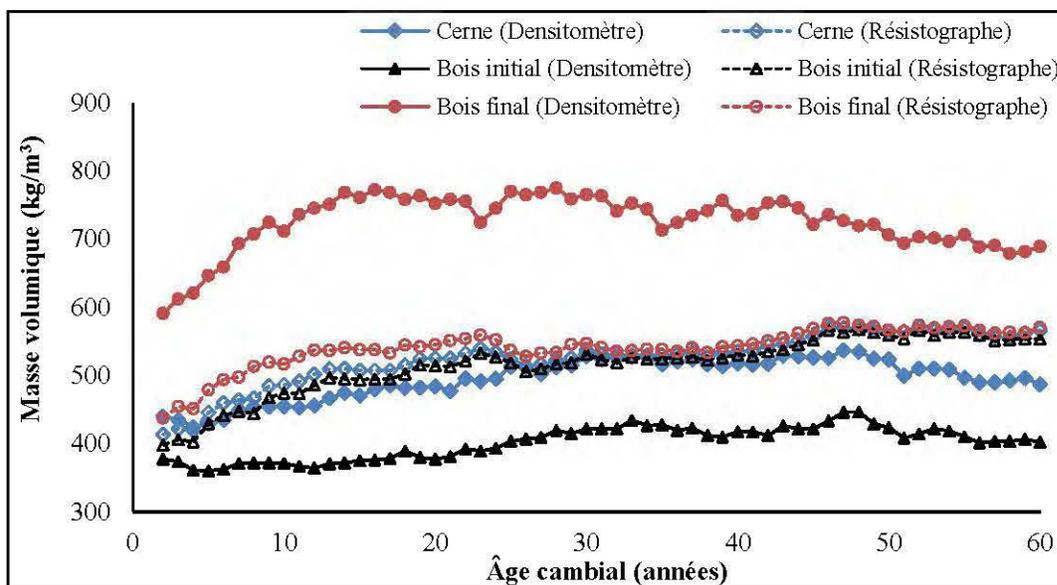


Figure 3.16 Profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le résistographe et le densitomètre pour le pin gris

### 3.3.3.2.2 Relation entre les données de masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les résultats des régressions linéaires entre les données du résistographe et celles du densitomètre sont illustrés à la Figure 3.17. Pour la masse volumique du cerne, la pente est de 0,63, ce qui confirme que le résistographe a tendance à surestimer la masse volumique moyenne du cerne de 57%. Le coefficient de régression linéaire de 0,65 indique une corrélation modérée pour la masse volumique du cerne (Figure 3.17). Pour la masse volumique du bois initial, la pente est de 0,43, donc le résistographe surestime la masse volumique moyenne du bois initial de 130% par rapport au densitomètre. Le coefficient de régression linéaire est de 0,59, ce qui indique un niveau de corrélation moyen (Figure 3.17). Pour le bois final, la pente est de 0,66 et le coefficient de régression linéaire est de 0,23, ce qui indique une corrélation faible entre les données du densitomètre et du résistographe.

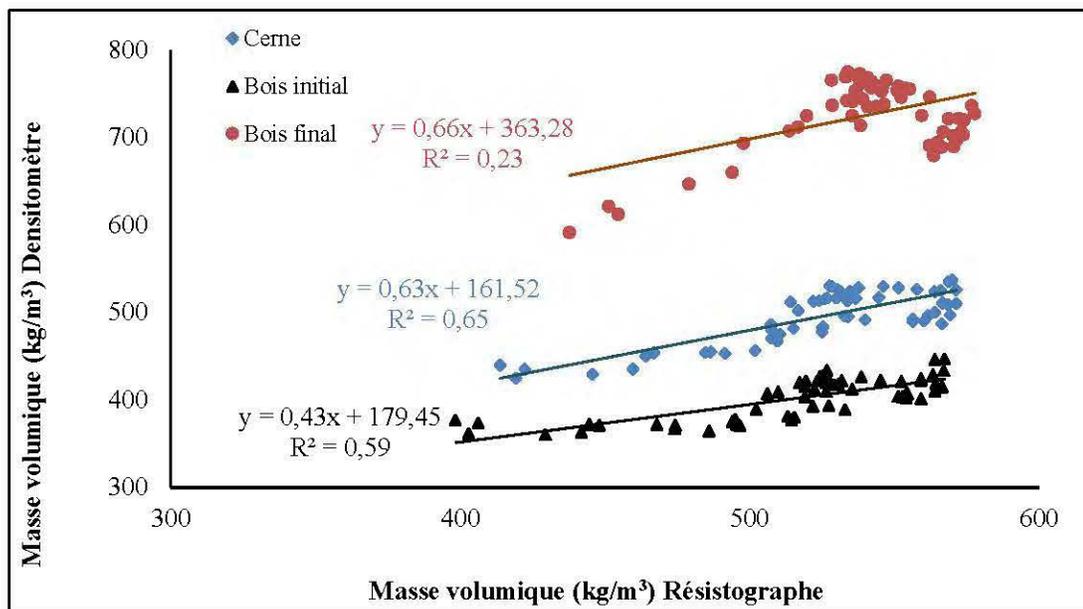


Figure 3.17 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le pin gris

### 3.3.3.3 Contraste entre les masses volumiques extrêmes

#### 3.3.3.3.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des masses volumiques maximale, minimale et moyenne du cerne mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les variations radiales des masses volumiques minimale et maximale sont illustrées à la Figure 3.18. Le contraste entre les masses volumiques extrêmes est plus important pour le densitomètre ( $492 \text{ kg/m}^3$  en moyenne) que pour le résistographe ( $53 \text{ kg/m}^3$  en moyenne) (Figure 3.18). Les variations radiales des masses volumiques extrêmes sont différentes pour le densitomètre, alors qu'elles sont similaires (augmentation avec l'âge cambial) pour le résistographe (Figure 3.18).

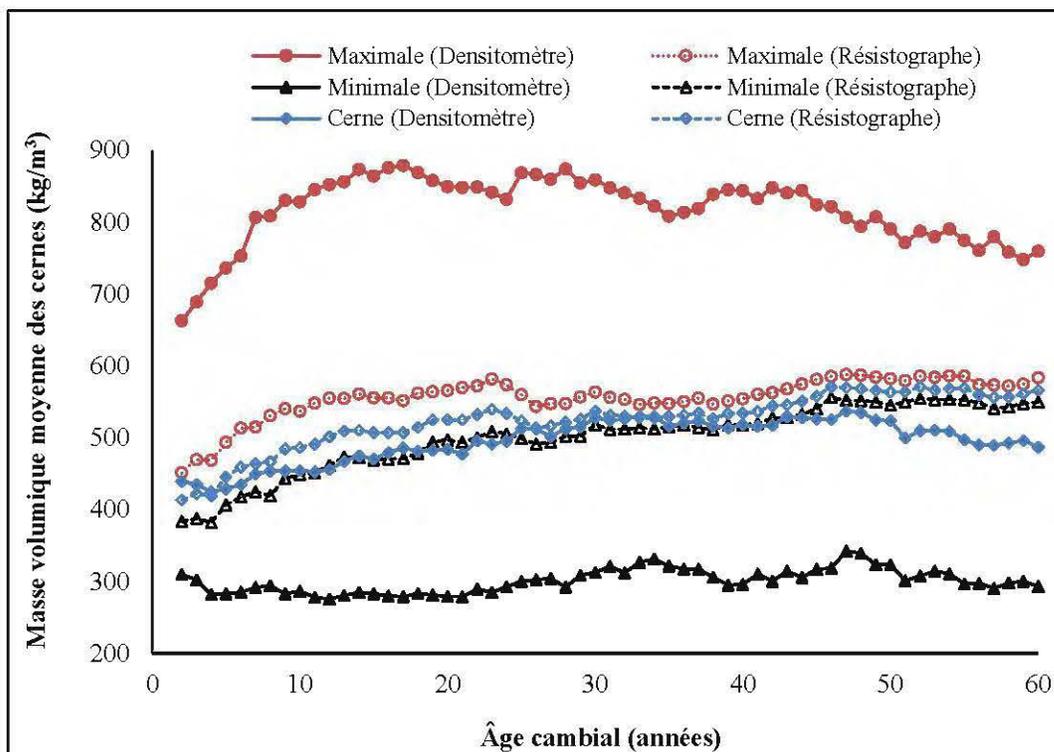


Figure 3.18 Profils des variations radiales des masses volumiques moyenne (bleu), minimale (noir) et maximale (rouge) du cerne mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le pin gris.

### 3.3.3.3.2 Relation entre les données de masse volumique minimale et maximale du cerne mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les résultats des régressions linéaires entre les valeurs des masses volumiques extrémales mesurées par le densitomètre et le résistographe sont présentés à la Figure 3.19. Les corrélations sont faibles pour ces deux données, les pentes et les coefficients de régression linéaire sont respectivement de 0,69 et 0,18 pour la masse volumique maximale du cerne et de 0,18 et 0,28 pour la masse volumique minimale du cerne (Figure 3.19).

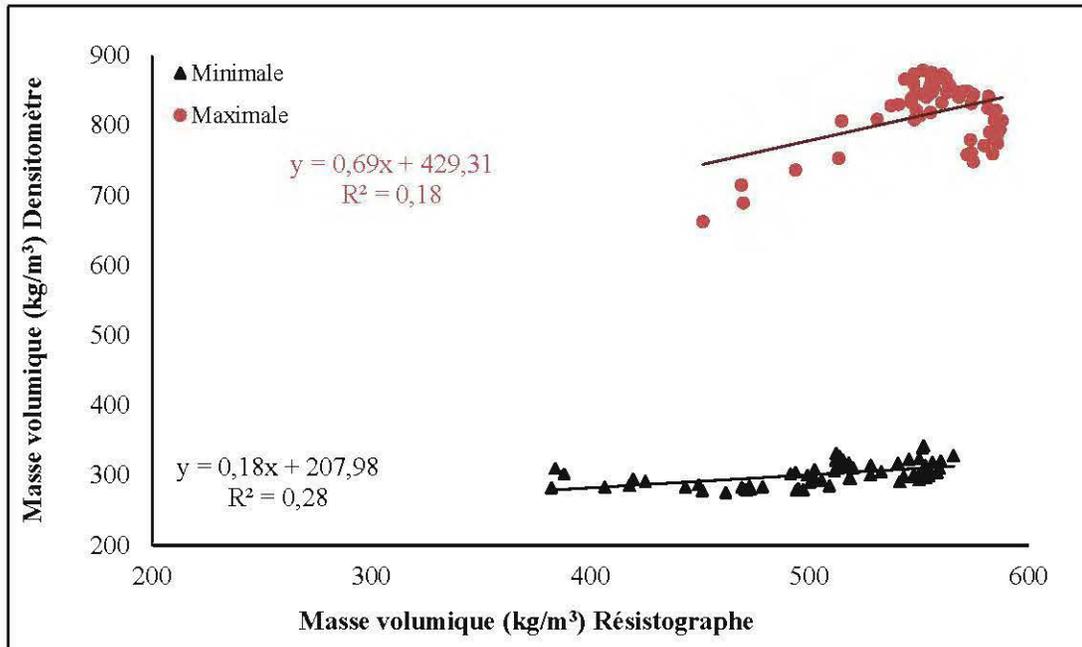


Figure 3.19 Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) pour le pin gris

### 3.3.4 Sapin baumier

#### 3.3.4.1 Largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

##### 3.3.4.1.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe.

Les profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont présentés à la Figure 3.20. Les largeurs moyennes du cerne, du bois initial augmentent avec l'âge cambial pour le densitomètre et le résistographe. Pour la largeur du cerne, les courbes des deux appareils sont superposées (Figure 3.20). Pour le bois final, la courbe du résistographe est au dessus de celle du densitomètre, donc le résistographe surestime la largeur du bois final par rapport au densitomètre (Figure 3.20). Le résultat est inverse pour le bois initial, le résistographe sous-estime la largeur du bois initial par rapport au densitomètre (Figure 3.20).

