

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

CARACTÉRISATION NON DESTRUCTIVE DE LA PROPORTION DE CARIE ET  
DU MODULE D'ÉLASTICITÉ DU BOIS D'ÉRABLE À SUCRE PAR  
TOMOGRAPHIE ACOUSTIQUE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

ACHRAF AMMAR

AOÛT 2022

## REMERCIEMENTS

Le devoir de reconnaissance m'invite d'exprimer mes remerciements les plus sincères et mes appréciations à mes directeurs de recherche Pr Ahmed Koubaa, Pr Yves Bergeron et Pre Dorra Gassara pour toute la confiance qu'ils m'ont accordée afin de m'offrir cette opportunité de faire partie de leurs équipes de recherche et pour le temps qu'ils ont pris pour m'encadrer et me conseiller.

Je souhaite remercier aussi notre partenaire de la Direction de la recherche forestière M. Pierre Grondin pour ses conseils, son soutien tout au long de ma maîtrise et son apport précieux durant la partie terrain de mon projet.

Je tiens également à remercier tous les membres de la Direction de la recherche forestière et spécifiquement David Voyer et Pierre-Yves Laperriere pour leurs soutiens et leurs aides tout au long de mes travaux au terrain.

Je remercie tous mes collègues au sein du Laboratoire de caractérisation des biomatériaux de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), pour son assistance tout au long les différentes étapes de réalisation de la partie expérimentale de ce projet.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, mes amis proches et tous ceux qui ont contribué à la réussite de mon projet de maîtrise, même avec un simple mot d'encouragement.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIÈRES .....	iii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES.....	xi
RÉSUMÉ .....	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
CHAPITRE I REVUE LITTÉRATURE.....	4
1.1 Sommaire.....	4
1.2 L'érable à sucre .....	5
1.2.1 Distribution géographique et exigences écologiques.....	5
1.2.2 Description morphologique.....	7
1.2.3 Les principaux hémiparasites de l'érable à sucre.....	8
1.2.4 Disponibilité, utilisation et potentiel de l'érable à sucre.....	9
1.3 Généralités sur le bois .....	10
1.3.1 Structure du bois .....	10
1.3.2 Propriétés physiques .....	12
1.3.3 Propriétés mécaniques.....	15

1.4	La coloration du bois .....	22
1.4.1	Définition et catégories de la coloration .....	22
1.4.2	Les champignons de carie .....	23
1.5	Les méthodes d'évaluation non destructives de la qualité du bois.....	28
1.5.1	Notion de la qualité du bois .....	28
1.5.2	Les méthodes d'évaluation non destructives des propriétés du bois.....	28
1.5.3	Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique.....	37
1.6	Objectifs et hypothèses.....	39
CHAPITRE II MATÉRIEL ET MÉTHODES.....		41
2.1	Sommaire.....	41
2.2	Caractéristiques et localisation des sites expérimentaux.....	41
2.3	Échantillonnage .....	43
2.4	Mesure de la masse volumique.....	43
2.5	Mesure des propriétés mécaniques.....	45
2.5.1	Préparation des éprouvettes.....	46
2.5.2	Méthodes destructives.....	47
2.5.3	Méthodes non destructives.....	49
2.6	Analyse statistique.....	54
CHAPITRE III RÉSULTATS ET DISCUSSION .....		56
3.1	Sommaire.....	56
3.2	Variation intracerne de la masse volumique et du module d'élasticité dynamique .....	56

3.2.1	Variation de la moelle à l'écorce de la masse volumique et du module d'élasticité dynamique .....	56
3.2.2	Modélisation du profil radial du module d'élasticité dynamique .....	58
3.2.3	Profil de la variation radiale de la masse volumique .....	61
3.2.4	Profil de la variation radiale du module d'élasticité dynamique.....	63
3.2.5	Statiques descriptives .....	65
3.3	Étude des comportements statique et dynamique du bois et la masse volumique à l'échelle des billes .....	65
3.4	Effet de la coloration/carie sur les propriétés du bois étudiées de l'érable à sucre.....	68
3.4.1	Évaluation de la proportion de la carie chez les arbres.....	69
3.4.2	Effet de la coloration/carie sur les propriétés étudiées au niveau du cerne et ses composantes.....	71
3.4.3	Effet de la coloration/carie sur les propriétés étudiées au niveau des billes.....	76
3.5	Étude de régression entre le MOED et les propriétés du bois.....	80
3.5.1	Étude de régression entre le MOED et la masse volumique au niveau du cerne de croissance et ses composantes.....	80
3.5.2	Étude de régression entre le MOED et les propriétés du bois étudiées au niveau des billes.....	83
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	88
	ANNEXES .....	92
	RÉFÉRENCES.....	95

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Distribution de l'érable à sucre en Amérique du Nord .....	6
Figure 1.2 : Feuille et écorce de l'érable à sucre .....	7
Figure 1.3 : a) Un bourrelet chancreux chez un érable infecté par « <i>Inonotus glomeratus</i> » ; b) Un troue triangulaire et carie latente chez un érable infecté par « <i>Oxyporus populinus</i> » ; c) Un renflement du pied chez un érable infecté par « <i>Kretzschmaria deusta</i> ».....	9
Figure 1.4 : Anatomie d'un tronc d'arbre.....	11
Figure 1.5 : Structure du cerne annuel : bois initial et bois final .....	12
Figure 1.6 : Bois carié ayant une consistance spongieuse fibreuse (a) et filandreuse (b) .....	25
Figure 1.7 : Les alvéoles blanchâtres causées par la dégradation de la lignine .....	25
Figure 1.8 : Spectroscopie proche infrarouge .....	31
Figure 1.9 : Dispositif du résistographe .....	32
Figure 1.10 : Méthode de mesure du temps de propagation du son dans le bois par la technique d'ultrason .....	35
Figure 1.11 : Exemple d'un diagnostic d'une section transversale d'un tronc d'arbre à l'aide de la tomographie acoustique.....	37
Figure 1.12 : Relation entre les modules d'élasticité dynamique et statique de différentes essences de bois .....	38
Figure 2.1 : La carte de l'emplacement des quatre sites d'études .....	42
Figure 2.2 : a) Les carottes de sondages; b) Le Soxhlet (Dispositif d'extraction).....	44

Figure 2.3 : a) Le densitomètre à rayon X; b) Exemple d'une carotte scannée par le densitomètre à rayon X .....	45
Figure 2.4 : Préparations des éprouvettes pour les tests de flexion à trois points et les tests de compression parallèle au fil.....	47
Figure 2.5 : a) Banc d'essai pour la mesure du MOE en flexion ; b) Banc d'essai pour la mesure de la résistance en compression parallèle (ASTM-D143) .....	49
Figure 2.6 : Test d'ultrason en utilisant l'appareil Sonatest 380M.....	51
Figure 2.7 : Installation du tomographe acoustique sur le tronc de l'arbre.....	52
Figure 2.8 : Exemple d'un tomogramme fourni par le tomographe acoustique.....	53
Figure 3.1 : Exemple de la variation du module d'élasticité dynamique (MOED), déterminé par le tomographe acoustique, et de la masse volumique, déterminée par le densitomètre à rayon X, le long d'une carotte.....	57
Figure 3.2 : Modélisation du profil intracerne du MOED.....	59
Figure 3.3 : Profil radial des valeurs moyennes du MOEDt en fonction de l'âge cambial.....	60
Figure 3.4 : Profil radial des valeurs moyennes de la MVt en fonction de l'âge cambial.....	60
Figure 3.5 : Profil radial moyen (n=53) de la masse volumique du cerne (MV <sub>C</sub> ), du bois initial (MV <sub>BI</sub> ) et du bois final (MV <sub>BF</sub> ).....	63
Figure 3.6 : Profil radial moyen (n=53) du MOED du cerne (MOED <sub>C</sub> ), du bois initial (MOED <sub>BI</sub> ) et du bois final (MOED <sub>BF</sub> ).....	64
Figure 3.7 : Exemple d'un tomogramme (a) et d'une photo (b) de l'une des sections transversales étudiées de l'érable à sucre.....	70
Figure 3.8 : Étude de régression entre la proportion de la carie mesurée par le tomographe et par la méthode visuelle.....	70
Figure 3.9 : Effet de la coloration/carie sur le MOED au niveau (a) des cernes (MOED <sub>C</sub> ), (b) du bois initial (MOED <sub>BI</sub> ) et (c) du bois final (MOED <sub>BF</sub> ).....	74
Figure 3.10 : Effet de la coloration/carie sur la masse volumique au niveau (a) des cernes (MV <sub>C</sub> ), (b) du bois initial (MV <sub>BI</sub> ) et (c) du bois final (MV <sub>BF</sub> ).....	75

Figure 3.11 : Effet de la coloration/carie sur la masse volumique .....	77
Figure 3.12 : Effet de la coloration/carie sur les modules d'élasticité statiques (a) en compression parallèle (MOES <sub>C</sub> ) et (b) en flexion trois-points (MOES <sub>F</sub> ).....	78
Figure 3.13 : Effet de la coloration/carie sur les modules d'élasticités dynamiques (a) d'ultrason (MOED <sub>U</sub> ) et (b) du tomographe acoustique (MOED <sub>T</sub> ).....	79
Figure 3.14 : Régression entre le MOED et la masse volumique au niveau (a) des cernes (MOED <sub>C</sub> Vs MV <sub>C</sub> ), (b) du bois initial (MOED <sub>BI</sub> Vs MV <sub>BI</sub> ) et (c) du bois final (MOED <sub>BF</sub> Vs MV <sub>BF</sub> ).....	82
Figure 3.15 : Régressions (a) entre la masse volumique (MV) et le MOED d'ultrason (MV Vs MOED <sub>U</sub> ) et (b) entre la MV et le MOED du tomographe (MV Vs MOED <sub>T</sub> ).....	85
Figure 3.16 : Régressions (a) entre le MOED d'ultrason et le MOES en compression (MOED <sub>U</sub> Vs MOES <sub>C</sub> ) et (b) entre le MOED <sub>U</sub> et le MOES en flexion (MOED <sub>U</sub> Vs MOES <sub>F</sub> ).....	86
Figure 3.17 : Régressions (a) entre le MOED du tomographe et le MOES en compression (MOED <sub>T</sub> Vs MOES <sub>C</sub> ) et (b) entre le MOED <sub>T</sub> et le MOES en flexion (MOED <sub>T</sub> Vs MOES <sub>F</sub> ).....	86
Figure 3.18 : Régression entre le MOED du tomographe et d'ultrason (MOED <sub>T</sub> Vs MOED <sub>U</sub> ).....	87

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Facteurs affectant la vitesse de propagation de l'onde sonore (Zribi, 2020) .....	21
Tableau 1.2 : Pourcentage de carie des érables à sucre selon les classes d'âge dans une zone tempérée .....	27
Tableau 1.3 : Classification des méthodes d'END du bois selon ses propriétés physiques.....	29
Tableau 2.1 : Caractéristiques des sites d'échantillonnage.....	42
Tableau 3.1 : Valeurs moyennes, intervalles et écarts types (entre parenthèses) du MOED du point de transition, du BI et du BF en fonction de l'âge cambial pour 53 arbres d'érable à sucre.....	62
Tableau 3.2 : Les valeurs moyennes et les écarts types du MOED et de la masse volumique du cerne et ses composantes selon le site d'étude.....	65
Tableau 3.3 : Valeurs moyennes <sup>1</sup> et écarts types (entre parenthèses) de la masse volumique (MV) et les modules d'élasticité statiques (en flexion (MOES <sub>F</sub> ) et en compression parallèle (MOES <sub>C</sub> )) et dynamiques (d'ultrason (MOED <sub>U</sub> ) et du tomographe acoustique (MOED <sub>T</sub> )).....	66
Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse de variance des effets du site (S), de la classe de coloration (CC), de la classe de diamètre (CD) et de leurs interactions sur les modules d'élasticité dynamique (MOED) et de la masse volumique (MV) du cerne, du bois initial (BI) et du bois final (BF) de l'érable à sucre. ....	71
Tableau 3.5 : Résultats de l'analyse de variance des effets du site (S), de la classe de coloration (CC), de la classe de diamètre (CD) et de leurs interactions sur la masse	

volumique (MV) et des modules d'élasticité statiques ( $MOES_F$  et  $MOES_C$ ) et dynamiques ( $MOED_U$  et  $MOED_T$ )..... 80

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

AMF	Angle de microfibrille
BF	Bois final
BI	Bois initial
CC	Classe de coloration
CD	Classe de diamètre
CND	Contrôle non destructif
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine (1,30 m)
Dt	Masse volumique au point de transition
E/L	Transition entre bois initial et bois final
END	Évaluation non destructive
LT	Longueur de trachéide
LVL	Panneaux à lamelles stratifiées
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MOE	Module d'élasticité
MOED	Module d'élasticité dynamique
MOED <sub>BF</sub>	Module d'élasticité dynamique au niveau du bois final
MOED <sub>BI</sub>	Module d'élasticité dynamique au niveau du bois initial
MOED <sub>C</sub>	Module d'élasticité dynamique au niveau du cerne
MOED <sub>t</sub>	Module d'élasticité dynamique au point de transition
MOED <sub>T</sub>	Module d'élasticité dynamique du tomographe acoustique
MOED <sub>U</sub>	Module d'élasticité dynamique d'ultrason
MOES	Module d'élasticité statique

MOES <sub>C</sub>	Module d'élasticité statique en compression parallèle
MOES <sub>F</sub>	Module d'élasticité statique en flexion trois-points
MOR	Module de rupture
MV	Masse volumique
MV <sub>BF</sub>	Masse volumique au niveau du bois final
MV <sub>BI</sub>	Masse volumique au niveau du bois initial
MV <sub>C</sub>	Masse volumique au niveau du cerne
MV <sub>t</sub>	Masse volumique au point de transition
PM	Point de mesure
QMS	Quintek Measurements System
S	Site

## RÉSUMÉ

L'érable à sucre est une essence abondante dans les forêts du Nord-Est de l'Amérique du Nord et très prisée pour des applications d'apparence et de structure. Cependant, la présence de la coloration et de la carie dans le bois des érables, particulièrement dans la portion nord de sa répartition géographique provoque une diminution considérable de la qualité des tiges ainsi qu'une dégradation des propriétés mécaniques et physiques du bois. Il est ainsi important de détecter et de quantifier la carie dans les peuplements d'érable à sucre. Ainsi, nous visons à évaluer le potentiel de tomographie acoustique pour la détection et la quantification de la carie sur les arbres debout d'une façon non destructive. L'objectif général de ce projet consiste à évaluer le potentiel du tomographe acoustique pour la détection de la carie dans les peuplements d'érable à sucre et l'évaluation de son impact sur les propriétés mécaniques de son bois. Plus spécifiquement, le projet vise à caractériser la proportion de la carie par tomographie acoustique; évaluer l'impact de la carie sur les propriétés mécaniques du bois notamment les modules d'élasticité statique (MOE) et dynamique (MOED) mesurés par deux techniques; évaluer le potentiel de tomographie acoustique pour prédire l'impact de la carie sur le comportement mécanique du bois. Cinquante-trois arbres ont été échantillonnés aléatoirement dans deux sites situés à La Tuque (Québec, Canada). Le MOED dépend de deux paramètres physiques soient la vitesse de propagation de l'onde sonore et la masse volumique du bois. Chaque arbre a été mesuré par le tomographe acoustique pour déterminer la variation radiale de la vitesse de propagation de l'onde sonore et une carotte a été prélevée de chaque arbre pour déterminer le profil radial de la masse volumique en utilisant le densitomètre à rayon X. Afin d'évaluer et de valider le potentiel des outils de caractérisation non destructifs (le tomographe acoustique, le densitomètre à rayon X) pour la mesure des propriétés élastiques du bois, des essais de caractérisation destructifs ont été réalisés (tests de compression et de flexion). En effet, dix-huit billes d'érable à sucre, de hauteur 50 cm, ayant différents diamètres et récoltés de deux sites de l'Abitibi-Témiscamingue (Québec, Canada), ont été analysés par les outils non destructifs (le tomographe acoustique et la méthode d'ultrason) et en même temps avec des outils destructifs afin d'établir des corrélations entre les modules d'élasticité déterminés par les deux méthodes. Les résultats suggèrent un effet significatif de la coloration et de la carie sur les propriétés mécaniques du bois. Ces propriétés diminuent du bois sain vers le bois coloré ou carié avec des pertes d'utilisation à des fins commerciales allant jusqu'à 60%. De plus, le tomographe s'avère un outil non destructif efficace pour évaluer la qualité des érables à sucre. Il peut être avantageusement substitué au tronçonnage et à la récolte de billes de bois.

**Mots clés:** érable à sucre, coloration et carie du bois, caractérisation non destructive, tomographe acoustique, module d'élasticité dynamique.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'érable à sucre est une essence feuillue spécifique des forêts du nord-est de l'Amérique du Nord (Baral, 2016) et spécifiquement au Canada (Ressources naturelles Canada, 2020). Cette essence présente un poids économique important apprécié pour son sirop ainsi que son bois de bonne qualité. En effet, le bois d'œuvre des érables à sucre est recherché surtout grâce à sa dureté, sa densité de ses fibres et sa couleur pâle (MFFP 2020). Il est exploité pour fabriquer des meubles, des revêtements de sol, du placage, des outils agricoles et divers autres produits, en plus de l'utiliser pour les travaux de construction (Wiedenbeck et al. 2004).

D'une façon générale, grâce à ses propriétés mécaniques et physiques, le bois est parmi les matériaux les plus exploités dans le monde. La qualité des attributs de ce matériau est directement liée à l'application finale. En effet, pour les forestiers, la qualité du bois dépend de la forme et de la taille des arbres, alors que pour les industries du bois d'œuvre, elle est définie en fonction de la qualité des billes, c'est-à-dire du diamètre, le défilement, la présence des nœuds, etc. (Zhang, 2003). Pour l'industrie de la construction, la qualité du bois dépend principalement à sa rigidité. Par rapport à d'autres matériaux (comme les métaux), la rigidité spécifique du bois est très élevée. En raison de la rigidité particulière du bois, il est souvent exploité dans une variété d'applications d'ingénierie (panneaux à lamelles stratifiées LVL) et de construction (poutrelles de bois I), de sorte que sa consommation augmente rapidement aux échelles internationale et provinciale (Wang et al., 2017).

Néanmoins, son caractère biologique affaiblit son potentiel pour les utilisateurs du bois. En effet, le bois est un matériau biosourcé qui est sujet à la dégradation soit à cause de

son exposition aux agents pathogènes (les champignons, les bactéries, les insectes), soit aux conditions du milieu environne (la lumière, la chaleur, l'humidité, etc.). Spécifiquement, les érables à sucre sont exposés à divers agents pathogènes en provoquant habituellement des pertes inférieures à 40% causés principalement par les champignons de carie blanche (Basham et Morawski, 1964).

Dans ce contexte, la présence de la carie dans les érables provoque une diminution considérable de la qualité des tiges ainsi qu'une dégradation des propriétés mécaniques et physiques du bois (Bouslimi, 2014). Par conséquent, les utilisateurs du bois sont confrontés à des difficultés au niveau de la variation de la qualité du bois qui provoque à son tour une complexité lors de la transformation du bois en produit de qualité (Dikrallah, 2007).

Afin d'éviter la mauvaise utilisation du bois et d'assurer les normes de sécurité du bois utilisé, l'industrie forestière vise à trouver des solutions efficaces et rapides pour inspecter le bois avant l'abattage, pendant sa transformation et en service (Zhang, 2003). D'où l'intérêt des chercheurs et des industriels à développer des méthodes fiables et précises d'évaluation de la qualité du bois, avant l'étape d'abattage, qui permettront de mieux évaluer les propriétés du bois, notamment ses propriétés mécaniques. Cette évaluation donnera lieu à utiliser plus efficacement le bois disponible selon ses caractéristiques et ses domaines d'application. Il est vrai que ce type d'évaluation peut être réalisé en utilisant des outils destructifs, mais il s'avère très difficile, ce qui limite le champ d'application des outils destructifs. De plus, la préparation des échantillons ainsi que la mesure des propriétés du bois de ces outils sont très longues. Dans certaines applications, il est important d'inspecter régulièrement l'état actuel du bois sans affecter ses caractéristiques fonctionnelles (Nowak et al., 2015; Wang et al., 2017). Prenant l'exemple de l'évaluation du bois des bâtiments historiques, elle est devenue très importante au cours des dernières années en raison de l'importance du poids historique de ces bâtiments qui doit être protégé (Nowak et al., 2015; Wang et al.,

2017). Dans ce cas, ces bâtiments ne peuvent pas être évalués par des méthodes destructives, ce qui peut entraîner la perte de leur intégrité structurelle (Nowak et al., 2015).

Pour cela, il est fortement recommandé d'utiliser des méthodes d'évaluation de la qualité du bois qu'elles soient non destructives pour répondre aux exigences de l'évaluation du bois selon le domaine d'application. De plus, l'utilisation des outils non destructifs pour évaluer les propriétés mécaniques du bois présente de nombreux avantages, notamment la mobilité, la rapidité, l'application dans diverses conditions atmosphériques et de terrain et l'économie des coûts en comparant avec les outils destructifs traditionnels (De Oliveira et al., 2005; Wang et al., 2017).

Dans le cadre de ce projet, l'objectif principal est d'évaluer le potentiel de la caractérisation non destructive basé sur l'utilisation du tomographe acoustique pour l'étude de l'effet de la coloration et la carie du bois sur les propriétés mécaniques. Particulièrement, ce projet vise à déterminer la variation des modules d'élasticité selon l'état du bois (coloré ou sain). Ces modules sont évalués par le biais des méthodes non destructives, telles que la méthode ultrasonique et le tomographe acoustique ainsi que par des méthodes destructives, telles que l'essai de compression statique parallèle et l'essai de flexion de trois points. D'une part, ces évaluations permettent d'établir à leur tour les relations entre les modules d'élasticité statiques et dynamiques, et d'autre part, permettent de développer des modèles pour prédire les modules statiques. Cependant, le tomographe acoustique est utilisé généralement pour la prédiction de la proportion et l'emplacement de la pourriture des arbres sur pied et peu d'études qui ont examiné le potentiel de cette technique pour prédire les propriétés mécaniques. Pour cela, ce projet donne lieu à examiner la fiabilité de cette technique pour prédire le comportement statique du bois.

## CHAPITRE I

### REVUE LITTÉRATURE

#### 1.1 Sommaire

Ce premier chapitre représente la revue bibliographique des aspects en relation avec la présente étude. Cette partie se compose principalement de cinq sections.

Dans la première partie, une description générale a été effectuée afin d'éclaircir les critères principaux de l'érable à sucre : sa distribution géographique et le poids de cette essence sur différentes échelles notamment sur le plan écologique, social, économique et environnemental.

La deuxième partie explique quelques caractéristiques générales du bois. En effet, cette partie présente des connaissances primordiales sur la structure du bois et les propriétés physiques et mécaniques.

Concernant la troisième partie, elle présente la terminologie de la coloration du matériau bois pour clarifier ce phénomène, ses catégories ainsi que les champignons de carie qui sont responsables à cette coloration. Les caractéristiques, les mécanismes de nourriture et de défense et ses conséquences sur les propriétés du bois de ces champignons ont été définis dans cette section.

La quatrième partie présente la notion de la qualité du bois et les méthodes non destructives permettant l'évaluation la qualité de ce matériau. Cette partie commence par définir la qualité du bois, ensuite elle présente les différentes méthodes d'évaluation d'une façon non destructive de la masse volumique et le module d'élasticité du bois.

Finalement, la dernière partie dévoile l'objectif général du projet ainsi que les objectifs spécifiques et les hypothèses accordées à chaque objectif.

## 1.2 L'érable à sucre

À l'échelle mondiale, il y avait plus de 150 espèces de l'érable du genre « *acer* » dont deux tiers poussent en Asie orientale. Cependant, 13 de ces espèces sont originaires de l'Amérique du Nord dont 10 sont indigènes au Canada (Farrar, 1996). Parmi ces essences, l'érable à sucre est le plus populaire au Canada. En effet, cette essence est l'emblème du pays dont sa feuille est le symbole national du Canada qui est illustré au centre du drapeau (Board, 1991).

### 1.2.1 Distribution géographique et exigences écologiques

À l'échelle de l'Amérique du Nord (Figure 1.1), au Canada, la limite nord de l'érable à sucre est quasiment parallèle à la 35e isotherme annuelle se propageant vers l'est à partir l'extrême sud-est du Manitoba, en traversant le centre de l'Ontario, le tiers sud du Québec et tout le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse. Aux États-Unis, l'érable à sucre est situé dans la totalité de la Nouvelle-Angleterre, à New York, en Pennsylvanie et dans les États du centre de l'Atlantique, en allant jusqu'aux sud-ouest par le centre du New Jersey jusqu'aux Appalaches, puis vers le sud à travers la bordure ouest de la Caroline du Nord jusqu'à la frontière sud du Tennessee. Finalement, la limite ouest s'étend à travers le Missouri dans une petite zone du Kansas, le tiers est de l'Iowa et les deux tiers est du Minnesota (Godman et al., 1990).



Figure 1.1 : Distribution de l'érable à sucre en Amérique du Nord (Godman et al., 1990)

L'érable à sucre pousse vers les régions qui présentent un climat humide et frais. Au nord de son aire de répartition, la moyenne des températures atteint  $-18^{\circ}\text{C}$  en janvier et  $16^{\circ}\text{C}$  en juillet. Tandis au sud, la moyenne des températures atteint  $10^{\circ}\text{C}$  en janvier et d'environ  $27^{\circ}\text{C}$  en juillet. Dans son aire de distribution, les températures oscillent du  $-40^{\circ}\text{C}$  au nord jusqu'à  $38^{\circ}\text{C}$  au sud-ouest. Concernant les chutes de neige, elles atteignent souvent 2540 mm au nord (Godman et al., 1990).

Bien que l'érable à sucre se trouve sur une grande variété de types de sols, allant d'environ 12 m jusqu'à 24 m d'un indice de site (Godman et al., 1990), cette essence pousse dans les sols humides, fertiles, bien drainés, profonds et ayant une certaine teneur en calcaire (Farrar, 1996). Le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.), le tilleul d'Amérique (*Tilia americana* L.), le hêtre (*Fagus grandijolia* Ehrh.), et l'érable rouge (*Acer rubrum* L.) sont souvent présents avec l'érable à sucre (Farrar, 1996).

### 1.2.2 Description morphologique

L'érable à sucre est un arbre feuillu de moyenne à grande taille (Farrar, 1996). En effet, cette essence peut atteindre 1,5 m de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et 40 m de hauteur, mais en moyenne elle atteint une hauteur entre 24 et 28 m (Lupien, 2006). Cet arbre possède un fût droit constituant en moyenne près des deux tiers de la cime verte. Cette cime est étroite et à sommet arrondi. L'enracinement est étalé et assez profond (Ansseau et Bernier, 1995).

Les feuilles de l'érable à sucre (Figure 1.2) sont un peu plus larges que longues et de longueur de 8 à 20 cm. Elles possèdent 5 et parfois 3 lobes à longues pointes et ondulés avec quelques dents irrégulières. En plus, elles sont de couleur vert jaunâtre au-dessus et de couleur plus pâle et glabre au-dessous. Le pétiole de la feuille est de longueur 4 à 8 cm. Les nuances de couleurs de ses feuilles varient du marron jusqu'au jaune en passant par l'orange en automne. L'écorce de l'érable (Figure 1.2) est lisse, grise et formant de longues crêtes rigides, verticales et irrégulières (Farrar, 1996).

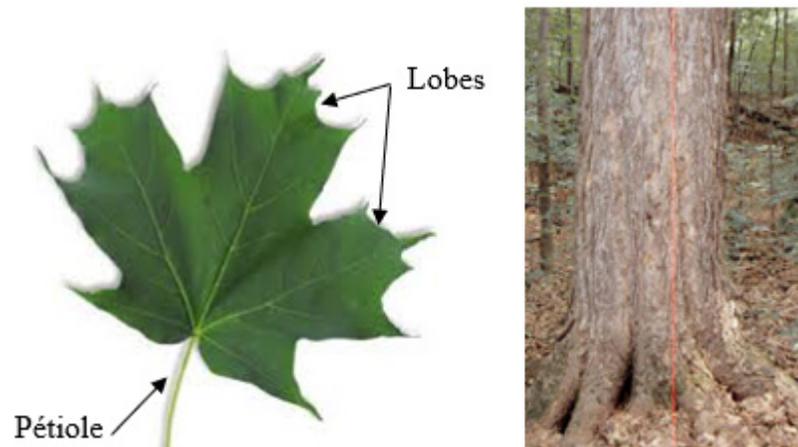


Figure 1.2 : Feuille et écorce de l'érable à sucre (Farrar, 1996)

### 1.2.3 Les principaux hémiparasites de l'érable à sucre

Les érables à sucre sont exposés à divers pathogènes en provoquant habituellement des pertes inférieures à 40% dont principalement causés par les champignons de carie blanche (Basham et Morawski, 1964). Les principaux types de ces derniers sont la carie blanche chancreuse provoquée par le principal agent de pourriture chez les érables « *Inonotus glomeratus* » (Figure 1.3a), la carie blanche spongieuse du tronc provoquée par « *Oxyporus populinus* » (Figure 1.3b) et la carie blanche friable causée par « *Kretzschmaria deusta* » (Figure 1.3c). Ces types de carie attaquent souvent les vieux érables (Boulet, 2003).

En outre, la coloration et la carie du bois provoquent des grands problèmes aux sylviculteurs qui sont soucieux d'augmenter la valeur des peuplements d'érables (Boulet, 2003). En effet, avant l'âge de 60 ans, le défaut le plus commun est la coloration du bois de cœur chez les érables, mais habituellement ce défaut n'est pas d'origine pathologique (Basham, 1991). Il est plutôt dû à un processus physiologique par la défense des arbres mal élagués ou qui ont des blessures au niveau de l'écorce. Ce phénomène est une réaction d'oxydation qui se manifeste par l'affaiblissement des propriétés physico-chimiques du bois. En effet, le pH augmente légèrement et le taux d'humidité diminue. Ce processus amène à une minéralisation du bois de cœur sur les sites à caractères acides et peu productifs à cause de la minceur du sol (Boulet, 2003).

Quand il y avait des blessures au niveau des branches, elles laissent habituellement de grosses cicatrices appelées moignon qui favorisent les colorations en premier lieu puis les infectent (Basham et Anderson, 1977). Dans ce contexte, ce défaut présente un bon terrain aux bactéries et champignons en s'infiltrant dans les moignons et par conséquent ils induisent la carie du bois et les colorations pathologiques. Cependant, plus que l'arbre de l'érable à sucre vieillisse plus que la coloration du bois se stabilise (Boulet, 2003).



Figure 1.3 : a) Un bourrelet chancreux chez un érable infecté par « *Inonotus glomeratus* » ; b) Un trou triangulaire et carie latente chez un érable infecté par « *Oxyporus populinus* » ; c) Un renflement du pied chez un érable infecté par « *Kretzschmaria deusta* » (Boulet, 2003)

#### 1.2.4 Disponibilité, utilisation et potentiel de l'érable à sucre

Le bois de l'érable à sucre est une matière très demandée par les fabricants des planchers et des meubles. Dans ce contexte, l'érable est resté une matière d'approvisionnement afin de fabriquer un plaquage décoratif ou une pièce complète (Mullins et McKnight, 1981). De plus, les panneaux de contreplaqué sont très utilisés dans le domaine de la construction grâce à sa résistance à la déformation et sont utilisés ainsi dans les applications décoratives et d'apparence. L'érable à sucre a été cité parmi les essences susceptibles de servir à la construction (Bowyer et al., 2003). Au dernier siècle, le chauffage domestique se fait par la combustion du bois de l'érable à sucre. Ce dernier a été une source d'énergie grâce à son pouvoir calorifique élevé. De plus, le bois de l'érable se brûle avec une vitesse relativement faible en produisant une conservation d'énergie prolongée (Arnould, 2002).