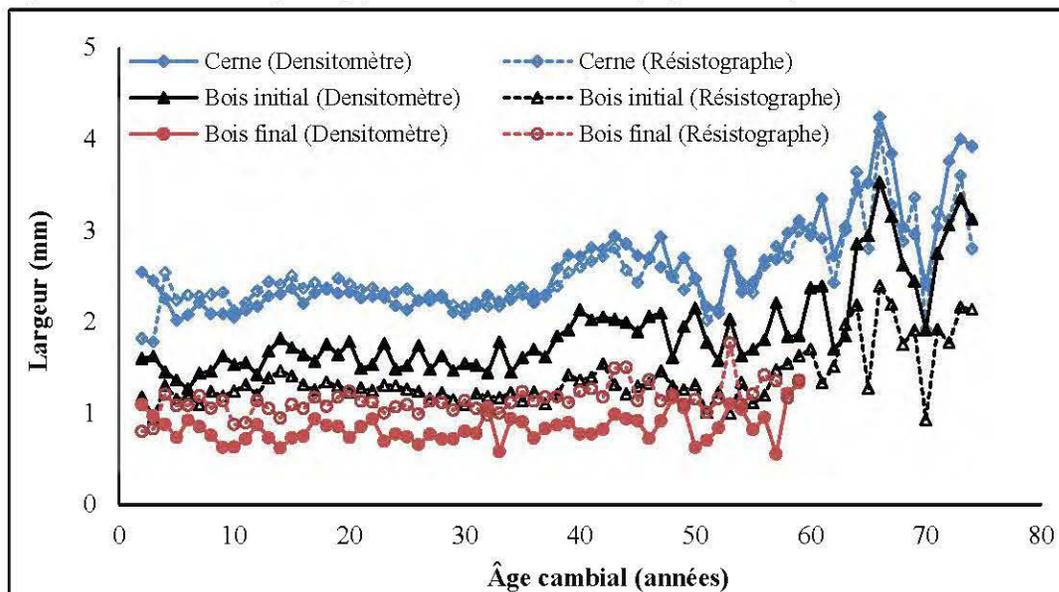


Figure 3.20 Profils des variations radiales des largeurs moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le sapin baumier

### 3.3.4.1.2 Relation entre les données de largeurs du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les résultats de régression linéaire entre les données du résistographe et celles du densitomètre sont illustrés à la Figure 3.21. Pour la largeur moyenne du cerne, la pente de 1,06 est proche de 1 et le coefficient de régression linéaire de 0,71 indique une corrélation modérée entre les deux signaux (Figure 3.21). Pour la largeur moyenne du bois initial, la pente de 1,312 est supérieure à 1, ce qui confirme que le résistographe sous-estime la largeur moyenne du bois initial de 40% par rapport au densitomètre. Le coefficient de régression linéaire de 0,64 (Figure 3.21) indique une corrélation modérée. Pour le bois final, la pente est de 0,28, donc le résistographe surestime la largeur moyenne du bois final de 250 % par rapport au densitomètre. Mais le coefficient de régression linéaire de 0,08 indique une faible corrélation entre les deux appareils (Figure 3.21).

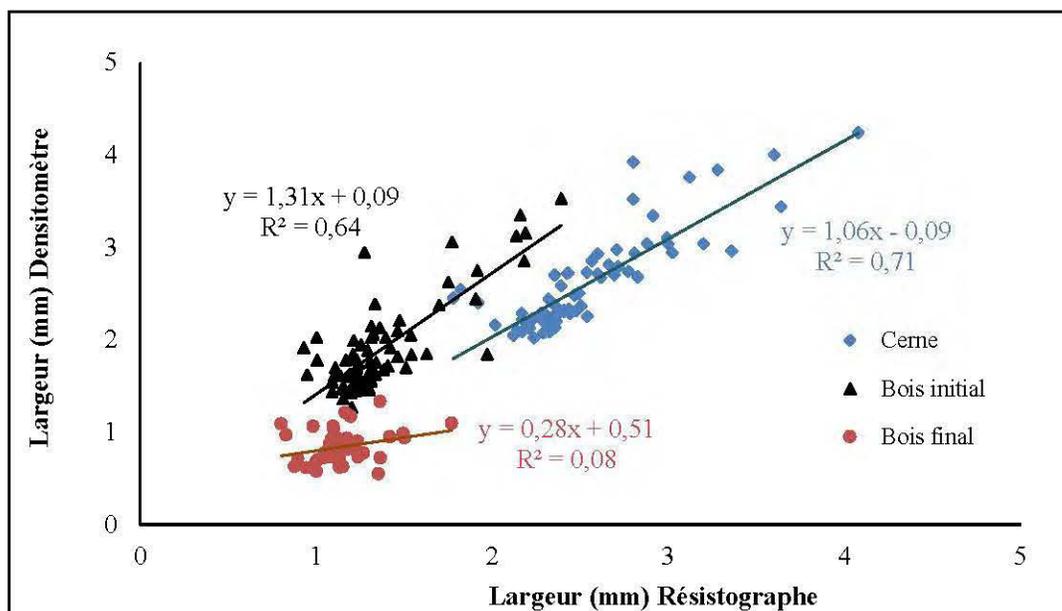


Figure 3.21 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le sapin baumier.

### 3.3.4.2 Masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

#### 3.3.4.2.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont présentés à la Figure 3.22. Les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final augmentent avec l'âge cambial. Les courbes du densitomètre et du résistographe sont superposées pour la masse volumique moyenne du cerne.(Figure 3.22). Les courbes des variations radiales des masses volumiques moyennes du bois initial et du bois final suivent les mêmes variations pour le résistographe et sont superposées à la variation radiale de la masse volumique moyenne du cerne (Figure 3.22), ce qui n'est pas le cas pour le densitomètre. L'écart moyen de masse volumique entre le bois initial et le bois final est de  $220 \text{ kg/m}^3$  pour le densitomètre, contre  $67 \text{ kg/m}^3$  pour le résistographe (Figure 3.22). Donc, le résistographe sous-estime la masse volumique du bois final et surestime la masse volumique du bois initial par rapport au densitomètre.

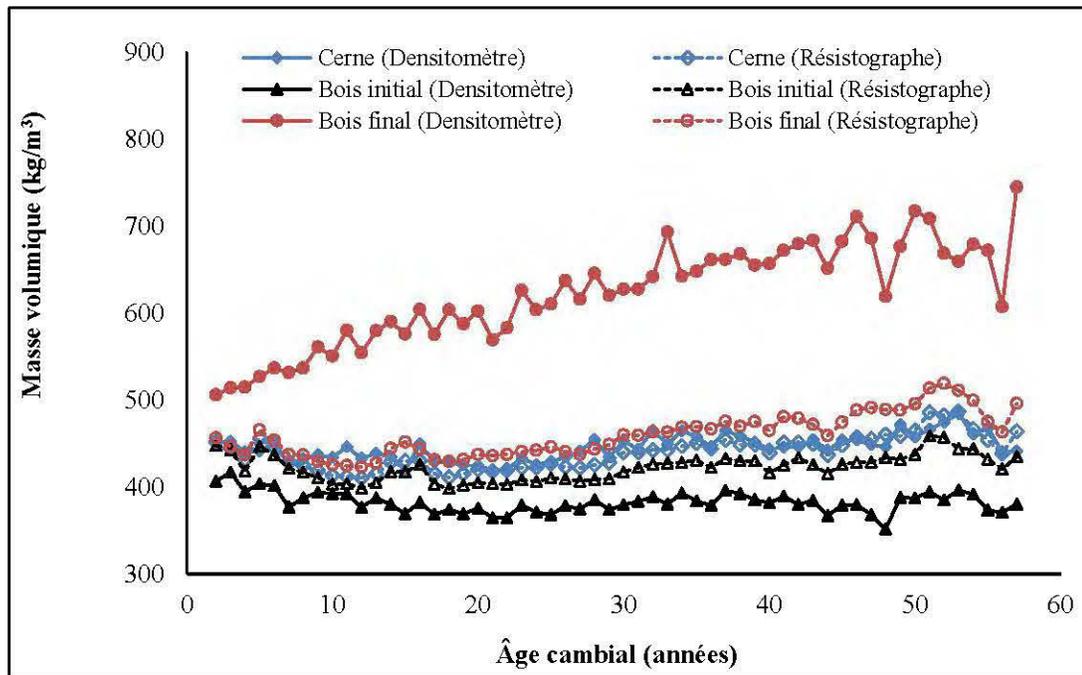


Figure 3.22 Profils des variations radiales des masses volumiques moyennes du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) mesurées par le résistographe et le densitomètre pour le sapin baumier.

#### 3.3.4.2.2 Relation entre les données de masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les résultats des régressions linéaires entre les données du résistographe et celles du densitomètre sont illustrés à la Figure 3.23. Pour la masse volumique du cerne, la pente de 0,61 indique que le résistographe surestime la masse volumique du cerne de 63% par rapport au densitomètre et le coefficient de régression linéaire de 0,63 montre que la corrélation est moyenne entre les données des deux appareils (Figure 3.23). Pour le bois initial, la pente est de 0,39 donc le résistographe surestime la masse volumique moyenne du bois initial de 150% par rapport au densitomètre, mais le coefficient de régression linéaire est de 0,25, ce qui indique que les signaux des deux appareils sont faiblement corrélés (Figure 3.23). Pour le bois final, la pente est de 1,71 ce qui indique que le résistographe sous-estime la masse volumique moyenne

du bois final de 42% par rapport au densitomètre (Figure 3.23), mais le coefficient de corrélation est de 0,53, ce qui indique que les signaux des deux appareils sont moyennement corrélés (Figure 3.23).

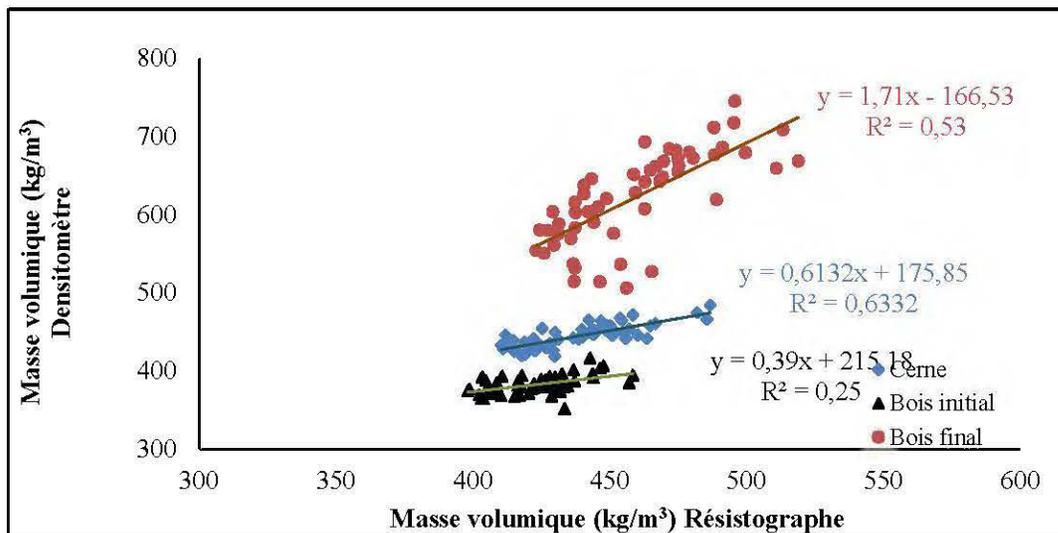


Figure 3.23 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) pour le sapin baumier

### 3.3.4.3 Contraste entre les masses volumiques extrémales

#### 3.3.4.3.1 Comparaison qualitative entre les variations radiales des masses volumiques maximale, minimale et moyenne du cerne mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les variations radiales des masses volumiques minimale et maximale sont illustrées à la Figure 3.24. La masse volumique moyenne du cerne augmentent avec l'âge cambial pour le résistographe (Figure 3.24). Pour le densitomètre, la masse volumique maximale augmente avec l'âge cambial, alors que la masse volumique minimale diminue avec l'âge cambial (Figure 3.24).