Le Canada est un pays où le hockey est populaire. En effet, plus de 4 millions de bâtons de hockey sont produits au Canada annuellement. Lors du jeu, le bâton de hockey est soumis à de grandes sollicitations ce qui nécessite l'utilisation des bois durs. C'est pour cela l'érable à sucre est parmi les essences les plus utilisées (Mullins et McKnight, 1981). Aussi la baguette de billard doit être fabriquée en utilisant le bois qui est dur et résistant aux efforts de flexion à cause de sa longueur. Par conséquent, le bois de l'érable à sucre est exploité pour la fabrication des baguettes de billard (Ross, 2010). De plus, les pistes du jeu de quilles exigent des pièces en bois massif de l'érable à sucre lors de leurs fabrications à cause des chocs répétitifs des boules (Mullins et McKnight, 1981). Les pistes de bowling sont fabriquées à partir le bois de l'érable à cause leurs soumissions des sollicitations mécaniques. Les pistes de dance et de gymnastique sont ainsi fabriquées en utilisant un bois dense ce qui est le cas de l'érable à sucre (Ross, 2010).

### 1.3 Généralités sur le bois

#### 1.3.1 Structure du bois

##### 1.3.1.1 Structure du tronc : de la moelle à l'écorce

Après l'abattage, en regardant la surface transversale du tronc de l'arbre, on peut voir des bandes qui sont généralement concentriques (Figure 1.4). En se dirigeant de l'extérieur vers l'intérieur de la tige, les différentes composantes du tronc peuvent être observées dans l'ordre suivant :

- Écorce : elle est formée par l'écorce externe (cellules non vivantes) qui se traduit par une enveloppe protectrice et imperméable ainsi que par l'écorce interne (cellules vivantes).
- Cambium : Il produit des cellules concentriques qui forment chaque année des anneaux annuels. Il fournit des cellules vivantes vers l'extérieur ainsi que des

cellules vivantes vers l'intérieur qui vont d'abord produire du bois de sève (aubier), puis un bois stable (le duramen) après vieillissement.

- Aubier : il est localisé entre le cambium et le duramen (Figure 1.4). Il a des cellules encore vivantes, assurant la transmission de la sève brute et le stockage des nutriments des substances nutritives.
- Bois de cœur ou duramen : Il est composé de cellules non vivantes lignifiées qui ne prennent pas part à la croissance des arbres. Il ne sert que de support mécanique. Le bois de cœur est riche en matières extractibles, ce qui lui confère la durabilité naturelle du bois.
- La moelle : elle présente le tissu végétal au centre du tronc de l'arbre et se forme dès le début de la croissance. La moelle est un peu molle et ne se modifie pas (Miller, 1999).

En général, le bois de duramen de l'érable à sucre est de couleur brun rougeâtre alors que l'aubier est de couleur très pâle et blanchâtre (Ross, 2010).

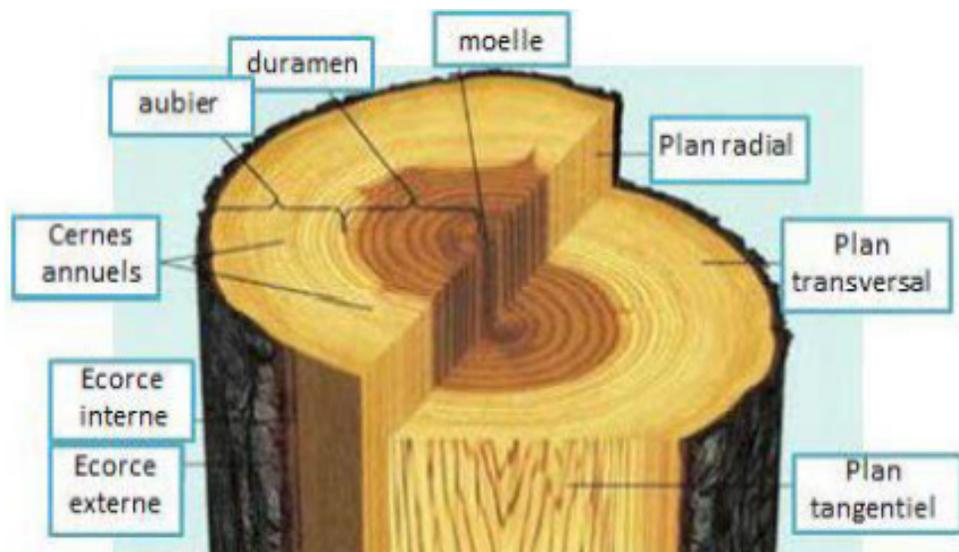


Figure 1.4 : Anatomie d'un tronc d'arbre (adapté de Everett et al. 2007)

### 1.3.1.2 Cernes de croissance et ses composantes

À l'échelle du cerne de croissance, la structure conserve l'apparence d'un composite à deux couches de couleurs différentes. En d'autres termes, la couche sombre représente le bois final tandis que la couche la plus claire représente le bois initial. La formation de ces composantes est définie en fonction des conditions climatiques et de la saison de croissance. Le bois initial, qui est l'intérieur des cernes annuels, se forme au cours de la première saison de croissance, c'est-à-dire au printemps. Ce type de bois, également appelé bois de printemps, se caractérise par des cellules à grandes cavités ou lumen (environ 40  $\mu\text{m}$  en diamètre) et à parois minces. Cependant, le bois final, situé à la partie extérieure du cerne, il se forme au cours de la deuxième saison de croissance. Puisqu'il se forme en été, on réfère à ce type bois à la saison de sa formation. En fait, la taille des composants de ce bois est différente à celle des composants du bois de printemps. Bien que le lumen du bois d'été ait des diamètres plus petits ( $<20 \mu\text{m}$ ), la paroi de trachéide de ce type de bois de ses cellules est relativement épaisse (Figure 1.5). La transition entre ces deux types de bois peut être soit abrupte soit graduelle (Panshin et Zeeuw, 1980).

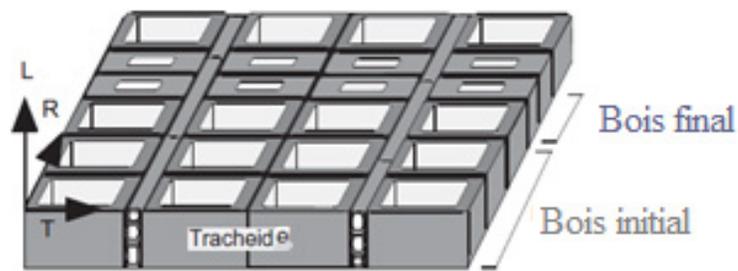


Figure 1.5 : Structure du cerne annuel : bois initial et bois final (Hasegawa et al., 2011)

### 1.3.2 Propriétés physiques

### 1.3.2.1 Hygroscopicité et stabilité dimensionnelle du bois

Selon la température et l'humidité de l'environnement où il se trouve, le bois perd de son humidité si le milieu est sec et il reprend son humidité dans le cas d'un milieu humide. D'où on parle d'un matériau hygroscopique. Puisque les propriétés et les performances du bois sont influencées par la teneur en humidité, il faudrait évaluer cette mesure pour le conditionnement, la durabilité et la transformation du bois. Dans ce contexte, maintenir la stabilité dimensionnelle du bois est l'un des défis pour la valorisation du bois en tant que matériau d'ingénierie. L'eau libre se trouve dans la partie creuse de la cellule appelée lumen tandis que l'eau liée se trouve dans la paroi cellulaire. Chez les feuillus, la différence en teneur d'humidité entre le bois de cœur et l'aubier est propre à l'espèce. Spécifiquement à l'érable à sucre, cette essence présente une teneur en humidité de 72% pour l'aubier et 65% pour le bois de cœur (Ross, 2010). Le bois se caractérise par une teneur d'humidité critique appelée point de saturation des fibres. Au-dessous de ce point, le bois est déformable ce qui induit le gonflement lors du gain de l'humidité ou le rétrécissement lors de la perte de l'humidité. Cependant, le bois est indéformable au-dessus de ce point (Ross, 2010). L'anisotropie du bois se procure lors de la stabilité dimensionnelle. En effet, à une teneur d'humidité de 6%, le bois vert de l'érable à sucre se caractérise en moyenne dans la direction radiale par un retrait de 3,9%, dans la direction tangentielle par un retrait de 7,6% et par un retrait volumétrique de 11,9% (Lupien, 2006).

### 1.3.2.2 Masse volumique, densité et densité relative

La densité est considérée parmi les indicateurs principaux en parlant de la qualité du bois (Jozsa et Middleton, 1994; Zhang, 2003). La masse volumique et la densité relative sont fréquemment utilisées pour définir ce paramètre physique. La masse volumique est définie comme étant le rapport masse par volume. Alors que la densité relative est le rapport de la masse volumique du matériau par la masse volumique de l'eau. Puisque le bois est un matériau hygroscopique, sa masse et son volume subissent des variations

à cause de l'humidité et par conséquent la densité relative est fortement influencée par la teneur en humidité du bois. Lors de la mesure de la densité, il faudrait préciser la valeur de la teneur en humidité (Ross, 2010). L'érable à sucre présente une masse volumique d'environ  $597 \text{ kg.m}^{-3}$  à 12% d'humidité (Jessome, 1977).

La densité du bois est une propriété très variable. La proportion de bois initial, l'épaisseur de la paroi cellulaire des fibres et la largeur du diamètre des cellules sont des facteurs qui engendrent la variation de la densité. Elle varie également sous l'effet de plusieurs autres facteurs, dont la nature de l'essence, de l'arbre, de la densité du peuplement ainsi que du type de bois (bois normal/bois de réaction, bois juvénile/bois mature et bois initial/bois final) (Alteyrac et al., 2006; Koubaa et al., 2002; Panshin et Zeeuw, 1980).

La mesure de la densité du bois dépend dans un premier temps de l'effet d'échelle, ce qui conduit à une grande variabilité dans la mesure de ce paramètre. À l'échelle des billes, la densité mesurée est égale à la valeur moyenne incluant le bois juvénile, le bois mature et des nœuds. À une échelle plus basse, au niveau des éprouvettes d'essai et des planches, la valeur mesurée correspond à la moyenne de la densité de plusieurs cernes annuels. À l'échelle du cerne, la valeur mesurée est une moyenne de la densité du bois initial et du bois final. En dernier lieu, seule la densité de la paroi cellulaire est constante et égale à environ 1,50 chez les résineux (Alteyrac, 2005). Dans ce contexte, les industriels et les chercheurs visent à développer des techniques et des outils, qui permettent de mesurer avec précision l'évolution de la densité afin de mieux analyser le comportement du bois. En effet, les patrons de variations intracernes de la densité permettent de fournir plus d'informations sur les cernes de croissances et les variations des processus physiologiques pendant la saison de croissance du bois (Koubaa et al., 2002).

### 1.3.2.3 Propriétés électriques et diffusivité thermique

Les propriétés électriques du bois sont fortement liées à la teneur en humidité. Étant donné son caractère hygroscopique, le bois n'est pas un bon isolant électrique, car l'eau est un excellent conducteur électrique. Cela explique le fait que le bois anhydre est un bon isolant électrique. Dans le bois, la conduction électrique se fait par le déplacement des électrons qui sont à l'origine des électrons métalliques provenant des extractibles présents dans le bois. De plus, la résistivité électrique représente l'aptitude du matériau à s'opposer à la circulation électrique. L'érable présente une résistivité électrique qui vaut  $9,3 \text{ K. m. W}^{-1}$  à 12% d'humidité (Ross, 2010).

La diffusivité thermique est la vitesse avec laquelle l'onde thermique va pénétrer et atténuer dans le matériau. Comparativement aux autres matériaux, le bois semble plus froid à la touchée à une même température. Cela est expliqué par une densité modérée et une capacité thermique relativement faible du bois et par conséquent ce dernier présente une conductivité thermique faible. La diffusivité thermique est le rapport conductivité thermique par densité et capacité thermique. À 12% d'humidité, la conductivité thermique de l'érable à sucre vaut  $0,18 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (Ross, 2010).

### 1.3.3 Propriétés mécaniques

#### 1.3.3.1 Élasticité du bois

À différentes échelles, la structure du matériau bois se caractérise toujours par son anisotropie et son hétérogénéité. La structure hiérarchique du bois est la source de cette forte anisotropie, qui confère au matériau bois le comportement viscoélastique. Autrement dit, les propriétés mécaniques et physiques varient en fonction de la direction d'observation. Quoique divers groupes de symétrie puissent caractériser l'élasticité du bois, ce matériau est considéré comme orthotrope, car ses propriétés mécaniques et physiques se diffèrent selon chaque direction principale.

Les matériaux orthotropes ont trois directions principales perpendiculaires les unes aux autres : longitudinale L, radiale R et tangentielle T. C'est-à-dire que l'axe longitudinal L représente le long de l'axe du tronc et suit la direction des fibres. Cependant, l'axe radial R est perpendiculaire à la croissance des cernes annuels, c'est-à-dire normal aux grains dans la direction radiale. L'axe tangentiel T est normal au grain, mais tangent aux cernes annuels (Ross, 2010).

Le bois étant un matériau orthotrope, sa matrice de rigidité comporte neuf modules d'ingénierie indépendants. La forme de la loi de comportement élastique, également appelée loi généralisée de Hooke (Équation 1.1), relie la valeur moyenne en volume de la contrainte  $[\sigma_{ij}]$  à celle de la déformation  $[\varepsilon_{kl}]$  (Équation 1.2) par l'intermédiaire des constantes élastiques  $[C_{ijkl}]$ .

$$[\sigma_{ij}] = [C_{ijkl}][\varepsilon_{kl}] \quad (1.1)$$

$$[\varepsilon_{kl}] = [S_{ijkl}] [\sigma_{ij}] \quad (1.2)$$

Avec :

$\sigma$  : la matrice de contrainte (6×1);

$\varepsilon$  : la matrice de déformation (6×1);

C : la matrice rigidité (6×6);

S : la matrice de souplesse (6×6);

En analysant ces deux relations, on conclut que la matrice de rigidité [C] est l'inverse de la matrice de souplesse [S]. Les éléments de la matrice de rigidité [C] peuvent être obtenus expérimentalement grâce à la mesure des vitesses des ondes sonores alors que les éléments de la matrice de souplesse [S] peuvent être obtenus par les tests statiques. Les équations (1.3) et (1.4) révèlent que les termes de la matrice de rigidité ont les mêmes dimensions que celles des contraintes (MPa) (N.m<sup>-2</sup>) (Bucur, 2006).

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Les éléments de la matrice de rigidité possèdent trois modules d'élasticité  $E_i$  ( $E_L$ ,  $E_R$  et  $E_T$ ), trois modules de rigidité ou de cisaillement  $G_{ij}$  ( $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$  et  $G_{RT}$ ) et six coefficients de poisson  $\nu_{ij}$  ( $\nu_{TL}$ ,  $\nu_{TR}$ ,  $\nu_{LT}$ ,  $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{RT}$  et  $\nu_{RL}$ ). Le module d'élasticité représente l'aptitude d'un matériau sollicité par des faibles contraintes à reprendre complètement sa forme initiale après avoir supprimé la charge appliquée (Bucur, 2006).

Le module d'élasticité peut être mesuré par des essais statiques ou des essais dynamiques. En effet, si l'évaluation de la matrice de comportement est dynamique, alors le processus de détermination des six éléments diagonaux des axes principaux de la matrice de rigidité à travers les vitesses des ondes transversales et longitudinales sera assez facile et bien établi (Bucur, 2006; Jarboui, 2019). Les relations entre les vitesses de propagation des ondes et les éléments de la matrice de rigidité dans toutes les directions sont illustrées par les équations (1.5), (1.6), (1.7) et (1.8).

$$C_{ii} = \rho V_{ii}^2 \quad (1.5)$$

$$C_{12} = \sqrt{(C_{11} + C_{66} - 2\rho(V_{12})^2)(C_{66} - C_{22} - 2\rho(V_{12})^2)} - C_{66} \quad (1.6)$$

$$C_{13} = \sqrt{(C_{11} + C_{55} - 2\rho(V_{13})^2)(C_{55} - C_{33} - 2\rho(V_{13})^2)} - C_{55} \quad (1.7)$$

$$C_{23} = \sqrt{(C_{22} + C_{44} - 2\rho(V_{23})^2)(C_{44} - C_{33} - 2\rho(V_{23})^2)} - C_{44} \quad (1.8)$$

Avec :

$V_{ii}$  : la vitesse de propagation de l'onde suivant la direction principale;

$V_{ij}$  : la vitesse de propagation de l'onde transversale en faisant un angle de 45°;

Prenant exemple de la mesure du module élastique dynamique le long de la direction longitudinale, elle est prise en excitant l'échantillon à partir des ondes sonores suivant la direction longitudinale du bois (équation 1.9). Les relations entre les vitesses de propagation et les différentes propriétés mécaniques suivant toutes les directions sont révélées par les équations (1.10) et (1.11) (Bucur, 2006; Jarboui, 2019).

$$E_i = \rho V_i^2 \quad \text{où } i = L, R \text{ et } T \quad (1.9)$$

$$G_{ij} = \rho \left( \frac{V_{ij} + V_{ji}}{2} \right)^2 \quad \text{où } i \neq j \text{ et } i, j = L, R \text{ et } T \quad (1.10)$$

$$\nu_{ij} = \left( \frac{V_i^2 + 2V_{ij}^2}{2(V_i^2 + V_{ij}^2)} \right) \quad \text{où } i \neq j \text{ et } i, j = L, R \text{ et } T \quad (1.11)$$

Avec :

$E_i$  : le module d'élasticité dynamique (MPa) ;

$G_{ij}$  : le module de cisaillement dynamique (MPa) ;

$\nu_{ij}$  : le coefficient de Poisson ;

$\rho$  : la masse volumique du bois ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) ;

$V_{ii}$  : la vitesse de propagation de l'onde suivant la direction longitudinale ( $m.s^{-1}$ ) ;

$V_{ij}$  : la vitesse de propagation de l'onde suivant la direction transversale ( $m.s^{-1}$ ).

Vu que la grande variabilité due à la structure hiérarchique du bois, les cerne annuels sont composés du bois initial ainsi que du bois final. Chacun de ces types bois a ses propres propriétés physiques et mécaniques. Par conséquent, le comportement global du bois est la résultante de l'interaction de ces deux composantes du cerne et la compréhension du comportement intracerne est essentielle pour évaluer les caractéristiques globales. Cependant, il existe peu d'études sur cet aspect.

Afin d'étudier les propriétés mécaniques des cerne annuels de l'épinette de Stika, Moliński et al. (2014) ont utilisé un traîneau à microtome pour s'assurer que les échantillons soient finement découpés suivant la direction tangentielle de chaque cerne et de chaque bande de bois initial et bois final. Par la suite, des tests statiques ont été effectués afin de mesurer le MOE et le MOR.

D'autres techniques ont été utilisées à l'échelle intracerne comme la corrélation d'images numériques pour évaluer les propriétés mécaniques. À l'aide d'un logiciel, la déformation a été évaluée dans la zone élastique (Jeong et al., 2009). De plus, Kharrat et al. (2019) ont élaboré un dispositif à transmission ultrasonore qui se caractérise par une résolution linéaire de l'ordre de 0,04 mm et permet d'évaluer la vitesse de propagation des ondes sonores soit à l'échelle intra-arbre soit à l'échelle intracerne. Par la suite, la détermination du MOED devient possible en associant les données de ce dispositif avec celles du densitomètre à rayon X. Une approche mathématique appuyée sur des polynômes d'ordres élevés afin de modéliser les profils du MOED intracernes du pin gris et l'épinette noire. De plus, le point d'inflexion des polynômes a été utile pour préciser la transition du bois initial au bois final. Vu que le MOED est défini en fonction de la masse volumique et de la vitesse de propagation des ondes sonores, une variation de l'une de ces deux grandeurs entraînera une perturbation du MOED.

### 1.3.3.2 Propriétés acoustiques

La vitesse de propagation des ondes sonores à l'intérieur d'un matériau structurel est un facteur de base pour la compréhension de ses comportements mécaniques et viscoélastiques. Étant donné son caractère biologique, le bois est anisotrope suivant différentes échelles, particulièrement sur le plan acoustique. En d'autres termes, cette anisotropie est principalement causée par les éléments structuraux du matériau, leurs répartitions et leurs orientations. Pour cela, pour bien comprendre le comportement mécanique du bois, il est nécessaire de comprendre ces structures et leurs impacts sur le processus de la propagation des ondes sonores. L'interaction entre les ondes sonores et les éléments structuraux montre l'anisotropie du bois et permet également de détecter la disposition de ces éléments anatomiques et leur formation durant le cycle de vie de l'arbre (Bucur, 2006). En raison de cette interaction, l'impédance acoustique se change. Cette impédance représente la résistance du composant au son traversant le matériau. Elle est calculée en multipliant la masse volumique et la vitesse de propagation de l'onde sonore. La vitesse de propagation dans la direction longitudinale est supérieure à celle dans les autres directions (Ross, 2010). Ceci peut être expliqué par l'existence des fibres longues dont les parois donnent lieu à un chemin continu aux ondes.

Si on compare la vitesse de propagation selon la direction longitudinale avec celles selon les directions radiale et tangentielle, on peut constater pour la quasi-totalité des essences que la vitesse suivant la direction des trachéides est trois à cinq fois la propagation des ondes plus grande que les autres directions (Bucur, 2006). D'ailleurs, la disposition et l'existence de ces éléments structuraux affecteront les valeurs de la masse volumique, entraînant ainsi des changements au niveau de la vitesse du son. Autrement dit, en règle générale, on peut dire que pour le bois, la vitesse de propagation des ondes sonores diminue sous l'effet de l'augmentation de la densité (Bucur, 2006). Plusieurs autres facteurs qui affectent la vitesse de propagation de l'onde sonore sont résumés au tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Facteurs affectant la vitesse de propagation de l'onde sonore (Zribi, 2020)

Type paramètre	Source de variation	Impact sur la vitesse de propagation de l'onde sonore
Échelle	Proportion du bois final	La vitesse diminue sous l'effet de l'augmentation des proportions du bois final (Bucur, 2006; Holz, 1984).
	Patron de la densité des cernes	La vitesse suivant la direction longitudinale est inversement proportionnelle à la densité (Bucur, 2006; Hasegawa et al., 2011).
	Longueur des trachéides	Une augmentation de la longueur des fibres est proportionnelle à la vitesse selon la direction longitudinale (avec un coefficient de corrélation de 0.85) (Huang et al., 2003).
	Angle de microfibrille	La vitesse suivant la direction longitudinale est inversement proportionnelle à l'angle de microfibrille (Bucur, 2006; Hasegawa et al., 2011).
Environnemental	Température	
	Taux d'humidité	La vitesse augmente sous l'effet de la diminution de ces paramètres (Ross, 2010).
Expérimental	Fréquence	

## 1.4 La coloration du bois

### 1.4.1 Définition et catégories de la coloration

La terminologie de la coloration du matériau bois est peut-être ambiguë. Cette coloration se définit comme un changement de couleur, soit en surface ou en volume, conférant au bois une couleur atypique. Elle affecte souvent (mais pas toujours) la valeur du bois (Uzunovic et al., 2008).

Certaines colorations ont été largement étudiées et dans certains cas elles peuvent être évitées. Cependant, dans d'autres cas, les études sur la prévention et les causes de la coloration du bois sont encore insuffisantes (Scheffer et Lindgren, 1940). La coloration existe aussi bien au sein de l'aubier que le duramen. Elles peuvent également apparaître à n'importe quel stade de la chaîne de transformation du bois, y compris les arbres debout, les billes vertes, le bois d'œuvre à l'état vert ou séché et même aux produits du bois en service. De plus, elles peuvent être formées à un stade et apparues à un autre stade de la transformation du bois.

Les colorations du bois peuvent être divisées en deux catégories selon leurs causes et leurs natures : coloration microbienne et coloration non microbienne. Comme son nom l'indique, les colorations microbiennes, qui ont le plus grand impact économique, sont causées par des microorganismes, notamment des champignons responsables des moisissures, des bactéries et des caries.

Les érables à sucre sont exposés à diverses colorations microbiennes et spécifiquement celles causées par les champignons de carie blanche (Basham et Morawski, 1964). Parmi les colorations microbiennes, celle causée par les champignons du bleuissement est la plus fréquente et a fait l'objet de plusieurs études. Communément trouvées sur les résineux, mais peut également être trouvée sur les feuillus (Uzunovic et al., 2008).

En ce qui concerne la coloration non microbienne, elle se produit généralement dans certaines conditions, et bien qu'elle soit plus fréquente sur les feuillus, elle se produit

également sur les résineux. Cette catégorie de coloration peut être non seulement chimique, photochimique, biochimique ou mécanique (de la saleté, des marques de brûlures, etc.), mais aussi elle peut également faire survenir des facteurs à la fois microbiens et chimiques, comme l'exemple de la tache brune de la pruche du Canada (Kreber, 1995).

#### 1.4.2 Les champignons de carie

Suivant la capacité de dissolution des composants du bois, dont la lignine, la cellulose et les autres polysaccharides du bois, il existe quatre catégories de champignons telles que les moisissures de surface, les colorations de l'aubier, les caries brunes, les caries molles et les caries blanches (Boulet, 2003).

##### 1.4.2.1 Le mécanisme de nourriture des champignons

Les champignons sont parmi les organismes qui transforment le bois mort en éléments nutritifs. Dans ce contexte, ils participent dans le processus de recyclage de la matière organique qui se manifeste en trois phases en commençant par la colonisation puis la minéralisation et finalement l'humification. Au début, lors de la colonisation, les insectes colonisent les arbres morts et fragmentent les débris couvrant le sol comme les insectes qui perforent des galeries dans le bois en favorisant la multiplication rapide des champignons et des bactéries. Ensuite, la minéralisation de la matière organique, les champignons extraient immédiatement l'azote qui se trouve dans les sels ammoniacaux. Finalement, pendant l'humification, les composants chimiques du bois, la lignine, la cellulose et les hémicelluloses se dégradent à travers des polypores. Par conséquent, ces derniers sont bien équipés pour la transformation chimique du bois. En effet, leurs hyphes sont enrichis par des catalyseurs biochimiques comme les ligninases et les cellulases qui dissolvent les parenchymes et les microfibrilles (Boulet, 2003).

#### 1.4.2.2 Caractéristiques des champignons de carie blanche

Les champignons de carie blanche sont parmi les champignons les plus destructeurs (Boulet, 2003). Ils sont des champignons lignivores et de carie fongique causée par des basidiomycètes. Ces derniers sont capables de dégrader la lignine dans le bois. On distingue trois groupes de champignons de carie blanche: des champignons de carie simultanés, des champignons sélectifs et des champignons simultanés sélectifs (Wei, 2001). Les champignons de carie simultanés, comme *Formes fomentarius*, *Trametes versicolor* ou *Cerrena unicolor*, sont capables de dégrader la cellulose, l'hémicellulose et la lignine en même temps. Ces espèces de polypores attaquent surtout les feuillus, quels que soient morts ou vivants. Généralement, leurs attaques sont insidieuses et se présentent dans les fractures des grosses branches, principalement chez les arbres qui sont grands et exposés aux vents. À l'état intermédiaire de la dégradation, le bois est de couleur blanc jaunâtre ainsi qu'il est sillonné de fines lignes noires. D'abord friable, il devient spongieux, mou et gorgé d'eau puis il se fendille dans le sens radial. D'autres champignons de ce type de carie transforment la lignine afin de s'en prendre ensuite aux autres composants du bois (la cellulose et les hémicelluloses) (Kirk et Hammel, 1992). Alors, ils appliquent au début une action sélective puisque leurs hyphes s'infiltrèrent à l'intérieur de la lamelle mitoyenne des cellules ligneuses pour disloquer les fibres et s'attaquer à la lignine. À la phase initiale, le bois change de couleur dans les parties pourries, mais il ne perd pas sa résistance. Cependant, le bois s'affaiblit de plus en plus selon les quantités de la cellulose et les hémicelluloses attaquées. Finalement, à une phase avancée de dégradation, le bois change d'aspect et se ramollit. Suivant le taux d'altération des fibres et les champignons responsables, le bois carié a une circonstance spongieuse fibreuse (Figure 1.6a) ou filandreuse (Figure 1.6b).

Les champignons de carie blanche sélectifs dégradent seulement la lignine et ils touchent spécifiquement le bois de cœur de plusieurs conifères en laissant des traces visibles. Prenant l'exemple de *Porodoedalea pini s. lato* qui provoque la carie alvéolaire du tronc (Blanchette, 1980). En premier temps, il s'en prend aux trachéides

du bois d'été de façon que la carie cause partiellement un décollement des cernes annuels. À l'état intermédiaire de la dégradation, des alvéoles blanchâtres (Figure 1.7), qui sont la conséquence d'une dégradation sélective et localisée de la lignine, apparaissent dans le bois. Cette action fait apparaître la couleur naturelle du mycélium et la cellulose (Boulet, 2003).

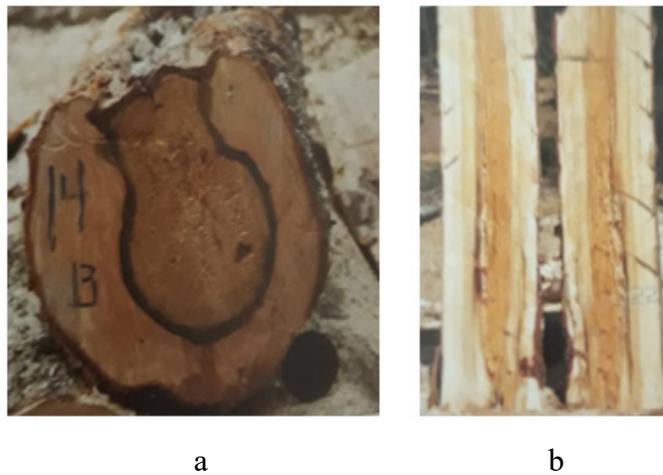


Figure 1.6 : Bois carié ayant une consistance spongieuse fibreuse (a) et filandreuse (b) (Boulet, 2003)



Figure 1.7 : Les alvéoles blanchâtres causées par la dégradation de la lignine (Boulet, 2003)

Le dernier groupe de champignons de carie blanche est les champignons simultanés sélectifs. Ces derniers attaquent avec les deux façons en même temps. En effet, des anneaux concentriques apparaissent souvent sur la découpe des billes dégradées avec ce type de champignon. Cette forme de carie appelée lamelleuse est en fait le résultat à la fois de la dégradation d'une manière sélective de la lignine dans le bois de printemps et de la destruction d'une manière simultanée de la cellulose et de la lignine dans le bois d'été (Otjen et Blanchette, 1986). Ce type de champignon contamine fréquemment les érables et les bouleaux par *Ischnoderma resinosum* (Boulet, 2003).

#### 1.4.2.3 Les mécanismes de défense des arbres

Ce n'est pas évident que la blessure de l'écorce génère la carie et la dégradation du bois, car les arbres peuvent résister aux attaques des champignons. En effet, chaque arbre emmagasine des réserves de glucides sous forme d'amidon dans le but de prendre sa satisfaction de ses besoins principaux comme la respiration. S'il y a un excès de glucide, l'arbre produit des composés secondaires pour la protection antifongique et antimicrobien. Ces produits sont préparés afin de réagir à des excitations externes à l'exemple des blessures de l'écorce ou des infections causées par les champignons. Généralement, les arbres ont les capacités pour se protéger et lutter contre la carie (Boulet, 2003).

Toutes les essences sont sensibles par les champignons de carie notamment en dépassant l'âge de maturité physiologique, mais la résistance à la carie varie d'une essence à une autre. En effet, Boulet et al. (2015) ont classé les essences selon leur résistance à la carie sur trois catégories : les essences résistantes à la carie, moyennement résistantes à la carie et sensibles à la carie. L'érable à sucre se classe parmi les essences moyennement résistantes à cause de l'existence des blessures au niveau de l'écorce de l'érable qui provoque une diminution de la vitesse de la réaction d'oxydation dans le bois de cœur. Ce dernier contient des polyphénols qui améliorent sa résistance à la carie et rend le bois de cœur plus résistant que l'aubier.

Concernant la proportion de la carie chez les érables, les spécialistes québécois ont effectué des estimations du pourcentage de la carie de l'érable à sucre selon les classes d'âges dans une zone tempérée en montrant que ce pourcentage se stabilise à grand âge (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Pourcentage de carie des érables à sucre selon les classes d'âge dans une zone tempérée (Boulet, 2003)

Âge (Année)	30	70	110	150	190	230	260+
<b>Pourcentage de carie (%)</b>	4,0	20,8	24,7	30,5	31,0	32,3	33,8

#### 1.4.2.4 Conséquences de la carie sur les propriétés du bois

Généralement, les caries affectent plusieurs caractéristiques du bois telles que la densité, la rigidité, la couleur et la texture à des degrés divers. Au stade initial, le bois atteint la carie brune qui a pratiquement la même apparence du bois sain, mais sa flexibilité et sa résistance sont très inférieures à celles du bois sain. Cependant, les agents pathogènes provoquant la carie blanche modifient rapidement la couleur du bois sans diminuer sa résistance en premier temps, vu que ces agents ne dégradent pas dès le début la cellulose de la paroi des cellules (Otjen et Blanchette, 1986).