L'écart entre les masses volumiques extrémales est plus important pour le densitomètre ( $220 \text{ kg/m}^3$  en moyenne) que pour le résistographe ( $34 \text{ kg/m}^3$  en moyenne) (Figure 3.24). Donc, le résistographe sous-estime la masse volumique maximale du cerne et surestime la masse volumique minimale du cerne.

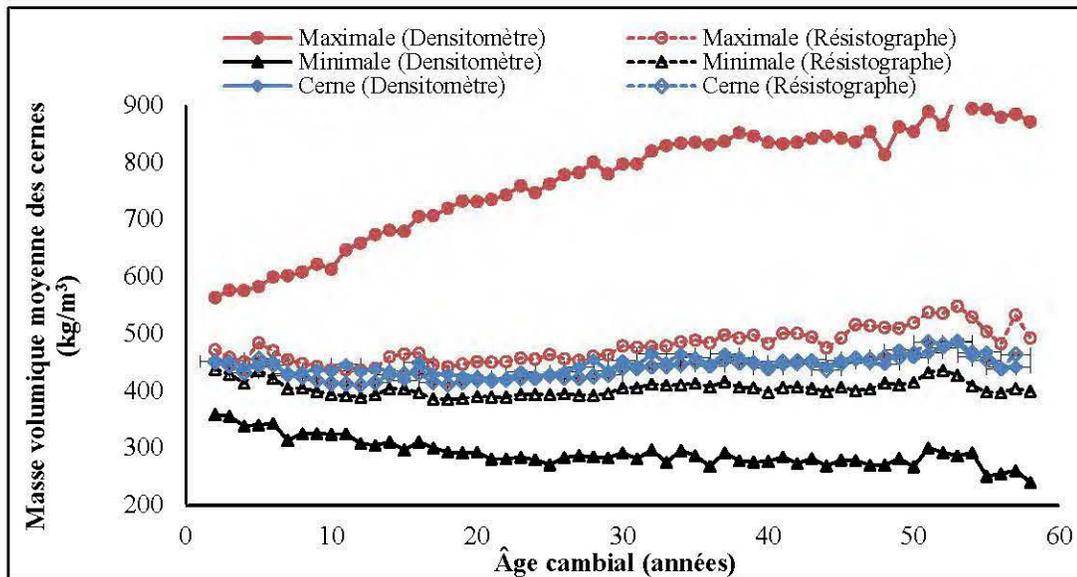


Figure 3.24 Profils des variations radiales des masses volumiques moyenne (bleu), minimale (noir) et maximale (rouge) du cerne mesurées le résistographe et le densitomètre pour le sapin baumier.

#### 3.3.4.3.2 Relation entre les données de masse volumique minimale et maximale du cerne mesurées par le densitomètre et le résistographe

Les résultats des régression linéaires entre les valeurs mesurées par le densitomètre et le résistographe pour les masses volumiques extrémales sont présentées à la Figure 3.25. Pour la masse volumique maximale, la pente de 2,56 confirme que le résistographe sous-estime cette caractéristique de 70% par rapport au densitomètre (Figure 3.25). Le coefficient de régression linéaire de 0,55 indique une corrélation moyenne entre les données du résistographe et celles du densitomètre (Figure 3.25). De même, pour la masse volumique minimale du cerne, la pente de 0,68 indique que

le résistographe surestime cette caractéristique de 45% par rapport au densitomètre et le coefficient de régression linéaire de 0,12 indique une corrélation faible.

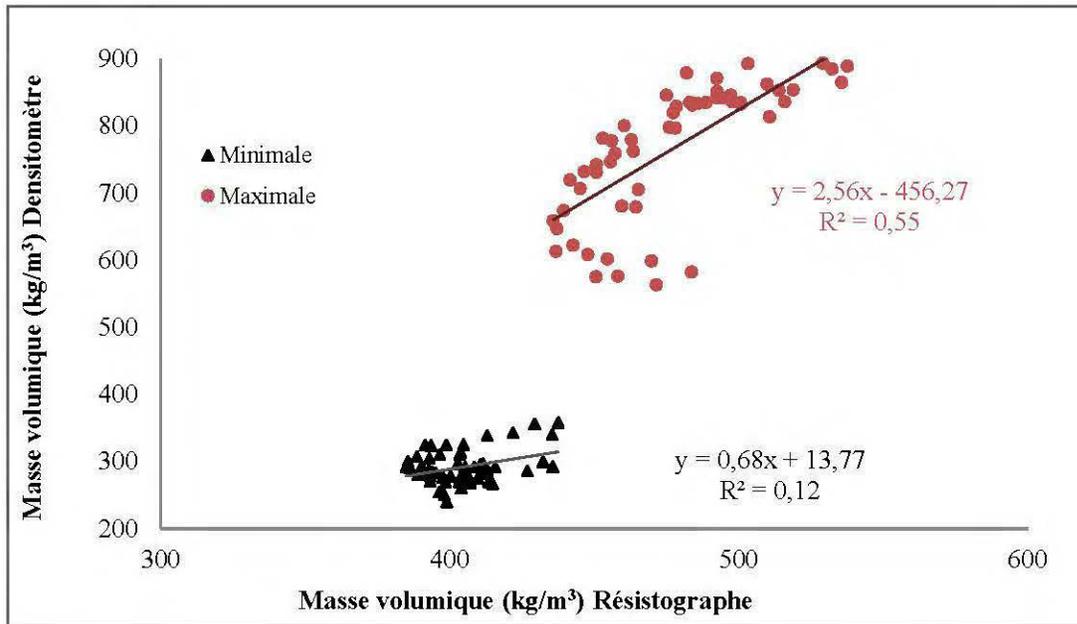


Figure 3.25 Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) pour le sapin baumier.

### 3.3.5 Toutes essences confondues

#### 3.3.5.1 Largeurs moyennes du cerne, du bois initial et du bois final

Les résultats de régression linéaire entre les données du résistographe et celles du densitomètre sont illustrées à la Figure 3.26. Ils indiquent que le résistographe se prête mieux à la mesure de la largeur moyenne du cerne qu'à l'estimation des largeurs du bois initial et du bois final (Figure 3.26). En effet, pour la régression linéaire des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour la largeur moyenne du cerne, la pente de 0,97 est proche de 1 et le coefficient de régression linéaire de 0,93 indiquent une bonne corrélation (Figure 3.26).

Pour l'estimation des largeurs du bois initial et du bois final, ces résultats sont moyens. Pour le bois initial, la pente est de 1,31, donc le résistographe sous-estime la largeur du bois initial de 30% par rapport au densitomètre (Figure 3.26) et le coefficient de régression de 0,73 indique une corrélation modérée (Figure 3.26). Pour le bois final, la pente est de 0,48, donc le résistographe surestime la largeur du bois final de 100 % par rapport au densitomètre (Figure 3.26). Le coefficient de régression linéaire de 0,31 indique une corrélation faible (Figure 3.26). Donc, la corrélation entre les données du résistographe et celles du densitomètre est suffisante pour caractériser la largeur totale du cerne, mais pas les largeurs du bois initial et du bois final.

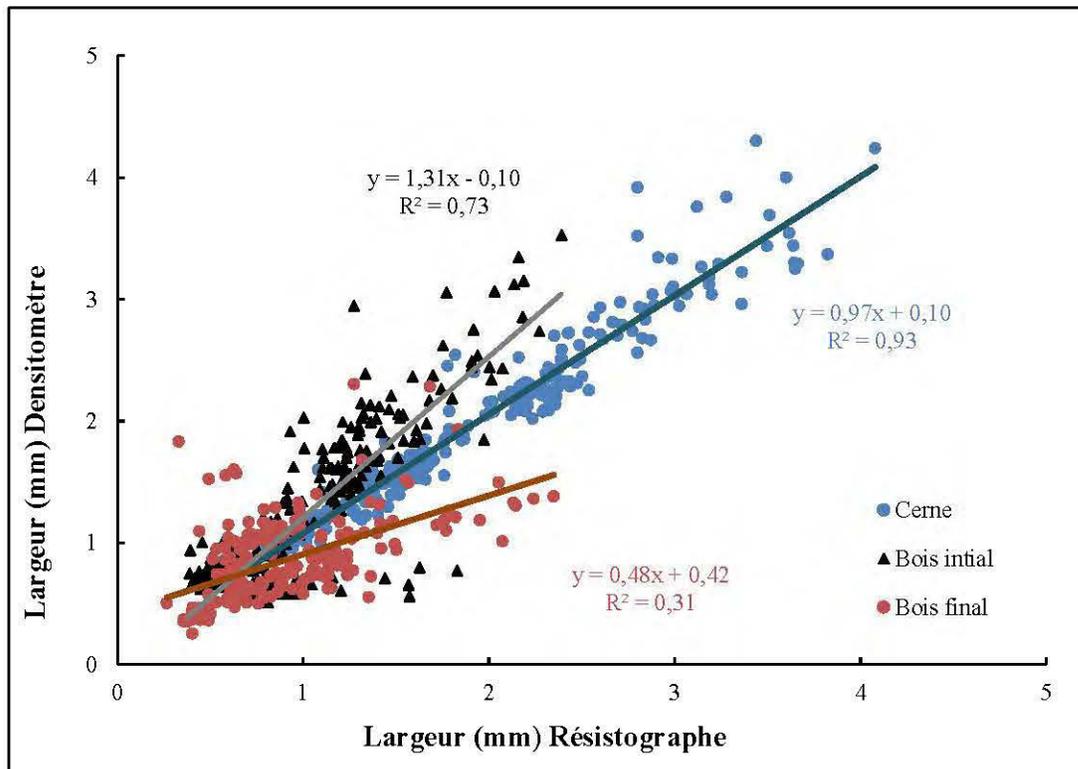


Figure 3.26 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celle du résistographe pour les largeurs du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) toutes essences confondues

### 3.3.5.2 Masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et final

Les régressions linéaires entre les données du résistographe et celles du densitomètre pour les masses volumiques moyennes du cerne, du bois initial et du bois final sont présentées à la Figure 3.27. Pour la masse volumique moyenne du cerne, la pente est de 0,84 indique que le résistographe surestime cette caractéristique de 17% par rapport au densitomètre. Le coefficient de régression linéaire de 0,85 (Figure 3.27) montre que la corrélation est forte. En comparaison la pente est de 0,51 pour le bois initial et 0,75 pour le bois final, et le coefficient de régression est de 0,56 pour le bois initial et de 0,60 pour le bois final (Figure 3.27), soit des corrélations modérées.

Donc, le résistographe estime mieux la masse volumique globale du cerne que celles du bois initial et du bois final.

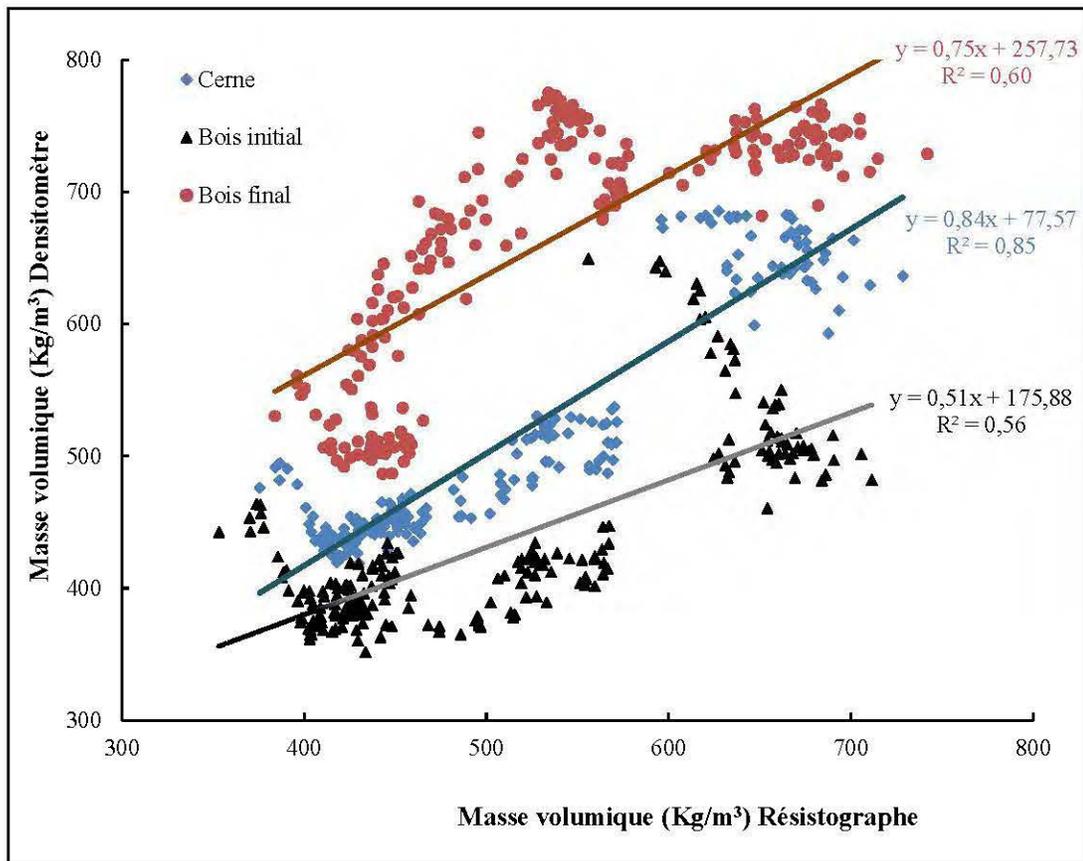


Figure 3.27 Résultats des régressions linéaires des valeurs du densitomètre sur celles du résistographe pour les masses volumiques du cerne (bleu), du bois initial (noir) et du bois final (rouge) toutes essences confondues

### 3.3.5.3 Contraste entre les masses volumiques extrêmes

Les régressions linéaires entre les données du résistographe et celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale et maximale sont illustrées à la Figure 3.28. Pour la masse volumique maximale, la pente est de 0,64 et le coefficient de régression linéaire est de 0,36, donc la corrélation est faible. De même, pour la masse volumique minimale, la pente est de 0,41 avec un coefficient de régression linéaire de 0,30 indiquant une corrélation faible.

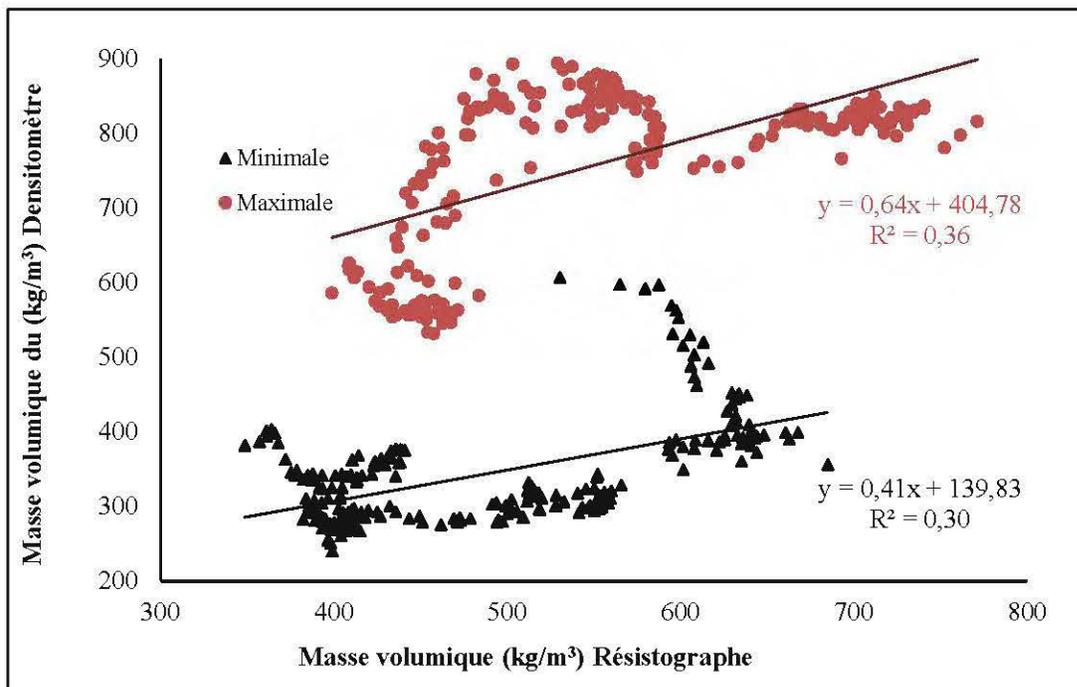


Figure 3.28 Résultats des régressions linéaires des valeurs du résistographe sur celles du densitomètre pour les masses volumiques minimale (noir) et maximale (rouge) toutes essences confondues

### 3.4 Synthèse des résultats

#### 3.4.1 Objectif 1 : calibration du résistographe (échelle macroscopique)

La calibration du résistographe à l'échelle macroscopique apporte un résultat intéressant : les mesures moyennes de résistance du bois enregistrées par le résistographe sont corrélées à 75% avec les mesures moyennes de la masse volumique mesurées par le densitomètre sur une gamme de masse volumique du bois comprise entre 360 et 700 kg/m<sup>3</sup>, mais le résistographe a tendance à sous-estimer la masse volumique du bois de 40 % par rapport au densitomètre (voir section 3.3).

#### 3.4.2 Objectif 2 : Potentiel du résistographe en microdensitométrie

##### 3.4.2.1 Caractéristiques moyennes des cernes

À l'échelle microscopique, une dichotomie apparaît entre les variations intra et intercernes. Pour la masse volumique du cerne (variations intercernes), le potentiel de mesure en microdensitométrie du résistographe n'est fiable qu'en considérant toutes les essences confondues (relation forte,  $r^2 > 0,80$ ), moyen pour le sapin baumier ( $r^2 \in [0,4-0,6[$ ) et le pin gris et faible ( $r^2 \in [0-0,4[$ ) pour le peuplier faux-tremble et le frêne noir (Tableau 3.2). Le potentiel d'utilisation du résistographe pour estimer les variations intracernes des masses volumiques du bois initial et du bois final est faible lorsque chacune des essences est considérée à part et moyen lorsque toutes les essences sont considérées ensembles (Tableau 3.2).

Le résistographe présente un bon potentiel de mesure de la largeur moyenne du cerne tant pour chaque essence considérée à part que pour toutes les essences confondues (Tableau 3.2). Pour l'estimation des largeurs du bois initial et du bois final, l'exploration du potentiel du résistographe est à approfondir pour le sapin baumier et le pin gris, pour lesquels les résultats sont les plus cohérents (pente positive égale à

1). Néanmoins, même si la corrélation est forte entre les deux appareils pour ces deux caractéristiques, le résistographe a tendance à sous-estimer la largeur du bois initial (de 20 à 40%) et à surestimer la largeur du bois final (de 40 à 150%).

Tableau 3.2 Synthèse des résultats de régression linéaire (colonne « R<sup>2</sup> ») et de la lecture des graphiques (colonne « Profils »). Les signes -, ± et + indiquent respectivement une faible, moyenne et bonne corrélation entre les profils. Le signe ≤ indique que les valeurs mesurées par le résistographe sont sous-estimées par rapport au densitomètre et ≥ qu'elles sont surestimées. Le potentiel du résistographe en microdensitométrie est décrit d'après la coloration des cases : orange, vert et bleu indiquant respectivement un faible, moyen et bon potentiel, selon les résultats présentés en section 3.3.

Essence	DENSITÉ MOYENNE						LARGEUR MOYENNE						
	Cernes		Bois initial		Bois final		Cernes		Bois initial		Bois final		
	Profil	R <sup>2</sup>	Profil	R <sup>2</sup>	Profil	R <sup>2</sup>	Profil	R <sup>2</sup>	Profil	R <sup>2</sup>	Profil	R <sup>2</sup>	
Frêne noir	±	-	- ≥	±	± ≤	- ≥	+	+	+	≥	- ≤	± ≤	- ≥
Peuplier faux-tremble	± ≤	-	± ≥	-	± ≤	-	+	+	+	≤	+ ≤	± ≥	+ ≥
Pin gris	+ ≥	± ≥	± ≥	± ≥	± ≤	- ≥	+	+	+	≤	+ ≤	+ ≥	+ ≥
Sapin Baumier	+	± ≥	+ ≥	- ≥	± ≤	± ≤	+	+	+	≤	+ ≤	- ≥	- ≥
Toutes essences		+ ≥		± ≥		± ≥		+		+		- ≥	- ≥

### 3.4.2.2 Contraste entre les masses volumiques extrêmes

Enfin, en calculant le rapport entre la masse volumique minimale et la masse volumique maximale pour chaque essence, il apparaît que ce rapport varie entre 1,09 et 1,16 pour le résistographe contre 1,58 et 2,60 pour le densitomètre (Figure 3.29). Le résistographe aurait donc tendance à sous-estimer les variations de la masse volumique du cerne.

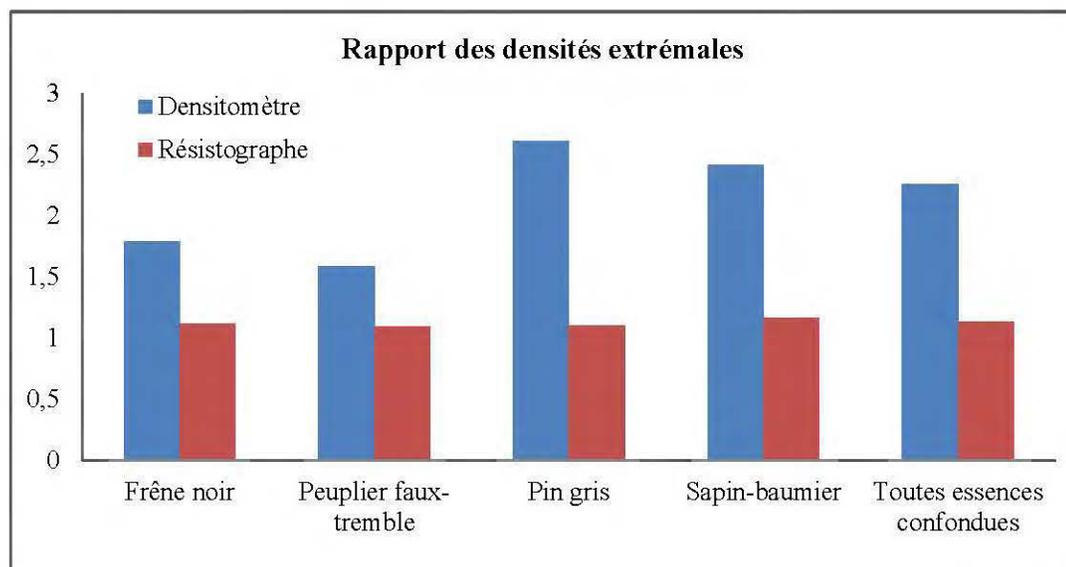


Figure 3.29 Rapport entre les masses volumiques moyenne maximale et minimale du cerne pour le frêne noir, le peuplier faux-tremble, le pin gris, le sapin baumier et toutes les essences confondues pour le densitomètre (en bleu) et le résistographe (en rouge).

### 3.5 Discussion

#### 3.5.1 Calibration du résistographe : origine des écarts de mesure pour la masse volumique moyenne entre résistographe et densitomètre

Pour les analyses à l'échelle macroscopique, les valeurs de masse volumiques du bois estimées par le résistographe sont de 40% inférieures à celles mesurées par le densitomètre. Il est cependant important de considérer que le coefficient de régression linéaire n'est que de 0,75, ce qui implique que la fonction affine associée à la régression linéaire n'explique que 75 % de la variabilité de la masse volumique moyenne de l'arbre. Néanmoins l'hypothèse 1 est vérifiée car le coefficient de régression linéaire est supérieur à 0,6 et la pente de la fonction affine est positive. Plusieurs facteurs pourraient être pris en compte pour affiner l'équation de calibration.