Witomski et al. (2016) ont mené une étude portant sur la résistance à la flexion statique, la résistance à la compression parallèle et la variation du module d'élasticité du pin sylvestre en décomposition par les champignons de la pourriture blanche ainsi que les champignons de la pourriture brune. Une diminution importante de la résistance à la flexion a été observée au stade initial d'atténuation. En effet, pour une perte de masse de 7 %, une diminution de 50 % de cette propriété a été trouvée dans le cas de la pourriture brune et 20% pour la pourriture blanche. Quant à la résistance à la compression, une diminution linéaire a été obtenue pour une perte de masse croissante. La pourriture blanche entraîne une réduction de 50% de la résistance à la compression avec une perte de masse d'environ 30 %, tandis que la pourriture brune entraîne une

réduction de 20 % avec une perte de masse de 20%. Les variations linéaires les plus lentes ont été observées pour le module d'élasticité (MOE) en flexion. Dans le cas de la pourriture blanche, les valeurs du MOE ont été réduites d'environ 50% pour une perte de masse de 40%, alors que pour la pourriture brune une diminution de 50% de la propriété a été obtenue pour une diminution de masse aussi faible que 20%.

## 1.5 Les méthodes d'évaluation non destructives de la qualité du bois

### 1.5.1 Notion de la qualité du bois

La qualité du bois est une notion subjective, car elle est reliée principalement du contexte d'une application donnée. En effet, la qualité dans le cas du matériau bois dépend de ses propriétés et ses caractéristiques qui doivent être valorisées convenablement selon le cadre de l'application. Certaines de ces caractéristiques sont utiles pour certaines applications, mais inutiles pour d'autres. Prenant l'exemple du bois de Thuya, sa faible masse volumique et sa faible conductivité thermique en absence des nœuds sont souhaitables pour la fabrication des bancs destinés aux saunas vu que le bois dense avec les nœuds est très chaud pour la peau (Jozsa et Middleton, 1997). Cependant, le bois de sciage demande une masse volumique considérable.

Dans la partie suivante, on s'intéresse aux méthodes non destructives qui sont capables de détecter la carie du bois ainsi d'évaluer la masse volumique et le module d'élasticité du bois.

### 1.5.2 Les méthodes d'évaluation non destructives des propriétés du bois

#### 1.5.2.1 Définition de l'évaluation non destructive

D'une façon générale, l'évaluation non destructive (END) est définie comme étant l'ensemble des procédés et des outils effectuant l'examen et le test des propriétés mécaniques, chimiques et physiques d'une structure sans l'altérer et reste fonctionnelle

pour une utilisation ultérieure (Dumont-Fillon, 1996). L'intérêt principal de ces procédés est la détection des défauts internes des matériaux à caractères homogènes et isotropes. Dans notre cas, ces défauts sont présents dans le bois comme des irrégularités naturelles (Ross, 1992). Pour cela, lorsque le bois est le matériau en question, on parle souvent d'une évaluation non destructive (END) à la place du contrôle non destructif (CND) (Brashaw et al., 2009; Ross et Pellerin, 1994). Les procédés d'évaluation non destructifs possèdent plusieurs points forts principalement la rapidité, la fiabilité et l'économie des coûts. Par conséquent, les industries forestières et les utilisateurs du bois visent à développer et améliorer de plus en plus des méthodes de caractérisation non-destructives (Dündar et Divos, 2014). On distingue plusieurs méthodes d'END résumées dans le tableau 1.3 (Bucur, 2013).

Tableau 1.3 : Classification des méthodes d'END du bois selon ses propriétés physiques, adapté par Bucur (2013)

<b>Propriétés du bois</b>	<b>Propriétés mesurées</b>	<b>Techniques</b>
<b>Teneur en humidité</b>	Propriétés diélectriques	Impédance DC et haute fréquence, micro-ondes, infrarouge, NMR
	Propriétés thermiques	Infrarouge
	Absorption des rayons ionisants	Rayons X, Rayons gamma
	Propriétés élastiques	Méthodes de résonance de fréquence, et d'ultrasons
<b>Masse volumique</b>	Poids	Méthode gravimétrique
	Rayons ionisants	Micro-densitomètre à rayons X, atténuation des rayons X, bêta et gamma
	Propriétés diélectriques	Technique de micro-ondes

<b>Propriétés du bois</b>	<b>Propriétés mesurées</b>	<b>Techniques</b>
	Propriétés mécaniques	Pilodyne/ résistographe
<b>Direction de la fibre</b>	Propriétés élastiques	Vitesse ultrasonore
	Propriétés diélectriques	Technique de micro-ondes
	Diffusion de la lumière	Laser, lumière visible
	Propriétés thermiques	Infrarouge
<b>Détection des nœuds</b>	Propriétés optiques	Caméra CCD, colorimétrie
	Propriétés élastiques	Tomodensitométrie CT
	Rayonnement ionisant	Rayon X/CT, rayon gamma/CT
	Propriétés thermiques	Thermographie infrarouge, thermographie laser
	Propriétés électriques	Micro-ondes, NMR
<b>Détection de pourriture</b>	Propriétés élastiques	Vibration, ultrasons
	Propriétés mécaniques	Pilodyne/ Résistographe
	Propriétés diélectriques	Micro-ondes
	Rayons ionisants	Rayon X/CT
<b>Propriétés mécaniques</b>	Propriétés statiques	Contrainte de flexion, etc
	Propriétés dynamiques	Méthodes de vibration et ultrasons
	Propriétés acoustiques	Émission acoustique

### 1.5.2.2 Méthodes d'évaluation non destructives de la masse volumique du bois

#### 1.5.2.2.1 Absorptiométrie des radiations ionisantes

De nos jours, l'absorptiométrie est couramment exploitée au niveau de la recherche scientifique ainsi qu'au niveau industriel grâce à sa méthode efficace de mesure locale de la masse volumique du bois (Bættig et Ricardo, 2005). Cette méthode est basée sur

la mesure de l'atténuation des rayons X ou gamma qui est en relation avec la masse volumique de l'échantillon sous une teneur en humidité constante. Spécifiquement, les rayons X sont exploités souvent lors de la caractérisation du bois. En effet, ces rayons sont utilisés pour évaluer la teneur en humidité à l'aide de l'atténuation du rayonnement ou la diffusion cohérente, l'angle de microfibrilles à l'aide de la diffraction de rayons X et la masse volumique du bois à l'aide de la densitométrie à rayon X. En s'intéressant à la masse volumique du bois, puisque cette propriété est considérée l'attribut principal de la qualité du bois, les outils de sa mesure sont actuellement développés. En effet, ils donnent lieu à balayer les cernes de la moelle jusqu'à l'écorce de l'échantillon afin de créer les profils intracernes de la variation de la masse volumique. Le point fort de ces techniques est de fournir la variation de la masse volumique de la moelle à l'écorce du bois initial et du bois final pour tous les cernes annuels (Koubaa et al., 2002).

#### 1.5.2.2.2 Spectroscopie proche infrarouge

Des études récentes montrent que la spectroscopie infrarouge proche (Figure 1.8) permet d'estimer rapidement les propriétés, du bois et spécifiquement sa densité (Schimleck et al., 2001). Pour travailler sur une base opérationnelle, des courbes de calibration doivent être préparées sur des échantillons de sources variables, dont les conditions de croissance. Leurs performances doivent ensuite être évaluées par rapport à d'autres échantillons de la nouvelle population (Jones et al., 2005)

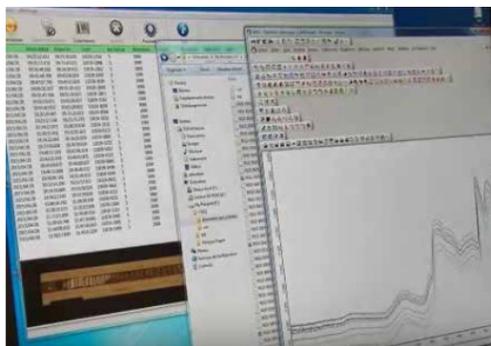


Figure 1.8 : Spectroscopie proche infrarouge (Giroud et al., 2020)

Les études développées avec cette méthode révèlent que le calibrage adéquat de la spectroscopie permettrait l'élaboration d'un instrument d'essai universel. Ce dernier sera capable de prévoir une importante gamme des propriétés du bois à l'aide d'un seul spectre (Jones et al., 2005; Schimleck et al., 2001).

#### 1.5.2.2.3 Le résistographe

Le résistographe est un appareil permettant de réaliser un diagnostic de la densité des arbres (Lopez Saez et al., 2010). Cet outil est conçu sous la forme d'une perceuse qui contient une imprimante et une unité de stockage des données numériques (Figure 1.9) (Rinntech,é 2015). Cette méthode mesure la résistance d'un matériau lors de l'avance d'un foret avec un diamètre qui varie entre 1,5 mm et 3 mm. Son principe de fonctionnement est basé principalement sur la corrélation entre la résistance du matériau à la pénétration du foret et la densité. Ce test permet de visualiser la représentation graphique de la résistance du foret de perçage par rapport à la profondeur de pénétration (jusqu'à 50 points de mesure par mm). De plus, plusieurs études antérieures ont approuvé que le résistographe est un outil fiable permettant d'identifier la pourriture dans le bois (De Oliveira Feio, 2005; Lopez Saez et al., 2009).

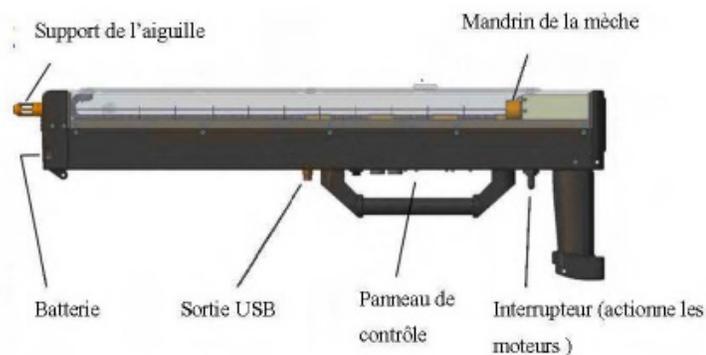


Figure 1.9 : Dispositif du résistographe (Rinntech, 2015)

### 1.5.2.3 Méthodes d'évaluation non destructives du module d'élasticité du bois

#### 1.5.2.3.1 Les méthodes de résonance

Le calcul du module d'élasticité par la mesure des vibrations dans le bois a été développé vers les années 1970 (Haines et al., 1996). La méthode de résonance se traduit principalement par la détermination de la fréquence de résonance d'un objet vibrant et cette fréquence à son tour est une propriété importante dans la caractérisation de la qualité du matériau (Damodarasamy, 2009). Cette technique consiste à frapper l'échantillon à l'aide d'un marteau afin de recevoir le signal à partir d'un microphone sans fil (Sobue, 1986). Cette technique exige d'une part que le marteau doive avoir un poids semblable à celui de l'échantillon dans le but de fournir suffisamment d'énergie pour l'exciter sans la détruire. D'autre part, le microphone doit se placer à proximité de l'échantillon afin de recevoir le son rayonné par l'échantillon à la suite du coup de marteau (Haines et al., 1996). Ensuite, un traitement de données sera effectué en déterminant les résonances par un micro-ordinateur et une analyse de fréquence du signal (Sobue, 1986). Ce signal électrique généré par le microphone sera transmis à un oscilloscope de stockage numérique à transformer de Fourier afin de traiter les données. Finalement, le module de Young sera calculé par la plus grande fréquence affichée sur l'écran de l'oscilloscope qui est la fréquence de résonance. Selon le mode de vibration, il y avait plusieurs méthodes de résonance telles que la résonance longitudinale et la résonance en flexion (Haines et al., 1996).

#### 1.5.2.3.2 Technique d'ultrasons

L'onde ultrasonique est une onde de type mécanique dont sa fréquence varie entre 20 kHz et 1 GHz (Beall, 1987). Avant, les techniques d'ultrasons ont été utilisées seulement pour les matériaux à caractère homogènes isotropes. Cependant, grâce aux avantages offerts par ces techniques telles que la rapidité et la précision, les méthodes d'ultrason sont aussi exploitées pour les matériaux orthotropes, anisotropes, etc. (Beall,

2002). Dans ce contexte, ces méthodes ont tiré l'attention des chercheurs dans le domaine du bois. En effet, dans nombreuses application, les techniques d'ultrason sont exploitées en allant de l'évaluation de la qualité du bois des arbres sur pied à l'évaluation des structures en bois en service (De Oliveira et Sales, 2006).

Pour le bois, vu les irrégularités naturelles structurelles du bois, le choix de l'outil ultrasonique est très important dès le début du diagnostic dans le but d'obtenir la bonne résolution. Cette dernière est liée directement à la fréquence de transducteur utilisée. Pour cela, il faut utiliser des fréquences plus élevées, car la propagation des ondes d'ultrason devient plus évidente (Bucur, 2006). Dans ce contexte, des transducteurs ayant des fréquences entre 100 et 200 kHz peuvent être exploités pour les matériaux à base de bois (Beall, 2002).

L'évaluation par ultrasons en utilisant la transmission est parmi les techniques les plus exploitées pour les matériaux à base de bois. L'outillage de cette technique contient deux transducteurs piézoélectriques (un émetteur et l'autre récepteur), un générateur de signal qui produit le signal d'impulsion d'ultrasons et un dispositif qui mesure le temps de transmission de l'impulsion ultrasonore par l'échantillon (Figure 1.10) (Chiu et al., 2013).

La technique d'ultrason par transmission est basée sur la mesure du temps de propagation du son dans l'échantillon. En effet, cette technique commence par une émission d'une onde ultrasonore carrée à l'aide du générateur d'ultrasons. Cette onde est envoyée au compteur de fréquence et au circuit de synchronisation afin d'effectuer l'activation du signal de démarrage de la mesure de différence de temps. Ensuite, le transducteur récepteur reçoit les impulsions ultrasonores émises et les transformer en impulsions électriques. Ces dernières sont introduites dans le circuit de synchronisation et l'oscilloscope. En fin, le signal à basse tension est transmis par le circuit de synchronisation au compteur de fréquence afin que le signal d'arrêt de la mesure de différence de temps soit actif (Yang et Fortin, 2001). Après la mesure du temps de

propagation du son dans le bois, le module d'élasticité dynamique sera calculé par l'équation 1.12 :

$$E = \rho \times V^2 \quad (1.12)$$

Avec

V: la vitesse de l'onde de contrainte telle que :  $V = \frac{d}{T'}$  [m/s] ;

$\rho$  : la masse volumique de l'échantillon de bois [ $\text{kg.m}^{-3}$ ] ;

d: l'épaisseur de l'échantillon [m] ;

T': le temps de transmission [s].

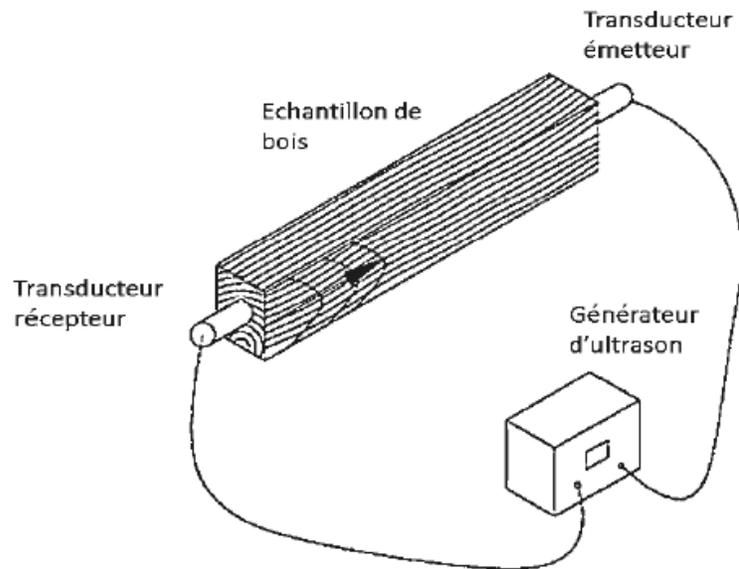


Figure 1.10 : Méthode de mesure du temps de propagation du son dans le bois par la technique d'ultrason (Feio, 2005)

#### 1.5.2.3.3 Imagerie acoustique

L'imagerie interne des matériaux a suscité un grand intérêt auprès des industriels et des chercheurs vu qu'elle permet d'évaluer différentes caractéristiques des matériaux comme l'évaluation locale du module d'élasticité des troncs d'arbres. Cet intérêt a conduit au développement et à l'amélioration de divers équipements commerciaux de

haute technologie sur le marché (Reis, 2017). En s'intéressant principalement à la tomographie ultrasonique, cette technique est la plus exploitée dans les produits en bois et les applications sur le terrain, telles que les poteaux en bois utilisés pour distribuer l'énergie électrique ou les ailes d'avion, etc. (Giammei et al., 2008; Reis, 2017; Tomikawa et al., 1986). Les images tomographiques peuvent fournir des informations importantes pour évaluer les risques associés aux arbres, y compris la détection des défauts internes (Giammei et al., 2008; Reis, 2017; Tomikawa et al., 1986).

Le principe de fonctionnement de la tomographie acoustique est basé sur la pénétration des ondes sonores dans l'arbre. En effet, cette technique consiste à installer un certain nombre de capteurs (selon le diamètre) sur le tronc de l'arbre et à introduire une onde sonore de contrainte à chaque fois (Figure 1.11). L'un des capteurs agit comme un émetteur et les autres capteurs agissent comme des récepteurs, tout en mesurant le temps de propagation entre l'émetteur et tous les autres récepteurs (Bucur, 2005). En fin de processus, à partir du maillage de mesure établi par les différents chemins des ondes, on peut obtenir des itinéraires de mesure que leur quantité soit liée au nombre de capteurs installés. En d'autres termes, un réseau dense des vitesses est obtenu en associant leurs variations à des couleurs pour faciliter la visualisation de l'image construite à l'aide d'un logiciel d'interpolation (Reis, 2017).

Étant donné que la tomographie acoustique ne peut que détecter la présence ou l'absence des défauts interne, cette technique est considérée comme plus ou moins compliquée, et sa plus grande limitation est l'interprétation de l'image générée. Cependant, l'un des avantages les plus importants de la tomographie est que son imagerie permet l'identification et la quantification des défauts (Reis, 2017). De même, la qualité de l'image obtenue dépend principalement de la puissance de l'équipement utilisé et à la qualité et la quantité des données obtenues sur le site d'étude (Reis, 2017). Selon l'équipement utilisé, des images 2D ou même des images 3D peuvent être obtenues afin de visualiser toute la structure interne des arbres sur pied (Bucur, 2005).

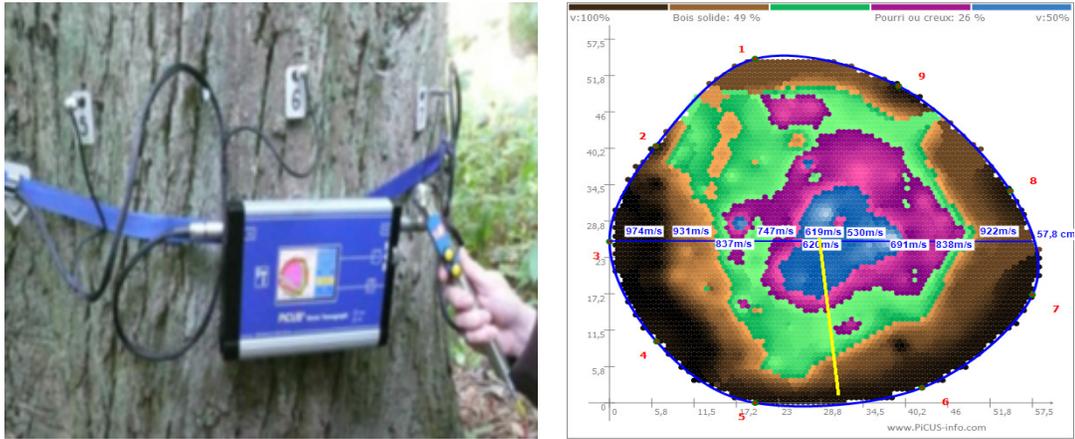


Figure 1.11 : Exemple d'un diagnostic d'une section transversale d'un tronc d'arbre à l'aide de la tomographie acoustique

### 1.5.3 Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique

Plusieurs études ont été menées pour déterminer la relation entre les constantes élastiques déterminées par des résultats d'essais conventionnels et celles déterminées par des méthodes dynamiques non-destructives, dont les méthodes de transmission ultrasonore et la technologie d'excitation par impulsions. La plupart de ces études sont arrivées à la même conclusion que quelle que soit la méthode utilisée, les modules d'élasticité statiques et dynamiques sont fortement corrélés (Horáček et al., 2012; Koubaa et al., 2012; Sales et al., 2011). La figure 1.12 révèle la corrélation entre les modules élastiques dynamiques (MOED) et statiques (MOES) de différentes essences de bois. Un coefficient de détermination ( $R^2=0,62$ ) a été obtenu entre le MOED obtenu par la méthode de transmission ultrasonore et le MOES obtenu par l'essai de compression parallèle (Koubaa et al., 2012). Le coefficient de corrélation dépend également de l'essence et de la technique du test dynamique utilisé.

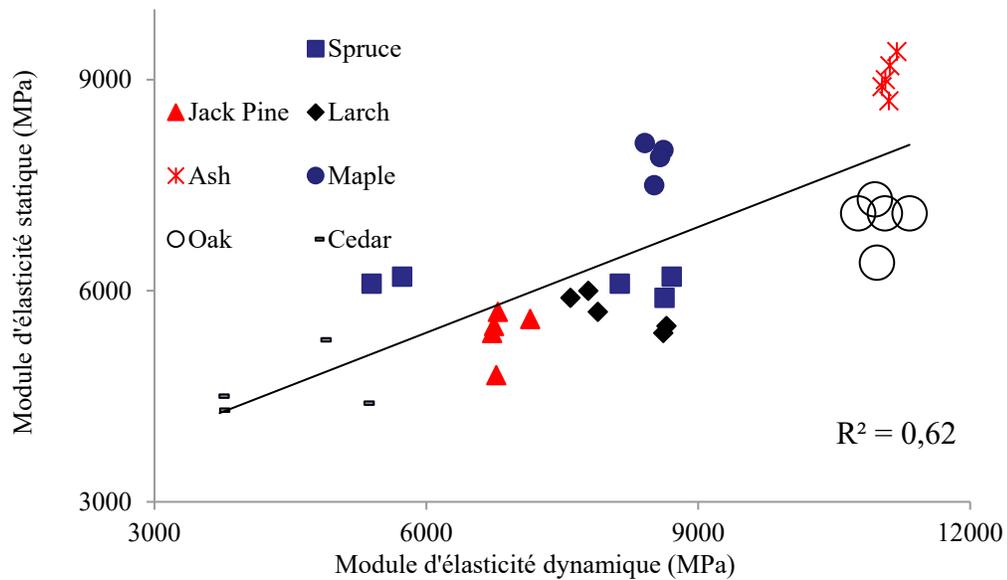


Figure 1.12 : Relation entre les modules d'élasticité dynamique et statique de différentes essences de bois (Koubaa et al., 2012)

Les valeurs du MOED et du MOES permettent de tirer certaines constatations. En effet, les valeurs du MOED sont relativement plus importantes que celles des valeurs du MOES en flexion ou en compression suivant les différentes directions. Dackermann et al. (2016) ont montré que le MOED déterminé par la technique ultrasons est 2,2 fois plus grand que celui du MOES. De plus, l'étude développée par Haines et al. (1996) prouve que les valeurs du MOED sont fréquemment supérieures à celles du MOES à des pourcentages qui varient entre 7 et 40% selon l'essence étudiée. Cette amplification est expliquée par plusieurs raisons. D'une part, le comportement viscoélastique et la capacité d'absorption des chocs élevée du bois expliquent les valeurs élevées du MOED par rapport au MOES (Kharrat, 2016). D'autre part, l'étude Chiu et al. (2013) montre une autre approche basée sur les caractéristiques vibratoires du bois où la force élastique restaurée présente une variation proportionnelle au déplacement. En revanche, la force dissipative est proportionnelle à la vitesse. Par conséquent, si on applique une force pour une courte durée sur le bois, ce dernier présente un

comportement élastique solide, mais si la force appliquée demeure relativement pour une longue période, le bois se comporte comme un liquide visqueux. Ce comportement se présente davantage dans le test statique (longue durée) que le test dynamique par la méthode d'ultrason.

## 1.6 Objectifs et hypothèses

L'objectif général du projet est d'étudier l'effet de la coloration et de la carie sur les propriétés mécaniques du bois de l'érable à sucre en utilisant des méthodes de caractérisation non destructives.

Afin de répondre à l'objectif ci-dessus, nous faisons appel aux objectifs spécifiques suivants ainsi qu'une hypothèse accordée à chaque objectif :

O1 : Analyser les variations intracernes et radiales du module d'élasticité dynamique (MOED) à l'aide des outils non destructifs.

H1 : La superposition des courbes de variation radiale de la vitesse de propagation de l'onde sonore et de la masse volumique du bois permettra de calculer le module d'élasticité dynamique (MOED) et d'analyser sa variation non seulement à l'échelle de l'arbre mais aussi à l'échelle du cerne.

O2 : Étudier la variation intra-arbre des modules d'élasticité statiques en utilisant des outils destructifs et des modules d'élasticité dynamiques en utilisant des outils non destructifs.

H2 : Les modules d'élasticité statiques et dynamiques diminuent du bois sain vers le bois carié ou coloré dans l'arbre.

O3 : Caractériser la proportion de la carie et de la coloration chez les arbres afin d'évaluer son impact sur les propriétés mécaniques du bois notamment le module d'élasticité statique (MOE) et dynamique (MOED) non seulement à l'échelle de l'arbre, mais aussi à l'échelle du cerne.

H3 : Une augmentation de la proportion de la carie et de coloration de l'arbre engendre une perte des propriétés mécaniques du bois.

O4 : Établir des corrélations entre les modules d'élasticité dynamiques et statiques afin d'évaluer le potentiel et la fiabilité des outils acoustiques pour prédire l'impact de la carie et de la coloration sur les propriétés mécaniques du bois.

H4 : Les techniques non destructives appliquées (tomographe et ultrason) donnent lieu de prévoir avec précision les modules d'élasticité statiques (en flexion et en compression parallèle) et de prévoir l'impact de la carie et de la coloration sur ces propriétés.

## CHAPITRE II

### MATÉRIEL ET MÉTHODES

#### 2.1 Sommaire

Le deuxième chapitre est consacré à l'explication des méthodes expérimentales mises en place. Au début, ce chapitre détaille les matériels expérimentaux utilisés tels que les sites d'étude, leurs caractéristiques ainsi que l'échantillonnage adopté tout au long de cette étude.

En outre, ce chapitre montre également les caractéristiques des techniques et des dispositifs expérimentaux utilisés : le densitomètre à rayon X, l'appareil universel Zwick, le tomographe acoustique et le générateur d'ultrason.

La dernière partie présente les méthodes statistiques utilisées afin d'évaluer l'effet de la coloration et la carie du bois sur les propriétés étudiées notamment la masse volumique et les modules d'élasticité statiques et dynamiques.

#### 2.2 Caractéristiques et localisation des sites expérimentaux

Le matériel expérimental utilisé dans cette étude provient des sites choisis à partir des cartes produit par le service des inventaires du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Quatre sites situés en Abitibi-Témiscamingue (Belleterre (T01) et Louvicourt (T02)) et La Tuque (Zec-Bessone (T32) et Lac-Édouard (V02)) ont été sélectionnés (Figure 2.1) dont leurs caractéristiques sont présentées au Tableau 2.1. Le

critère de base pour la sélection des sites est dû au fait que le type écologique FE32 (érablière sur site mésique) y est présent. Principalement, les sites de la présente étude sont considérés des érablières nordiques typiques du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest et ils possèdent aussi un drainage mésique. De plus, ces sites ont été placés de façon à couvrir l'ensemble de l'étendue du sous-domaine bioclimatique étudié.

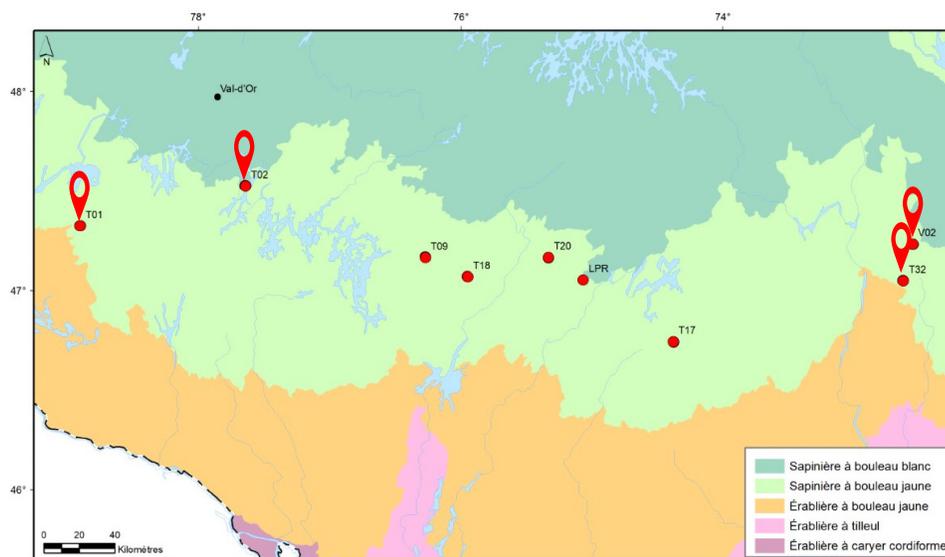


Figure 2.1 : La carte de l'emplacement des quatre sites d'études (MFFP, 2022)

Tableau 2.1 : Caractéristiques des sites d'échantillonnage (MFFP, 2022)

Caractéristique	Sites			
	Belleterre	Louvicourt	Zec-Bessone	Lac-Édouard
Latitude (Nord)	47°,36'	47°,67'	47°,50'	47°,68'
Longitude (West)	-78°,68'	-77°,50'	-72°,51'	-72°,45'
Altitude (m)	370	363	430	433

Caractéristique	Sites			
	Belleterre	Louvicourt	Zec-Bessone	Lac-Édouard
Température moyenne (°C)	2,0	1,4	1,6	1,8
Pluviométrie annuelle (mm)	1002,9	908,0	996,3	987,6
Situation sur la pente	Mi-pente	Sommet arrondi	Haut de pente	Sommet arrondi
Nombre d'arbres	9	9	25	28
DHP (mm)	360 (245-504)	334 (236-429)	334 (106-511)	334 (134-522)

### 2.3 Échantillonnage

Les arbres des érables à sucre ont été choisis aléatoirement pour chacun des quatre sites. Pour répondre à l'objectif du projet, deux types d'échantillonnage ont été effectués: 1) un échantillonnage pour la caractérisation non-destructive se traduit par 53 arbres sur pied sélectionnés des sites de La Tuque pendant l'été 2019. Pour chaque arbre, une carotte de sondage (6 mm d'épaisseur et de longueur de l'écorce jusqu'à la moelle) a été prélevée au niveau du diamètre à hauteur de poitrine (DHP à 1,3m de la hauteur) ; 2) un échantillonnage pour la caractérisation destructive se traduit par 18 billes (9 billes par site) sélectionnées et récoltées des sites de l'Abitibi-Témiscamingue pendant l'été 2020. Ces billes sont prélevées entre une hauteur au-dessus du sol de 2 mètres et le DHP.

### 2.4 Mesure de la masse volumique

La masse volumique a été mesurée à l'échelle des cernes (carotte de sondage) pour le premier échantillonnage en utilisant le densitomètre à rayon X et à l'échelle des

échantillons d'essai pour le deuxième échantillonnage en mesurant le poids et les dimensions de chaque éprouvette du test de compression (Voir 2.4.2.2). De plus, pour les deux échelles, en passant de la moelle à l'écorce, les parties cariées/colorées et saines du bois ont été bien identifiées pour chaque arbre afin de mesurer la masse volumique moyenne de chaque partie.