Tout d'abord les mesures du densitomètre sont effectuées sur des échantillons secs, tandis que pour le résistographe, le bois est à l'état vert. Or, la masse volumique du bois varie avec son humidité (Bowyer *et al.* 2005). En effet le bois en tant que matériau poreux a la capacité de se gorger d'eau (Bowyer *et al.* 2005). L'humidité d'un échantillon de bois est définie comme étant la différence entre sa masse humide et sa masse à l'état anhydre rapportée à sa masse à l'état anhydre (Bowyer *et al.* 2005; Briggs, 1994b). Elle peut donc être supérieure à 1 (Bowyer *et al.* 2005; Briggs, 1994b). La variation de densité du bois en fonction de son humidité n'est pas homogène. En effet l'absorption de l'eau est effectuée simultanément par le lumen des cellules constitutives du bois et par leurs parois cellulaires (Bowyer *et al.* 2005). Le point de saturation des fibres (PSF) définit l'état pour lequel le lumen des cellules est vide d'eau alors que les parois cellulaires en sont saturées (Bowyer *et al.* 2005). Il est communément admis que le PSF correspond à une humidité du bois de 30% (Bowyer *et al.* 2005). Lorsque l'humidité du bois est supérieure au PSF, la densité du

bois et la teneur en humidité sont positivement corrélées, alors qu'en dessous du PSF, la densité et l'humidité du bois sont négativement corrélées (Bowyer *et al.* 2005). Néanmoins Mattheck *et al.* (1997) indiquent qu'il n'y a pas de différence d'amplitude entre la résistance du bois mesurée à l'état sec et à l'état vert et ce pour différentes essences résineuses et feuillues. Dans le doute, il faudrait vérifier l'effet de l'humidité sur l'estimation de la masse volumique en comparant les courbes de calibration du résistographe lorsque les forages sont réalisés à l'état vert et à l'état sec pour les essences utilisées dans ce projet.

Un autre facteur à considérer est la présence d'extractibles dans les arbres lors des mesures effectuées par le résistographe et leur absence pour les échantillons analysés par le densitomètre. Or la présence des extractibles peut représenter 3 à 30% de la masse anhydre du bois (Bowyer *et al.* 2005), ce qui n'est pas négligeable pour ce projet puisque le frêne noir et les essences résineuses en contiennent (Royer *et al.* 2010; Zobel et Buijtenen, 1989). L'extraction de ces substances cause potentiellement une perte de 3 à 30% de la masse du bois, ce qui peut amener à une sous-estimation de la masse volumique réelle par le densitomètre. Dans cette optique, des essais pourraient être menés pour évaluer l'influence des extractibles sur la masse volumique du bois et les conséquences potentielles sur la calibration du résistographe.

Enfin, les valeurs des masses volumiques trouvées dans la littérature sont compilées d'après plusieurs centaines d'échantillons par essence récoltés dans plusieurs provinces au Canada. Or les échantillons utilisés pour ce projet proviennent d'une seule et même zone située en forêt boréale mixte. Comme indiqué dans la section méthodologie (2.1.2), la saison de croissance y est réduite, donc les cernes de croissance sont étroits, ce qui pourrait expliquer que les masses volumiques moyennes mesurées soient plus élevées que les valeurs trouvées dans la littérature.

### 3.5.2 Masse volumique moyenne du cerne

Les analyses qualitatives et quantitatives montrent que la corrélation entre les valeurs mesurées par le résistographe et celles mesurées par le densitomètre est moyenne à bonne (coefficient de régression linéaire compris entre 0,6 et 1) lorsque les essences sont étudiées séparément les unes des autres. En comparaison, la force de corrélation est meilleure lorsque toutes les essences sont considérées simultanément (coefficient de régression linéaire = 0,93), donc les hypothèses 2.1 et 2.2 sont validées pour la masse volumique moyenne du cerne. Ces résultats indiquent néanmoins que l'effort d'échantillonnage est insuffisant pour évaluer le potentiel de mesure du résistographe en microdensitométrie à l'échelle de l'essence. Il serait donc nécessaire à l'avenir de procéder avec un plus grand nombre d'échantillons par essence.

### 3.5.3 Largeurs et masses volumiques moyennes du bois initial et du bois final

#### 3.5.3.1 Biais de délimitation des zones du bois initial et du bois final, le contraste de densité ?

La largeur du bois initial mesurée par le résistographe a tendance à être moins élevée (20-40%) que celle mesurée par le densitomètre et à l'inverse la largeur du bois final (40 à 150%) a tendance à être plus élevée (Tableau 3.2). Les coefficients de régression linéaire pour les largeurs du bois initial et du bois final sont compris entre 0,041 pour le frêne noir et 0,95 pour le peuplier faux-tremble. Ceci implique que les hypothèses 2.1 et 2.2 sont invalidées pour les largeurs du bois initial et du bois final et validées pour les masses volumiques du bois initial et du bois final. Les différences d'estimations des largeurs du bois initial et du bois final entre le densitomètre et le résistographe sont inhérentes à la méthode de délimitation de ces zones qui est basée sur une méthode d'analyse de fonction. En effet, la méthode de Koubaa *et al.* (2002) utilisée pour distinguer les deux zones repose sur une analyse des variations de la masse volumique intracerne. De fait, le faible contraste mesuré par le résistographe

entre les masses volumiques maximales et minimales du cerne pourrait expliquer les différences d'estimation des caractéristiques (largeur et masse volumique) du bois initial et du bois final entre les deux appareils. En effet, si le contraste entre les masses volumiques extrémales est faible, la détection des zones du bois initial et du bois final est plus complexe et faussée. Si le contraste de masse volumique intracerne est faible, il est possible de confondre un simple bruit parasite du signal avec la transition du bois initial au bois final (Payette et Filion, 2010), comme c'est le cas pour le peuplier (Polge, 1966).

#### 3.5.3.2 Causes de la différence de contraste entre les masses volumiques extrémales.

Le contraste limité entre les masses volumiques extrémales pour le résistographe pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, le type de vascularisation pourrait avoir une influence sur le potentiel de délimitation des zones du bois initial et du bois final. En effet, en fonction du type de vascularisation la différence de masse volumique entre bois initial et bois final diffère ; elle est importante pour les résineux et les feuillus à zone initiale poreuse et limitée pour les feuillus à pores diffus pour lesquels les variations intercernes de masse volumique peuvent se confondre avec les variations intracernes (voir 1.1.2 et 1.1.4). Polge (1966) rapporte que pour les feuillus à zone initiale poreuse comme le frêne noir, la distinction des zones du bois final par densitométrie est complexe du fait de la présence irrégulière de parenchyme, de fibres et de vaisseaux, ce qui pourrait expliquer les écarts d'estimation des largeurs du bois final et du bois initial entre le résistographe et le densitomètre. Ces deux points pourraient expliquer les mauvais résultats de corrélation pour les largeurs et les masses volumiques du bois initial et du bois final pour le frêne noir, un feuillu à zone initiale poreuse et le peuplier faux-tremble, un feuillu à pores diffus. À l'échelle de l'espèce, il apparaît finalement que les estimations des largeurs et de la masse volumique du bois initial et du bois final sont les plus vraisemblables pour le sapin

baumier et le pin gris, deux essences résineuses, ce qui est cohérent avec les points trouvés dans la littérature.

Ensuite, l'effort d'échantillonnage est différent entre les deux appareils. Le diamètre du faisceau laser appliqué par le densitomètre est de 0,04 mm (Quintek Measurement Systems, Inc., 1999) tandis que l'empâtement de la mèche forant le bois est de 3 mm pour le résistographe (Rinn, 2012b; Sharapov *et al.* 2018). Ainsi la surface impactée par le laser est de 0,001256 mm<sup>2</sup> pour le densitomètre contre 7,065 mm<sup>2</sup> pour l'aiguille du résistographe. En comparaison, le diamètre des trachéides varie de 0,015 à 0,050 mm, soit une section variant de 0,0001766 à 0,001962 mm<sup>2</sup>. En parallèle, le diamètre des vaisseaux de feuillus varie de 0,025 à 0,400 mm, soit une section variant de 0,00049 à 0,0628 mm<sup>2</sup>. Ainsi, la superficie de carotte impactée par le faisceau laser peut donc contenir 7 à 0,60 trachéides et 2 à moins de 1 vaisseau alors que la section impactée par l'aiguille du résistographe peut contenir 60 à 200 trachéides et 7 à 120 vaisseaux. De fait, la mesure effectuée par le résistographe est une moyenne pour un plus grand nombre de cellules que pour le densitomètre. Il est donc possible que la variabilité de mesure observée pour le densitomètre est absorbée par le plus grand nombre de cellules touchées par le résistographe, d'où les faibles écarts observés de masse volumique entre le bois final et le bois initial et entre la masse volumique minimale et la masse volumique maximale. Ce phénomène est de plus accentué par les différences anatomiques du bois entre les essences. Les corrélations entre les valeurs du résistographe et celles du densitomètre sont les meilleures pour le pin gris, le sapin baumier et le peuplier faux-tremble. Or ces trois essences présentent une structure anatomique du bois homogène : le bois des résineux est composé de trachéides et le peuplier faux tremble présente une vascularisation à pores diffus dont le diamètre ne varie que très peu dans le cerne. Ainsi pour un point de mesure, même si le densitomètre échantillonne un plus petit nombre de cellules que le résistographe, l'homogénéité du bois implique que la mesure prise par le densitomètre est proche de celle prise par le résistographe. À l'inverse, pour le frêne

noir qui présente un bois avec des types cellulaires hétérogènes, une mesure effectuée par le laser du densitomètre peut n'échantillonner que du vide cellulaire s'il est positionné sur un vaisseau de feuillu alors que l'aiguille du résistographe impactera plusieurs cellules, donc des parois cellulaires et du vide cellulaire. Pour évaluer la différence de sensibilité entre les deux appareils en revanche, il faudrait comparer la variabilité des mesures de la masse volumique pour le même nombre de cellules interceptées par les deux appareils.

Un autre biais pourrait provenir des différences dans les modalités de mesure entre le résistographe et le densitomètre. Tout d'abord la direction selon laquelle est prise la mesure est différente pour les deux appareils. En effet, pour le densitomètre, les carottes ont été découpées de sorte que les cernes apparaissent comme sur une coupe radiale de l'arbre (Figure 3.30). Donc, les rayons X projetés par le densitomètre impactent le bois en direction longitudinale (Figure 3.30), tandis que le résistographe perce le bois selon une direction radiale. Se pourrait-il que la direction de la prise de mesure influence les valeurs et les variations de masse volumique ?

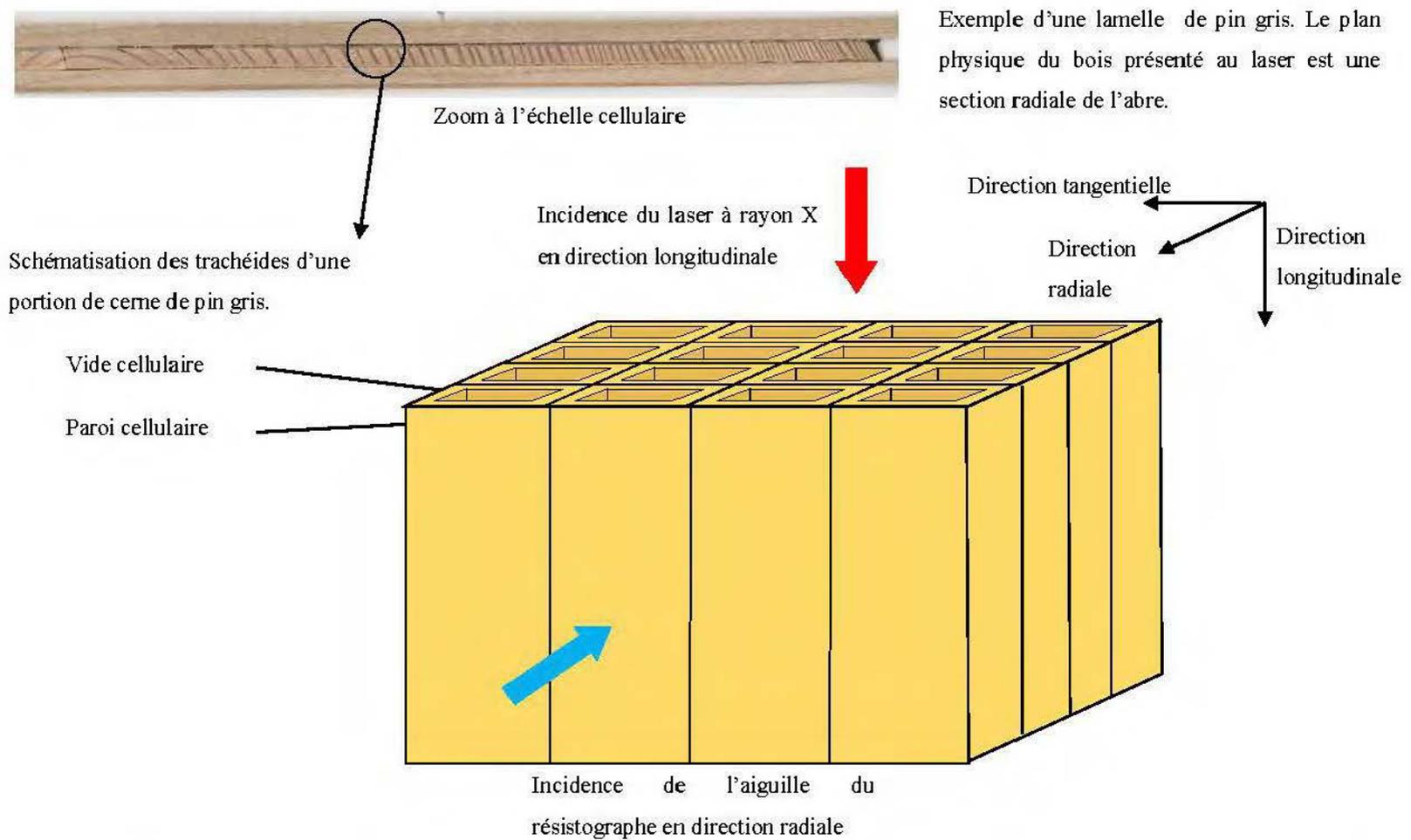


Figure 3.30 Schématisation de la direction des prises de mesure pour le densitomètre (direction longitudinale en rouge) et le résistographe (direction radiale en bleu) sur un des trachéides du pin gris (le schéma n'est pas à l'échelle).

Pour évaluer l'effet de la direction de la prise de mesure sur le contraste de la masse volumique, il suffirait d'effectuer le même travail en utilisant des lamelles effectuées sur une coupe longitudinale des carottes (Figure 3.31).

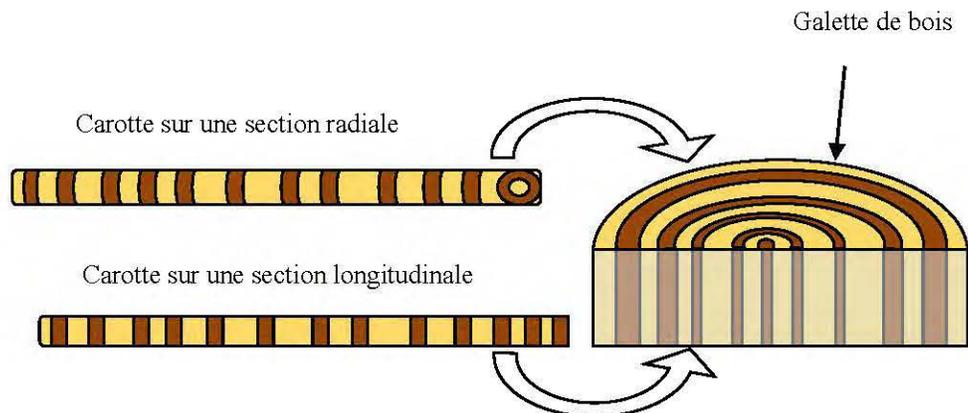


Figure 3.31 Schématisation de l'orientation des plans physiques des carottes de bois en vue d'un scan au densitomètre à rayons X

### 3.5.3.3 Stabilisation du résistographe et flexion de la mèche

Le dispositif mis en place pour stabiliser le résistographe (voir 2.2.1) n'a pas été évalué. Ukrainetz et O'Neill (2010) indiquent que la flexion de la mèche est un indicateur de la stabilité de l'opérateur. Ce phénomène peut causer un biais dans les mesures et fausser la calibration de la masse volumique et la lecture des largeurs de cernes et donc des largeurs du bois initial et du bois final. Il pourrait être intéressant d'évaluer l'efficacité du dispositif mis en place lors de l'échantillonnage, en comparant la déviation de la mèche avec et sans stabilisateur.



## CHAPITRE IV

### CONCLUSION GÉNÉRALE

La densité du bois est le dénominateur commun d'évaluation de la qualité du bois pour de nombreux domaines : sylviculture, construction, pâtes à papier, menuiserie, comptabilité du carbone et dendrochronologie. L'étude s'est intéressée à l'évaluation du potentiel du résistographe en microdensitométrie, dans le but de proposer son utilisation pour une évaluation rapide de la densité du bois à l'échelle de l'arbre et du cerne pour six essences commerciales de la forêt boréale. Le projet a été abordé suivant deux volets avec un premier objectif de calibration du résistographe par les données du densitomètre à l'échelle de l'arbre et un second objectif de validation du potentiel de mesure du résistographe en microdensitométrie.

Les résultats obtenus sont similaires à ceux trouvés dans la littérature. Tout d'abord, la calibration du résistographe à l'échelle macroscopique ou l'échelle de l'arbre affiche une pente positive de 1,55 pour un coefficient de régression linéaire de 75%. Le niveau de corrélation trouvé pour ce volet est proche des résultats trouvés dans la littérature qui varient entre 44 et 90% en fonction des études. À l'échelle microscopique (variations intra et intercernes), les résultats sont variables, dépendamment des essences et des caractéristiques des cernes considérées. De manière globale, pour le résistographe, les variations intercernes de la largeur et de la masse volumique du cerne sont mieux estimées que les variations intracernes de la

masse volumique et de la largeur du bois initial et du bois final et en particulier les résultats sont meilleurs pour le pin gris, le sapin baumier, et dans une moindre mesure pour le peuplier faux-tremble et toutes les essences confondues que pour le frêne noir. Enfin, le résultat le plus intéressant est lié aux contrastes de la masse volumique mesurés par les deux appareils. Si les valeurs des masse volumiques moyennes mesurées sont proches, il apparaît que les variations mesurées par le résistographe sont plus faibles que celles mesurées par le densitomètre, ce qui a des conséquences sur la détection de la largeur du bois initial et du bois final, puisque la méthode de calcul du point de transition de Koubaa *et al.* (2002) est inhérente au contraste de la masse volumique entre le bois initial et le bois final. Si le contraste de masse volumique peut être lié à l'essence et au type de vascularisation, l'explication la plus probante repose sur la différence d'échelle lors de la prise de mesure qui est de quelques cellules pour le densitomètre contre plusieurs centaines pour le résistographe. Il s'agit alors d'une limite de l'appareil qui rend délicat l'utilisation du résistographe seul pour effectuer des études de microdensitométrie.

Néanmoins les résultats apportés par cette étude permettent d'encourager les efforts de calibration et de validation du résistographe en microdensitométrie pour les essences à bois homogène soient principalement les résineux soient le pin gris et le sapin baumier et dans une moindre mesure pour le peuplier faux-tremble à l'échelle de l'arbre et à l'échelle des cernes. Si le niveau de corrélation n'est pas pour effectuer des mesures de la masse volumique par le résistographe, il permet d'orienter de nouveaux axes de recherche pour améliorer la calibration: augmenter le nombre d'échantillons et de sites par essence, comparer les mesures de la masse volumique du résistographe pour différents taux d'humidité des échantillons et éventuellement évaluer l'effet du dispositif de stabilisation. Enfin, dans le contexte plus large des projets de dendrochronologie ou d'évaluation de la qualité du bois en forêt boréale, il serait envisageable d'utiliser des carottes de bois comme références à coupler avec les profils du résistographe. Ce processus permettrait de travailler sur un plus grand

nombre d'échantillons qu'en utilisant uniquement des carottes de bois, et en cas de doute, il serait possible de se référer aux vrais profils de variation radiale de la masse volumique sur ces carottes de bois qui serviraient de référence.



## BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- Acuña, L., Basterra, L.A., Casado, M.M., López, G., Ramón-Cueto, G., Relea, E., Martínez, C., González, A., 2011. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species. *Materiales de Construcción* 61, p. 451–464.
- Ait Si Said, Z., 2017. Effet des coupes partielles sur la largeur des cernes, la masse volumique du bois et les propriétés anatomiques des trachéides de l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss) dans un peuplement mixte, mémoire de maîtrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda.
- Alemdag I.S., 1985. Variation de la masse volumique du bois de 28 essences forestières poussant en Ontario - Rapport d'information PI-X-45-F. Institut forestier nationale de Petawawa - Service canadien des forêts - Agriculture Canada. 0-662-930000-2, <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/4520.pdf>
- Arend, M. et Fromm, J., 2007. Seasonal change in the drought response of wood cell development in poplar. *Tree Physiology* 27, p. 985–992. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.985>
- Argus electronic gmbh, 2016. PiCUS Sonic Tomograph / Products / Tree inspection technology / argus electronic gmbh , site web. <http://www.argus-electronic.de/en/tree-inspection-technology/products/picus-sonic-tomograph> (accessed 7.1.16).
- Astrade, L. et Miramont, C. 2010. Panorama de la Dendrochronologie en France, Edytem.
- Bannan, M.W., 1954. Ring Width, Tracheid Size, and Ray Volume in Stem Wood of *Thuja Occidentalis* L. *Canadian Journal of Botany*. 32, p. 466–479. <https://doi.org/10.1139/b54-042>

- Bao, F.C., Jiang, Z.H., Jiang, X.M., Lu, X.X., Luo, X.Q., Zhang, S.Y., 2001. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology* 35, p.363–375. <https://doi.org/10.1007/s002260100099>
- Barbour, R.J., Fayle, D.C.F., Chauret, G., Cook, J., Karsh, M.B., 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, p.2439–2447. <https://doi.org/10.1139/x94-315>
- Beaulieu, J., Plourde, A., Daoust, G., Lamontagne, L., 1996. Genetic variation in juvenile growth of *Pinus strobus* in replicated Quebec provenance-progeny tests. *Forest Genetics* 3, p.103–112.
- Beaulieu, J. et Bousquet, J. 2010. Chapitre 6 Facteurs génétiques affectant la variabilité des cernes annues chez les espèces arborescentes nordiques, dans: *La Dendroécologie*. Presse de l'Université Laval, 758 p.
- Begum, S., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Oribe, Y., Funada, R., 2013. Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees. *Physiologia Plantarum* 147, p. 46–54. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01663.x>
- Bergeron, Y. and Charron, D. 1994. Past, Current and Future Fire Frequency in the Canadian Boreal Forest: A dendroecological approach. *Ecoscience* 1, p. 173–184.
- Bertolini Cestari, C., Lombardi, C., Gubetti, E., Pignatelli, O., 2002. Arsenal Project – the timber roof of tesone “111”: technological characteristics, dating and assessment of thermo-hygrometric behavior for a restored functionality proposal. *Journal of Cultural Heritage* 3, p. 53–57. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01155-X](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01155-X)
- Blouin, J., Berger, J.P. et Gosselin, J. 2002. Guide de reconnaissance des types écologiques - Région écologique 5a (Plaine de l'Abitibi), Ministère des Ressources naturelles du Québec, Forêt Québec, Direction des inventaires

forestiers, Direction des inventaires forestiers, Division de la classification écologique et productivité des stations.