Les échantillons des tests du densitomètre à rayon X ont été préparés à partir des carottes prises au DHP (Figure 2.2a). Ces dernières sont destinées à étudier les variations intersites et inter arbres de la masse volumique du cerne, du bois initial et du bois final.

Les carottes sont d'épaisseur 6 mm, mais le densitomètre à rayon X ne peut analyser que des échantillons d'épaisseur de 1,57 mm dans le sens longitudinal. Donc, dans un premier temps, les carottes sont sciées pour réduire son épaisseur de 6 à 1,57 mm. À l'aide de l'extracteur Soxhlet (Figure 2.2b), les carottes sont extraites dans une solution 2:1 (v/v) de cyclohexane et d'éthanol durant 24 heures, puis dans l'eau distillée durant un autre 24 heures afin d'enlever les substances extractibles (Grabner et al., 2005). Après extraction, les carottes sont rincées et séchées à l'air ambiant durant une semaine sous une charge afin d'éviter leur déformation lors du séchage et d'atteindre une teneur en humidité d'équilibre de 8% avant les tests.

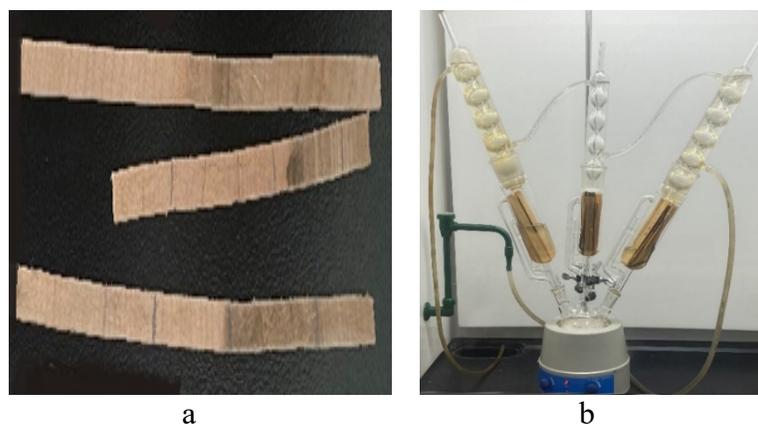


Figure 2.2 : a) Les carottes de sondages; b) Le Soxhlet (Dispositif d'extraction)

L'évaluation de la densité des cernes est réalisée à l'aide de la densitométrie à rayon X (Quintek Measurements System (QMS)) (Figure 2.3a). Cet instrument est équipé d'une caméra vidéo qui permet de scanner les cernes des échantillons de la moelle à l'écorce en se basant sur l'atténuation du rayon X avec une résolution linéaire de 0,01 mm. De ce fait, un profil de densité par échantillon est généré par le logiciel "Tree Ring Analyser" qui permet de fournir les variations radiales ou annuelles de la densité (Figure 2.3b). Ce profil permet de déterminer la masse volumique des cernes du bois initial et du bois final et l'âge cambial des arbres.

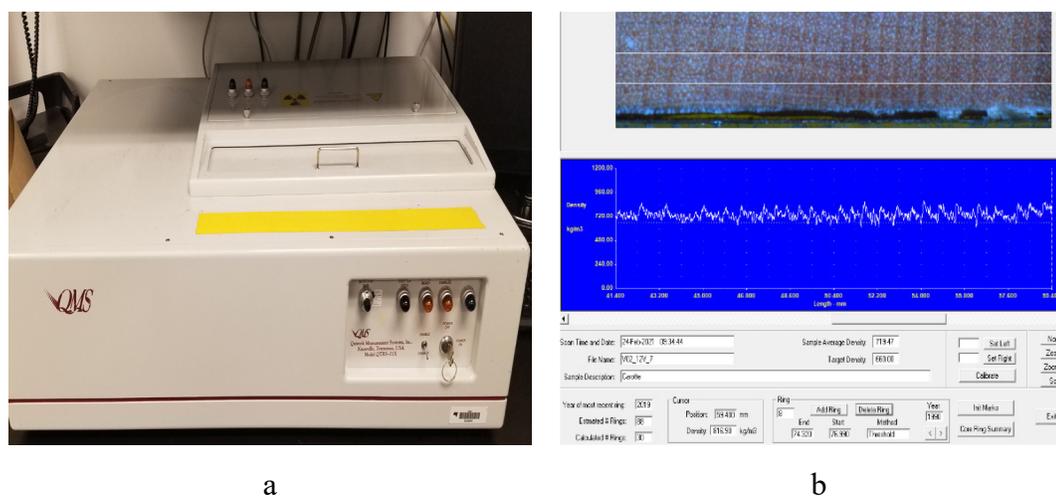


Figure 2.3 : a) Le densitomètre à rayon X; b) Exemple d'une carotte scannée par le densitomètre à rayon X

## 2.5 Mesure des propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques étudiées dans cette partie sont les modules d'élasticité statiques (en flexion trois-points ( $MOES_F$ ) et en compression parallèle ( $MOES_C$ )) et les modules d'élasticité dynamiques (d'ultrason ( $MOED_U$ ) et du tomographe acoustique ( $MOED_T$ )). Ces modules servent à prédire le comportement du bois sous l'action des contraintes externes afin de prévoir son propre comportement en service.

Ces propriétés mécaniques ont été mesurées par des méthodes destructives et autres non destructives. Les modules d'élasticité statiques ont été évalués par des méthodes destructives. En effet, les billes ont été débitées en des petites éprouvettes (Figure 2.4) afin d'être mesurées en utilisant l'appareil d'essais universel de Zwick. Cependant, les modules d'élasticité dynamiques ont été évalués par des méthodes non destructives en se basant sur la mesure de la vitesse de propagation de l'onde sonore dans le bois. En effet, les arbres sur pied et les billes (avant d'être débité) ont été mesurés à l'aide du tomographe acoustique. De plus, pour les tests d'ultrason, les vitesses de propagation des ondes ultrasonore ont été mesurées sur les petites éprouvettes de la compression parallèle (Figure 2.4) avant qu'elles soient détruites par les essais de compression.

#### 2.5.1 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont préparées à partir de dix-huit billes d'érable à sucre de hauteur 50 cm et ayant différents diamètres. Chaque bille a été débitée dans le sens longitudinal sous forme des planches d'épaisseur de 2,7 à 3 cm dans le sens radial de la moelle à l'écorce (Figure 2.4). Par la suite, ces planches sont rabotées afin d'avoir l'épaisseur adéquat 25 mm avant qu'elles soient découpées en éprouvettes de 25 mm de largeur suivant la direction longitudinale. Ces éprouvettes sont découpées de nouveau à l'aide de la scie à panneaux en des petites éprouvettes en se référant à la norme ASTM D-143 (2000). Cette dernière exige une dimension de 25 x 25 x 410 mm<sup>3</sup> pour le test de flexion et une dimension de 25 x 25 x 100 mm<sup>3</sup> pour le test de compression parallèle (Figure 2.4). Par la suite, toutes les éprouvettes ont été séchées à l'air ambiant afin d'atteindre une humidité d'équilibre de 6 à 8%.

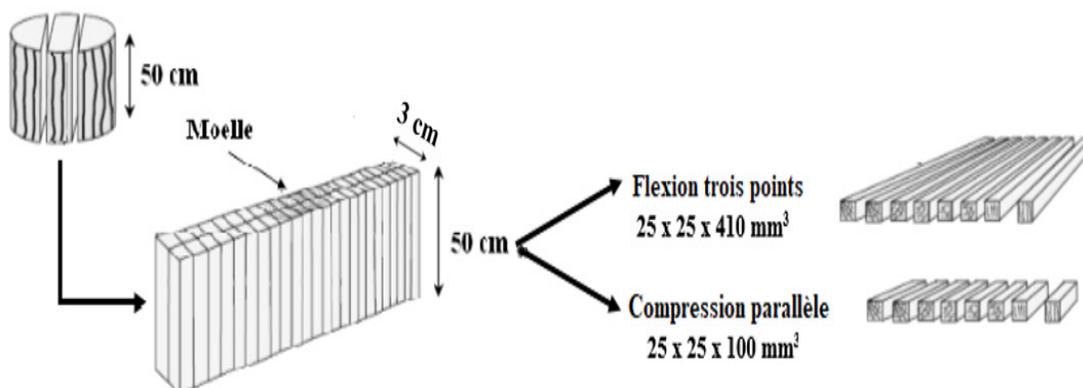


Figure 2.4 : Préparations des éprouvettes pour les tests de flexion à trois points et les tests de compression parallèle au fil

## 2.5.2 Méthodes destructives

### 2.5.2.1 Essai de flexion à trois points

Avec l'essai de flexion à trois points, on cherche à déterminer le module d'élasticité statique en flexion ( $MOES_F$ ). Ce module est parmi les propriétés mécaniques fournies par ce test et il est considéré comme étant le caractère mécanique le plus exploité pour connaître le comportement du bois en service. Le  $MOES_F$  permet de calculer la charge admissible par la pièce. Il est obtenu avec des éprouvettes de dimension  $25 \times 25 \times 410 \text{ mm}^3$  d'après la norme ASTM D-143. Ces essais ont été réalisés sur un banc de flexion à trois points à l'aide de l'appareil universel Zwick ayant un capteur de force de 20 kN. Cet appareil permet d'assurer une vitesse constante d'application de la charge de précision 1%. Il est muni d'un dispositif permettant d'appliquer une force sur la surface latérale de l'éprouvette à mi-distance des deux appuis (Figure 2.5a). Dans notre cas, la distance prise entre les deux appuis correspond à 375 mm et la vitesse d'essai est de 1,3 mm/min. Afin d'éviter d'aller au-delà de la zone élastique, le taux de variation du MOE est mesuré dans un intervalle de 10% à 40% de la charge maximale à la rupture. De plus, un extensomètre spécifique pour cet essai a été exploité pour la mesure du

MOES<sub>F</sub> et sa détermination est faite en utilisant l'équation suivante (Équation 2.1) (Jessome, 1977).

$$\text{MOES}_F = \frac{\Delta P \times L^3}{\Delta \delta \times 4b \times d^3} \quad (2.1)$$

Avec :

- P : charge appliquée ;
- $\delta$  : déformation mesurée à la limite proportionnelle ;
- b : largeur de l'échantillon ;
- d : épaisseur de l'échantillon ;
- L : distance entre les deux appuis.

#### 2.5.2.2 Essai de compression parallèle au fil

L'essai de compression parallèle au fil sert à déterminer la résistance du bois à supporter les charges en service à l'exemple des meubles ou à supporter les forts poids comme les poutres. En se référant à la norme ASTM D-143, ce test a été effectué sur des éprouvettes de dimension 25 x 25 x 100 mm<sup>3</sup> et avec une vitesse de 0,305 mm/min afin de mesurer le module d'élasticité statique longitudinale (MOES<sub>C</sub>). Cet essai est géré sur un cylindre droit (Figure 2.5b) en utilisant la machine universelle Zwick ayant une charge maximale de 20 kN. De plus, un extensomètre à jauge de contrainte mécanique de type "clipsable" est utilisé pour chaque essai afin d'améliorer la précision de la mesure.



Figure 2.5 : a) Banc d'essai pour la mesure du MOE en flexion ; b) Banc d'essai pour la mesure de la résistance en compression parallèle (ASTM-D143)

### 2.5.3 Méthodes non destructives

#### 2.5.3.1 Mesures ultrasoniques

L'évaluation des propriétés mécaniques du bois en utilisant la méthode ultrasonique a été effectuée avec un générateur d'ultrason Sonatest Mastrecam 380 (Texas, États-Unis) (Figure 2.6). Cet instrument mesure le temps de propagation de l'onde sonore à partir de deux transducteurs. Ces derniers sont fixés sur les deux extrémités de l'éprouvette, dont, à l'aide d'un dispositif permettant d'appliquer une pression constante pour avoir une lecture stable du temps de propagation de l'onde (Figure 2.6). Les éprouvettes utilisées dans ce test sont les mêmes que celles du test de compression parallèle. Leurs dimensions et leurs poids sont mesurés pour le calcul de la masse volumique apparente. L'objet de ce test est d'évaluer le module d'élasticité dynamique (MOED). Ce module dépend de deux paramètres, dont la masse volumique apparente de l'éprouvette ( $\rho_a$ ) et la vitesse de propagation de l'onde ( $V_b$ ) (Équation 2.2).

$$MOED = \rho_a V_b^2 \quad (2.2)$$

La masse volumique apparente a été calculée selon la formule ci-dessous.

$$\rho_a = \frac{M_h}{V_h} \quad (2.3)$$

Avec :

- $M_h$  : La masse humide de l'échantillon (kg) ;
- $V_h$  : Le volume humide de l'échantillon (m<sup>3</sup>) ;
- $\rho_a$  : La masse volumique apparente du bois (kg.m<sup>-3</sup>).

La vitesse de propagation a été calculée en utilisant la formule qui suit.

$$V_b = \frac{d_b}{t_b - F_c} \quad (2.4)$$

Avec :

- $V_b$  : La vitesse de propagation de l'onde sonore dans le bois (m/s) ;
- $d_b$  : La distance mesurée de l'échantillon de bois (m) (Figure 2.6) ;
- $t_b$  : Le temps mesuré dans l'échantillon de bois (s) ;
- $F_c$  : Le facteur de correction (s).

Le temps de propagation de l'onde sonore mesuré par le générateur d'ultrason contient aussi le temps parcouru par le circuit électrique. Pour cela, au premier lieu, il faudrait calculer le facteur de correction (Équation 2.5) à l'aide d'un échantillon en plexiglas comme étant un échantillon de référence (Bouhajja, 2015; Kharrat, 2016). Dans notre cas, le temps de propagation est mesuré dans le sens longitudinal de chaque éprouvette.

$$F_C = t_r - \frac{d_r}{V_r} \quad (2.5)$$

Avec :

- $t_r$  : Temps de propagation à travers l'échantillon de référence en plexiglas (s) ;
- $d_r$  : Distance mesurée de l'échantillon de référence (m) ;
- $V_r$  : Vitesse de référence du matériau de plexiglas qui est égale à 2760 m/s pour la direction longitudinale (Frenet, 2000).

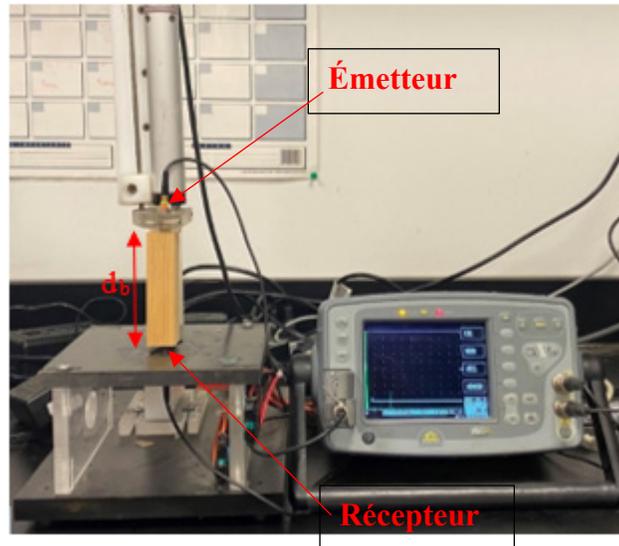


Figure 2.6 : Test d'ultrason en utilisant l'appareil Sonatest 380M

### 2.5.3.2 Tomographe acoustique

La caractérisation acoustique des arbres sur pied et des billes est réalisée à l'aide du tomographe à ondes sonores (Picus 3). Cet instrument est un outil non destructif qui détecte les cavités et la carie à l'intérieur des arbres. En effet, il fonctionne sur le principe que les ondes sonores traversant la décomposition se déplacent plus lentement que les ondes sonores traversant le bois sain (Göcke, 2017; Son et al., 2021). D'ailleurs, cette technique consiste à monter un certain nombre de capteurs (selon le diamètre) sur le pourtour d'une section transversale du tronc de l'arbre. Chaque capteur est relié à un clou enfoncé légèrement dans l'écorce (Figure 2.7). À chaque fois, l'un des capteurs est enlevé en tapant sur son clou par le marteau du tomographe (émetteur de l'onde) et les autres capteurs jouent le rôle des récepteurs de l'onde sonore. De ce fait, les temps de propagation des ondes induites par les petits coups du marteau sont enregistrés par les capteurs. En envoyant des ondes sonores à partir d'un certain nombre de points autour d'un tronc d'arbre vers le même nombre de points de réception, la vitesse relative du son peut être calculée. Par conséquent, un réseau dense des vitesses est obtenu sur toute la section transversale et représenté sur un tomogramme (Figure 2.8). Ce dernier

permet de fournir un maillage de différentes couleurs indiquant la présence ou non de cavités ou de foyers de pourriture à l'intérieur de l'arbre ainsi que le pourcentage du bois pourri ou creux (Göcke, 2017). Les couleurs noir et marron indiquent la présence du bois solide, la couleur verte indique la présence du bois de transition et les couleurs bleu et violet indiquent la présence du bois pourri.