- Bouffier, L., Charlot, C., Raffin, A., Rozenberg, P., Kremer, A., 2008. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) *Annals of Forest Science* 65, 106–106 p. <https://doi.org/10.1051/forest:2007078>
- Boulouf Lugo, J., Deslauriers, A., Rossi, S., 2012. Duration of xylogenesis in black spruce lengthened between 1950 and 2010. *Annals of Botany* 110, p. 1099–1108. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs175>
- Bouriaud, O., Bréda, N., Dupouey, J.-L., Granier, A., 2005. Is ring width a reliable proxy for stem-biomass increment? A case study in European beech. *Canadian Journal of Forest Research*. 35, p. 2920–2933. <https://doi.org/10.1139/x05-202>
- Bowyer, J.L., Shmulsky, R., Haygreen, J.G., 2005. *Le bois et ses usages*. Centre collégial de développement de matériel didactique, Montréal.
- Briggs, D.G., 1994a. Chapitre 8. Pulp and Paper, dans: *Forest Products Measurements and Conversion Factors: With Special Emphasis on the U.S. Pacific Northwest*, University of Washington, Institute of Forest Resources.
- Briggs, D.G., 1994b. Chapitre 1. Basic Wood Properties, dans: *Forest Products Measurements and Conversion Factors: With Special Emphasis on the U.S. Pacific Northwest*, University of Washington. Institute of Forest Resources.
- Brouard, J., 2018. Wood density and growth in clonally propagated aspen. *Canadian Journal of Forest Research*, 49, p. 640-646. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0297>
- Bucur, V., 2006. *Acoustics of Wood*, 2nd edition, Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

- Cacères Cuadros, D. 2016. Influence de la qualité du bois sur les dimensions des copeaux produits par une équarrisseuse-fragmenteuse, Mémoire de Thèse, Université Laval, Québec, QC, Canada, 204 p.
- Catesson, A.-M. et Lachaud, S., 1993. Le cambium, structure, fonctionnement et contrôle de l'activité saisonnière. *Acta Botanica Gallica* 140, p. 337–350. <https://doi.org/10.1080/12538078.1993.10515605>
- Centre de recherche industrielle du Québec, Québec (Province), 2002. Profil des produits forestiers: première transformation: bois de sciage de feuillus durs: rapport présenté au Ministère des ressources naturelles. Ministère des ressources naturelles, Québec.
- Chen, Z.-Q., Karlsson, B., Lundqvist, S.-O., García Gil, M.R., Olsson, L., Wu, H.X., 2015. Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce. *Annals of Forest Science* 72, p. 499–508. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0458-9>
- Clair, B. and Thibaut, B., 2014. Physical and Mechanical Properties of Reaction Wood, dans: Gardiner, B., Barnett, J., Saranpää, P., Gril, J. (2014), *The Biology of Reaction Wood*, Springer Series in Wood Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p. 171–200.
- Cown, D., 1978. Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *New Zealand journal of forestry science*, 8, 384-391
- [https://www.researchgate.net/profile/David\\_Cown/publication/257408721\\_Comparison\\_of\\_the\\_pilodyn\\_and\\_torsionmeter\\_methods\\_for\\_the\\_rapid\\_assessment\\_of\\_wood\\_density\\_in\\_living\\_trees/links/0c96052532aecdb08b000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/David_Cown/publication/257408721_Comparison_of_the_pilodyn_and_torsionmeter_methods_for_the_rapid_assessment_of_wood_density_in_living_trees/links/0c96052532aecdb08b000000.pdf)
- Denneler, B., 2004. Étude dendroécologique des peuplements riverains de cèdre blanc (*Thuja Occidentalis* L.) dans la région de la forêt boréale mixte de l'Ouest du Québec, Mémoire de Thèse. Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, Rouyn-Noranda, 192 p.

- Dickmann, D. I., Isebrands, J. G., Eckenwalder, J. E., & Richardson, J. (Eds.). (2002). *Poplar culture in north America*. NRC Research Press. 397 p.
- Dutilleul, P., Herman, M., Avella-Shaw, T., 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). *Canadian Journal of Forest Research* 28, p. 56–68. <https://doi.org/10.1139/x97-189>
- Boureau, E. Déglise, X. Borredon, M.-E. Vaca-Garcia, C. 2016. Masse volumique. *Encyclopaedia Universalis*, site web, consulté le 12/03/2019. <https://www.universalis.fr/recherche/q/masse%20volumique/>
- Eilmann, B., Zweifel, R., Buchmann, N., Pannatier, E.G., Rigling, A., 2011. Drought alters timing, quantity, and quality of wood formation in Scots pine. *Journal of Experimental Botany*, 62, p. 2763-2771. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq443>
- Environnement et Changement climatique Canada, 2013. Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 - Climat - Environnement et Changement climatique Canada, site web, [http://climate.weather.gc.ca/climate\\_normals/results\\_1981\\_2010\\_f.html?searchType=stnProv&lstProvince=QC&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5988&dispBack=0](http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?searchType=stnProv&lstProvince=QC&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5988&dispBack=0), consulté le 05/03/19.
- Fang, Y., Lin, L., Feng, H., Lu, Z., Emms, G.W., 2017. Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products. *Computers and Electronics in Agriculture* 137, p. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.015>
- Fritts, H.C., 1962. The Relation of Growth Ring Widths in American Beech and White Oak to Variations in Climate. *Tree-Ring Bulletin*. p. 2-10.
- Gallo, R., Pantuza, I.B., Santos, G.A. dos, Resende, M.D.V. de, Xavier, A., Simiqueli, G.F., Baldin, T., Santos, O.P. dos, Valente, B.M. dos R.T., 2018. Growth and wood quality traits in the genetic selection of potential Eucalyptus

- dunnii Maiden clones for pulp production. *Industrial Crops and Products* 123, p. 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.016>
- Gao, S., Wang, X., Wiemann, M.C., Brashaw, B.K., 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 p. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0623-4>
- Gilbert, E.A., Smiley, E.T., 2004. Picus Sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus Alba*) and Hickory (*Carya* spp.). *Journal of Arboriculture* 30, p. 277-281
- Gonzalez, J.S., 1990. Wood density of Canadian tree species. ISBN:978-0-662-18084-5. <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=11744>
- Grabner, M., Wimmer, R., Gierlinger, N., Evans, R., Downes, G., 2005. Heartwood extractives in larch and effects on X-ray densitometry. *Canadian Journal of Forest Research* 35, p. 2781-2786. <https://doi.org/10.1139/x05-196>
- Graumlich, L.J., Brubaker, L.B., 1986. Reconstruction of annual temperature (1590–1979) for Longmire, Washington, derived from tree rings. *Quaternary Research* 25, p. 223–234. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(86\)90059-1](https://doi.org/10.1016/0033-5894(86)90059-1)
- Greaves, B.L., Borralho, N.M.G., Raymond, C.A., Farrington, A., 1996. Use of a Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research* 26, p. 1643–1650. <https://doi.org/10.1139/x26-185>
- Guller, B., Guller, A., Kazaz, G., 2012. Is resistograph an appropriate tool for the annual ring measurement of *Pinus brutia*. *NDE for Safety/DEFEKOSKOPIE* 2012, p. 89–94.
- Guller, Guller, Kazaz, 2012. RESISTOGRAPH and X-Ray Density Charts of Wood. Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 50, p. 303-311.

- Hackenberg, J., Wassenberg, M., Spiecker, H., Sun, D., 2015. Non Destructive Method for Biomass Prediction Combining TLS Derived Tree Volume and Wood Density. *Forests* 6, p. 1274–1300. <https://doi.org/10.3390/f6041274>
- Hart, J.F., 2010. A review of the effects of silviculture on wood quality. <https://doi.org/10.14288/1.0103111>
- Harvey, B., Leduc, A., 2009. Plan général d'aménagement de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet, Rouyn-Noranda. <http://ferld.uqat.ca/pgaf/PlanAmenagement96-02.pdf>
- Hoffmeyer, P. The Pilodyn instrument as a non-destructive tester of the shock resistance of wood. In : 4th symposium on the non-destructive testing of wood: proceedings, Washington State University, 1978, p. 47-66.
- Housset, J.M., Carcaillet, C., Girardin, M.P., Xu, H., Tremblay, F., Bergeron, Y., 2016. In situ Comparison of Tree-Ring Responses to Climate and Population Genetics: The Need to Control for Local Climate and Site Variables. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4, 123 p. <https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00123>
- Housset, J.M., Nadeau, S., Isabel, N., Depardieu, C., Duchesne, I., Lenz, P., Girardin, M.P., 2018. Tree rings provide a new class of phenotypes for genetic associations that foster insights into adaptation of conifers to climate change. *New Phytologist* 218, p. 630–645. <https://doi.org/10.1111/nph.14968>
- Huang, J.-G., Tardif, J., Denneler, B., Bergeron, Y., Berninger, F., 2008. Tree-ring evidence extends the historic northern range limit of severe defoliation by insects in the aspen stands of western Quebec, *Canadian Journal of Forest Research*, 38, p. 2535–2544. <https://doi.org/10.1139/X08-080>
- Huber, F., 1984. Influence du froid, de la lumière et du stress hydrique sur la formation du bois de hêtre. *Annales des Sciences Forestières* 41, p.323–334.
- [https://www.afs-journal.org/articles/forest/pdf/1984/03/AFS\\_0003-4312\\_1984\\_41\\_3\\_ART0004.pdf](https://www.afs-journal.org/articles/forest/pdf/1984/03/AFS_0003-4312_1984_41_3_ART0004.pdf)

- Huber, F., 2011. Les différents aspects du bois, Cours en ligne, Institut National de la Recherche Agronomique, INRA Nancy, <https://fr.slideshare.net/cussenot/aspectsdubois-1912da2>, (Consulté le 15-03-2019)
- Huda, A., 2014. Variation des propriétés anatomiques, physiques et mécaniques du bois de clones de peuplier hybride, mémoire de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, 260 p.
- Innes, J.L., Cook, E.R., 1989. Tree-ring analysis as an aid to evaluating the effects of pollution on tree growth. *Canadian Journal of Forest Research* 19, p. 1174–1189. <https://doi.org/10.1139/x89-177>
- Isik, F., 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, p.2426–2435. <https://doi.org/10.1139/x03-176>
- Jacquot, C., 2009. Contribution à l'étude des facteurs déterminant le cycle d'activité du cambium chez quelques arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 11, p.605-610. <https://doi.org/10.4267/2042/27723>
- Jessome, A. P. 1977 Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada. Laboratoire des produits forestiers de l'Est, Forintek Canada Corp. Sainte-Foy, Québec. 37 p.
- Kaestner, A., Niemz, P., 2004. Non-destructive methods to detect decay in trees. *Wood Research* 49, p.17–28.
- Kahl, T., Wirth, C., Mund, M., Böhnisch, G., Schulze, E.-D., 2009. Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. *European journal of forest research* 128, p.467–473.

- Kebbi-Benkeder, Z., Dumarçay, S., Touahri, N., Manso, R., Gérardin, P., Colin, F., 2016. Knotwood – A Little Known Yet Valuable Source of Extractable Compounds. *Revue Forestière Française* 68, p.1–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.4267/2042/61591>
- Kersten, W., Schwarze, F.W.M.R., 2005. Development of Decay in the Sapwood of Trees Wounded by the Use of Decay Detecting Devices. *Arboricultural Journal* 28, 3, p.165–181. <https://doi.org/10.1080/03071375.2005.9747417>
- Koga, S., Zhang, S.Y., Bégin, J., 2007. Effects of Precommercial Thinning on Annual Radial Growth and Wood Density in Balsam Fir ( *Abies balsamea* ). *Wood and Fiber Science* 34, p.625–642.
- Kollmann, F.F.P., 1968. Physics of Wood, dans: Kollmann, F.F.P., Côté, W.A., Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p. 160–291.
- Koubaa, A., Zhang, S.Y.T., 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, p. 511–518. <https://doi.org/10.1051/forest:2002035>
- Kraler, Beikircher, Zingerle, 2012. Suitability of drill resistance measurements for dendrochronological determination. Presented at the World Conference on Timber engineering, New Zealand timber design society, Auckland.
- Kriebel, et. al., 1976. Geographic variation in *Quercus Rubra* in North Central United States plantations. *Silvae Genetica* 25, p. 118–122.
- Latutrie, M., Bergeron, Y., Tremblay, F., 2016. Fine-scale assessment of genetic diversity of trembling aspen in northwestern North America. *BMC Evolutionary Biology* 16, 231p. <https://doi.org/10.1186/s12862-016-0810-1>
- Lebourgeois, F., Merian, P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. LERFOB-ENGREF,Nancy. 85 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01627048/document>

- Leonelli, G., Denneler, B., Bergeron, Y., 2008. Climate sensitivity of trembling aspen radial growth along a productivity gradient in northeastern British Columbia, Canada. *Canadian of Forest Research* 38, p. 1211–1222. <https://doi.org/10.1139/X07-227>
- Locosselli, G.M., 2018. The cambium activity in a changing world. *Trees* 32, p. 1–2. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1616-5>
- Lukaszkiwicz, J., Kosmala, M., Chrapka, M., 2005. Determining the age of streetside *Tilia cordata* trees with a DBH-based model. *Journal of Arboriculture*, 31, 280p.
- Mäkinen, H., Hallaksela, A.-M., Isomäki, A., 2007. Increment and decay in Norway spruce and Scots pine after artificial logging damage. *Canadian Journal of Forest Research* 37, p.2130–2141. <https://doi.org/10.1139/X07-087>
- Martin-Benito, D., Beeckman, H., Cañellas, I., 2013. Influence of drought on tree rings and tracheid features of *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a mesic Mediterranean forest. *European Journal of Forest Research* 132, p. 33–45. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0652-3>
- Mattheck, C., Bethge, K., Albrecht, W., 1997. How to Read the Results of Resistograph M. *Arboricultural Journal* 21, p. 331–346. <https://doi.org/10.1080/03071375.1997.9747179>
- McLaughlin, D., 1998. A decade of forest tree monitoring in Canada: evidence of air pollution effects. *Environmental Reviews* 6, p. 151–171. <https://doi.org/10.1139/a98-008>
- Mer, M.É., 1892. Sur les Causes De Variation De La Densité Des Bois. *Bulletin de la Société Botanique de France* 39, p 95–105. <https://doi.org/10.1080/00378941.1892.10828623>

- Ministère de la Faune, des Forêts et de Parcs, 2014. Essences commerciales, page web.  
<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/essence.php?e=commerciale> (Consulté le 25-02-2018).
- Morel, G., 1960. Physiologie du cambium. Bulletin de la Société Botanique de France 107, p. 50–61. <https://doi.org/10.1080/00378941.1960.10837970>
- Nepveu, G. Variabilité clonale de l'infradensité chez *Quercus petraea* Premiers résultats obtenus sur boutures d'un an. Annales des Sciences Forestières. EDP Sciences, 1982. p. 151-164.
- Ols, C., Hofgaard, A., Bergeron, Y., Drobyshev, I., 2016. Previous growing season climate controls the occurrence of black spruce growth anomalies in boreal forests of Eastern Canada. Canadian Journal of Forest Research 46, p. 696–705. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0404>
- Palaia, L., Monfort, J., Sánchez, R., Gil, L., Álvarez, A., López, V., Tormo, S., Pérez, C., Navarro, P., 2008. Assessment of timber structures in service, by using combined methods of non-destructive testing together with traditional ones. ART2008, The e-Journal & Exhibition of Nondestructive Testing. PMCid: PMC2643848.
- Payette, S., Filion, L., 2010. La dendroécologie. Principes, méthodes et applications Presse de l'Université Laval. éditions du Québec, QC, Canada. 772 p.
- Pliura, A., Zhang, S.Y., MacKay, J., Bousquet, J., 2007. Genotypic variation in wood density and growth traits of poplar hybrids at four clonal trials. Forest Ecology and Management 238, p. 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.082>
- Polge, H., 1977. The use of wood density measurements in dendrochronology and dendroclimatology. Advantages and disadvantages. Revue Forestière Française 29, p. 421–433. <https://doi.org/10.4267/2042/21163>
- Polge, H., 1963. Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois - L'analyse densitométrique de clichés radiographiques. Annales de l'école

nationale des eaux et forêts de la station de recherches et expériences 20, p. 531–581.

- Polge, H., 1975. Etude préliminaire de l'influence de la fertilisation sur la qualité du bois de chêne. *Revue Forestière Française*, 23, p. 201-208. [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/20937/RFF\\_1975\\_3\\_2\\_01.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/20937/RFF_1975_3_2_01.pdf?sequence=1), (Consulté le 06-03-2018)
- Polge, H., 1969. Influence de la fertilisation sur la qualité du bois de Pin maritime. *Annales des Sciences Forestières* 26, p. 45–64. <https://doi.org/10.1051/forest/19690102>
- Polge, H., 1966. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants : applications dans les domaines Technologique et Physiologique. *Annales des Sciences Forestières* 23, p. 1–206. <https://doi.org/10.1051/forest/19660101>
- Polge, H., 1962. Recherches sur l'utilisation de prélèvements effectués à la tarière de Pressler pour l'étude des propriétés physiques et mécaniques des bois. *Revue Forestière Française*, 10, p. 835-853. [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/24416/RFF\\_1962\\_10\\_835.pdf](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/24416/RFF_1962_10_835.pdf)
- Polge, H. et Garros, S. Influence de défoliations sur la structure du bois de pin maritime. *Annales des Sciences Forestières*. EDP Sciences, 1971. p. 195-206.
- Polge, H., Keller, C., 1970. Première appréciation de la qualité du bois en forêt par utilisation d'un torsiomètre. *Annales des Sciences Forestières* 27, p. 197–223. <https://doi.org/10.1051/forest/19700204>
- Polge, H., Keller, R., 1973. Qualité du bois et largeur d'accroissements en forêt Tronçais. *Annales des Sciences Forestières* 30, p. 91–125. <https://doi.org/10.1051/forest/19730201>

- Polge, H., Keller, R., 1969. La Xylochronologie, perfectionnement logique de la Dendrochronologie. *Annales des Sciences Forestières*. 26, p. 225–256. <https://doi.org/10.1051/forest/19690203>
- Pollet, C., Henin, J.-M., Hebert, J., Jourez, B., 2018. Impact de la vitesse de croissance sur les propriétés technologiques du bois de douglas. *Forêt Wallonne*. p. 60-72. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/226510>
- QMS (1999) QMS tree ring analyzer users guide model QTRS-01X. Quintek Measurement Systems, Knoxville, Tennessee. 72p.
- Rimm, F., 2012a. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. *Holztechnologie* 53, p. 24–29.
- Rimm, F., 2012b. Basics of typical resistance-drilling profiles. *Western Arborist*, 17, p. 30–36.
- Rimm, F., Schweingruber, F.-H., Schär, 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 - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood* 50, p. 303–311. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.4.303>
- Rinntech, 2016. RINNTECH - Technology for tree and wood analysis - RESISTOGRAPH®, document web, Rinntech technology for tree and wood analysis. <http://www.rinntech.de/content/view/8/34/lang,english/index.html>, (Consulté le 15-11-2016)
- Rinntech, 2015. Resistograph® Serie 6 Manual User, Technology and know-how for inspecting trees and forests, timber and structures, wood and tree-rings, Rinntech e.k., Heidelberg, Germany.15p.
- Royer, M., Houde, R., Stevanovic, T., 2010. Potentiel de développement lié aux extractibles forestiers : état des connaissances et revue des marchés. Université du Laval, Centre de recherche sur le bois.

- Ruelle, J.C., 2016. Chapitre IV : La structure du bois influence les propriétés du matériau page web, Woodnat. AgroParisTech, Université des Sciences et du Vivant, <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/woodnat/document/chapitre4-2.html>
- Rzem, F., 2018. 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 mariana*, Mill. B. s. p.) à l'échelle des peuplements. Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, Rouyn-Noranda, IRF, Mémoire de maîtrise, 119 p.
- Savva, Y., Koubaa, A., Tremblay, F., Bergeron, Y., 2010. Effects of radial growth, tree age, climate, and seed origin on wood density of diverse jack pine populations. *Trees* 24, p 53–65. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0378-0>
- Seco, J.I.F.-G., Barra, M.R.D., 1996. Growth rate as a predictor of density and mechanical quality of sawn timber from fast growing species. *Holz als Roh- und Werkstoff* 54, p 171–174. <https://doi.org/10.1007/s001070050161>
- Sharapov, E., Wang, X., Smirnova, E., Wacker, J.P., 2018. Wear behavior of drill bits in wood drilling resistance measurements. *Wood and Fiber Science*. 50, 154–66.
- Stokes, Smiley, 1996. An introduction to Tree-ring dating, The university of Arizona Press. ed. The university of Arizona Press, Tucson, Arizona 85721., 73p.
- Sutton, A., Tardif, J.C., 2007. Dendrochronological reconstruction of forest tent caterpillar outbreaks in time and space, western Manitoba, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 9, p. 1643–1657. <https://doi.org/10.1139/X07-021>
- Szewczyk, G., Wąsik, R., Leszczyński, K., Podlaski, R., 2018. Age estimation of different tree species using a special kind of an electrically recording resistance drill. *Urban Forestry & Urban Greening* 34, p. 249–253. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.010>

- Tardif, J.C., Conciatori, F., 2006. Influence of climate on tree rings and vessel features in red oak and white oak growing near their northern distribution limit, southwestern Quebec, Canada. *Canadian of Forest Research* 36, p. 2317–2330. <https://doi.org/10.1139/x06-133>
- Toïgo, M., Vallet, P., Tuilleras, V., Lebourgeois, F., Rozenberg, P., Perret, S., Courbaud, B., Perot, T., 2015. Species mixture increases the effect of drought on tree ring density, but not on ring width, in *Quercus petraea*–*Pinus sylvestris* stands. *Forest Ecology and Management* 345, p. 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.019>
- Tremblay, S., Périé, C., Ouimet, R., 2006. Changes in organic carbon storage in a 50 year white spruce plantation chronosequence established on fallow land in Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 36, p. 2713–2723. <https://doi.org/10.1139/x06-076>
- Trouy, M.C., 2015. Anatomie du bois: formation, fonctions et identification, Quae, Synthèses. Quae, Versailles. 151 p.
- Ukrainetz, N.K., O'Neill, G.A., 2010. An analysis of sensitivities contributing measurement error to Resistograph values. *Canadian Journal of Forest Research* 40, p. 806–811. <https://doi.org/10.1139/X10-019>
- Wang, X., Ross, R.J., McClellan, M., Barbour, R.J., Erickson, J.R., Forsman, J.W., McGinnis, G.D., 2007. Nondestructive Evaluation of Standing Trees With a Stress Wave Method. *Wood and Fiber Science* 33, p. 522–533.
- Wassenberg, M., Chiu, H.-S., Guo, W., Spiecker, H., 2015. Analysis of wood density profiles of tree stems: incorporating vertical variations to optimize wood sampling strategies for density and biomass estimations. *Trees* 29, p. 551–561. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1134-7>
- Wheeler, E.A. Inside Wood—A web resource for hardwood anatomy. *Iawa Journal*, 2011, 32, p. 199-211. <https://insidewood.lib.ncsu.edu/welcome>

- Wessels, C.B., Malan, F.S., Rypstra, T., 2011. A review of measurement methods used on standing trees for the prediction of some mechanical properties of timber. *European Journal of Forest Research* 130, p. 881–893. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0484-6>
- Yu, Q., Pulkkinen, P., Rautio, M., Haapanen, M., Alén, R., Stener, L.G., Beuker, E., Tigerstedt, P.M., 2001. Genetic control of wood physicochemical properties, growth, and phenology in hybrid aspen clones. *Canadian Journal of Forest Research*. 31, p. 1348–1356. <https://doi.org/10.1139/x01-066>
- Zhang, S.Y., Chauret, G., Swift, D.E., Duchesne, I., 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 36, p. 945–952. <https://doi.org/10.1139/x05-307>
- Zhang, S.Y., Koubaa, A. 2009. Les résineux de l'Est du Canada - Ecologie forestière, caractéristiques, transformation et usages, FPInnovations, Publication Spéciale SP.-526F, 400 p.
- Zobel, B.J., Buijtenen, J.P. van, 1989. *Wood Variation: Its Causes and Control*, Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 363p.