Figure 2.7 : Installation du tomographe acoustique sur le tronc de l'arbre

La mesure précise de la dégradation dans un arbre sur pied à l'aide du tomographe acoustique (Picus 3) nécessite principalement les sept étapes suivantes :

1. Inspection visuelle de l'arbre afin de déterminer où les capteurs doivent être installés ;
2. Placement adéquat des points de mesure (PM) et fixation des clous en respectant la distance minimale (12 cm) ;
3. Mesure de la distance entre tous les clous à l'aide du compas électronique du tomographe afin de bien modéliser la géométrie du plan de mesure (la section transversale de l'arbre) ;
4. Saisie des données principales de l'arbre : nom, numéro de l'arbre, hauteur du plan de mesure, orientation nord-sud, etc.;

5. Installation du Picus 3 et mise en place des faisceaux de câbles pour capteurs sur l'arbre ;
6. Mesure des ondes sonores en tapant sur tous les PM à l'aide du marteau électronique du tomographe ;
7. Chargement des données de mesure sur le PC.

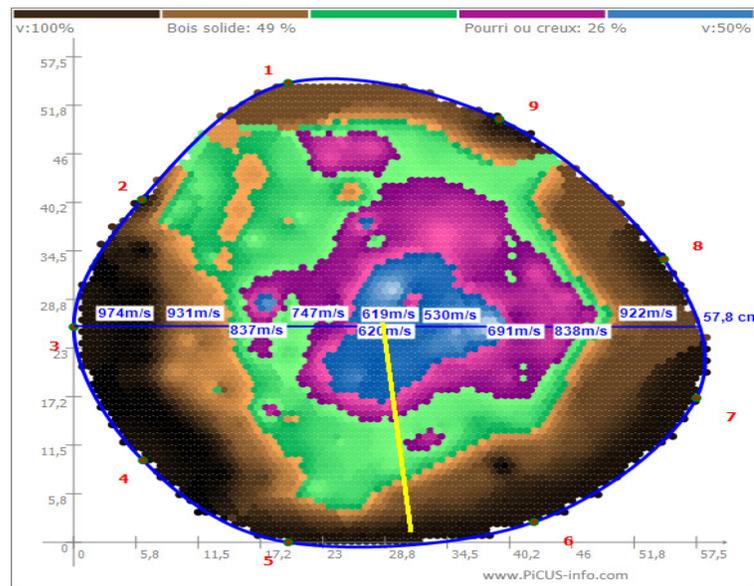


Figure 2.8 : Exemple d'un tomogramme fourni par le tomographe acoustique

Peu d'études qui ont utilisé le tomographe acoustique pour prédire les propriétés mécaniques. Pour cela, dans le cadre de ce projet, cet appareil a été utilisé non seulement pour détecter la présence des zones de pourriture, mais aussi pour mesurer le module d'élasticité dynamique. En effet, en utilisant l'équation 2.2, la masse volumique a été mesurée par le densitomètre à rayon X ou par l'équation 2.3 et la vitesse de l'onde sonore a été mesurée par le tomographe acoustique. Ensuite, les courbes de variation radiale (de la moelle à l'écorce) de la vitesse de propagation de l'onde sonore et de la masse volumique du bois ont été superposées afin de tracer le profil de la variation radiale du module d'élasticité dynamique (MOED). Les parties

cariées/colorées et saines du bois ont été ainsi bien identifiées pour chaque arbre afin de mesurer le MOED moyen de chaque partie.

## 2.6 Analyse statistique

Avant de débiter l'analyse statistique, les différentes variables du modèle doivent être clairement définies. En effet, les variables à expliquer, également appelées variables dépendantes, sont les propriétés mécaniques et physiques du bois, notamment la masse volumique et les modules d'élasticité dynamiques non seulement à l'échelle des billes, mais aussi à l'échelle des cernes et les modules d'élasticité statiques à l'échelle des billes.

Le but du modèle statistique est de déterminer la réponse de ces variables en fonction de divers facteurs explicatifs, dont le site (4 : Belleterre, Louvicourt, Zec Bessone et Lac-Édouard), la classe de diamètre qui consiste à regrouper les arbres selon leurs diamètres au DHP (un écart de 100 mm a été pris afin de regrouper les arbres 100, 200, 300, 400 et 500 mm) et la classe de coloration qui consiste ainsi à grouper les arbres selon le pourcentage de coloration (1 pour classe très pourrie (40% de coloration et plus), 2 pour la classe pourrie (20 et 40%) et 3 pour la classe colorée (0 et 20 %)).

En ce qui concerne les facteurs indépendants considérés, on note l'existence de deux types : les facteurs à effets fixes (niveaux prédéterminés et répondant à tous les niveaux) et les facteurs à effets aléatoires (dans lesquels les observations sont effectuées aléatoirement pour un nombre limité de niveaux). Dans la présente étude, tous les facteurs étudiés sont considérés comme des facteurs à effet fixes sauf l'arbre, qui a été considéré comme aléatoire. Pour cela, le modèle le plus approprié est le modèle linéaire mixte. En effet, ce modèle permet d'introduire des effets fixes et aléatoires ainsi que de traiter des données non équilibrées ou manquantes. De plus, le modèle mixte gère également des situations plus complexes, où les unités expérimentales sont nichées et présentent une structure hiérarchique. Cette analyse statistique a été effectuée à l'aide de la 28<sup>ième</sup> édition du logiciel SPSS (*Statistical*

*Package for Social Sciences*). Le seuil de signification est fixé à 0,05 ( $p=0,05$ ) afin de signaler les effets des facteurs et des interactions significatifs.

L'équation 2.6 montre le modèle utilisé pour analyser les effets de la coloration du bois sur la masse volumique et les propriétés mécaniques du bois étudiées.

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + \gamma_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\chi)_{ik} + (\beta\chi)_{jk} \quad (2.6)$$

Avec :

- $Y_{ijkl}$  : moyenne de la variable dépendante de l'arbre l, appartenant à la classe de diamètre k, provenant du site i et appartenant à la classe de coloration j ;
- $\mu$  : moyenne de la variable dépendante ;
- $\alpha$  : effet du site ;
- $\beta$  : effet de la classe de coloration ;
- $\chi$  : effet de la classe du diamètre ;
- $\gamma$  : effet de l'arbre ;
- $\alpha\beta$  : effet combiné du site et la classe de coloration ;
- $\alpha\chi$  : effet combiné du site et la classe du diamètre de l'arbre ;
- $\beta\chi$  : effet combiné de la classe de coloration et la classe du diamètre.

## CHAPITRE III

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Sommaire

Le dernier chapitre comprend trois parties principales. La première partie introduit une analyse descriptive générale et traite les variations radiales intracerne afin de répondre à l'objectif spécifique O1 ainsi que l'étude des comportements statiques et dynamiques intra-arbre des différentes propriétés étudiées afin de répondre à l'O2.

Ensuite, une discussion approfondie a été menée à l'aide d'une analyse de variance dans le but d'analyser l'impact de la coloration du bois sur la qualité du bois de l'érable à sucre et par la suite répondre à l'O3.

Enfin, pour obéir à l'O4, la dernière partie montre une étude de corrélation entre MOED et la masse volumique à l'échelle des cernes annuels d'une part, et une analyse de corrélation entre le MOED et la masse volumique ainsi qu'entre les MOED et les MOES d'autre part.

#### 3.2 Variation intracerne de la masse volumique et du module d'élasticité dynamique

##### 3.2.1 Variation de la moelle à l'écorce de la masse volumique et du module d'élasticité dynamique

On présente dans la figure 3.1 un aperçu de la variation intra-arbre du MOED ainsi que la masse volumique. L'axe des abscisses est pris aléatoirement dont ses valeurs ne sont pas représentatives. On remarque une répétition périodique d'un pic tout le long de l'échantillon pour les deux grandeurs. Chaque pic représente l'une des caractéristiques du cerne de croissance à part sa composition du bois initial (BI) et du bois final (BF). De plus, on constate pour chaque cerne de croissance, les deux grandeurs augmentent d'une façon progressive au niveau du bois initial en allant jusqu'à leurs maximums à peu près la moitié du bois final. Par la suite, ces deux propriétés commencent à décroître progressivement jusqu'à atteindre des valeurs minimales au niveau de la frontière qui sépare deux cernes annuels consécutifs.

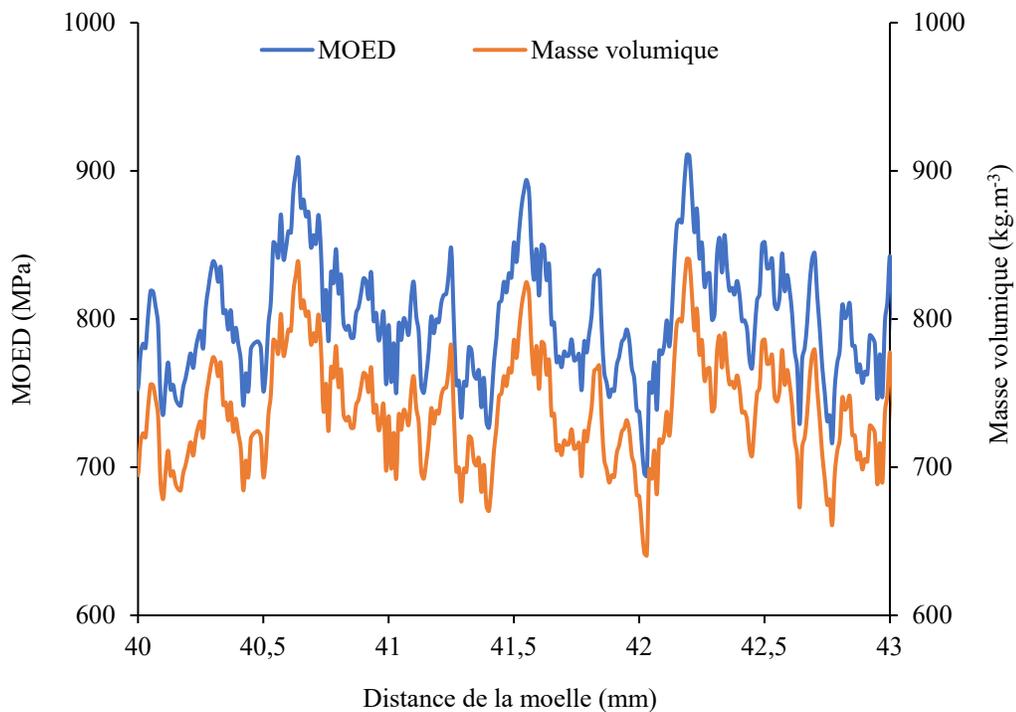


Figure 3.1 : Exemple de la variation du module d'élasticité dynamique (MOED), déterminé par le tomographe acoustique, et de la masse volumique, déterminée par le densitomètre à rayon X, le long d'une carotte

### 3.2.2 Modélisation du profil radial du module d'élasticité dynamique

En se référant à l'étude établie par Koubaa et al. (2002), le profil de la masse volumique peut suivre le profil d'une fonction polynomiale de 6<sup>e</sup> degré. Puisque la figure 3.1 montre que les profils radiaux du MOED et de la masse volumique sont pareils, le profil du MOED peut à son tour suivre le profil d'une fonction polynomiale de 6<sup>e</sup> degré. Inspirée par la même étude, la même approche a été utilisée afin de modéliser le MOED. La figure 3.2 montre un exemple de la variation des valeurs expérimentales et estimées du MOED à l'intérieur d'un cerne de croissance. En effet, les valeurs estimées de la fonction polynomiale du 6<sup>e</sup> ordre du MOED correspondent assez bien aux valeurs expérimentales avec un coefficient moyen égal à 0,77. Il semble que cette méthode suivie décrit bien le profil intracerne du module d'élasticité dynamique. En outre, puisqu'un cerne annuel se compose de deux parties, le BI et le BF, il serait important de définir le point de transition entre ces deux parties dont la variation de leurs proportions provoque une variation des propriétés physiques et mécaniques du bois. Il y avait plusieurs techniques qui peuvent être adoptées pour identifier la transition du bois initial au bois final. Parmi ces techniques, l'approche établie par Koubaa et al. (2002) qui est basée sur la dérivée maximale de la fonction polynomiale afin de définir le point de démarcation entre le bois initial et le bois final. Généralement, le point de transition (E/L) se localise entre 40% et 90% de la largeur du cerne annuel (Koubaa et al., 2002).

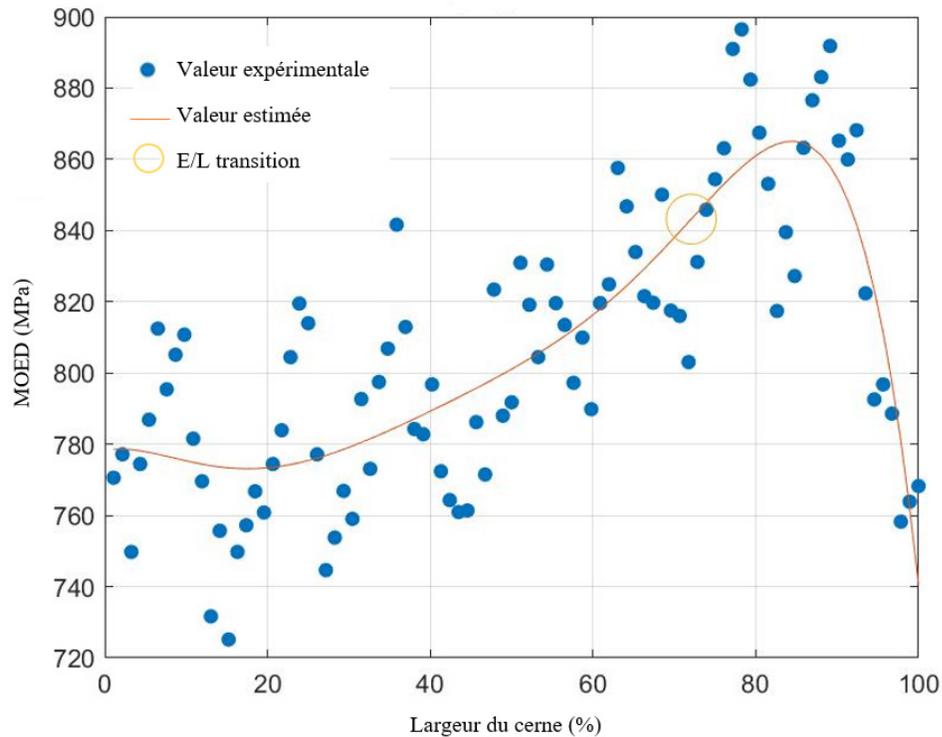


Figure 3.2 : Modélisation du profil intracerne du MOED

La figure 3.3 montre la variation radiale du MOED au niveau du point de transition entre les deux composantes du cerne de croissance (MOEDt) en fonction de l'âge cambial. Le profil de cette variation est fluctuant et présente une augmentation progressive de la moelle jusqu'à atteindre le 70<sup>e</sup> cerne où il se stabilise relativement. Les résultats représentent des valeurs avec une large variation qui peut être découverte lors de la comparaison des valeurs du MOEDt du même cerne annuel des échantillons (Zribi, 2020). Concernant le profil de la variation de la masse volumique du point de transition entre les deux composantes du cerne de croissance (MVt) représenté par la figure 3.4, il révèle à son tour une fluctuation et il se stabilise aussi à partir du 70<sup>e</sup> cerne. Cependant, ce profil ne signale aucune tendance spécifique. Ces résultats sont comparables à celles trouvées antérieurement pour l'épinette noire où la variation au niveau des points des transitions du profil de la masse volumique est très grande au sein des cernes annuels (Kharrat, 2016; Koubaa et al., 2002; Zribi, 2020).

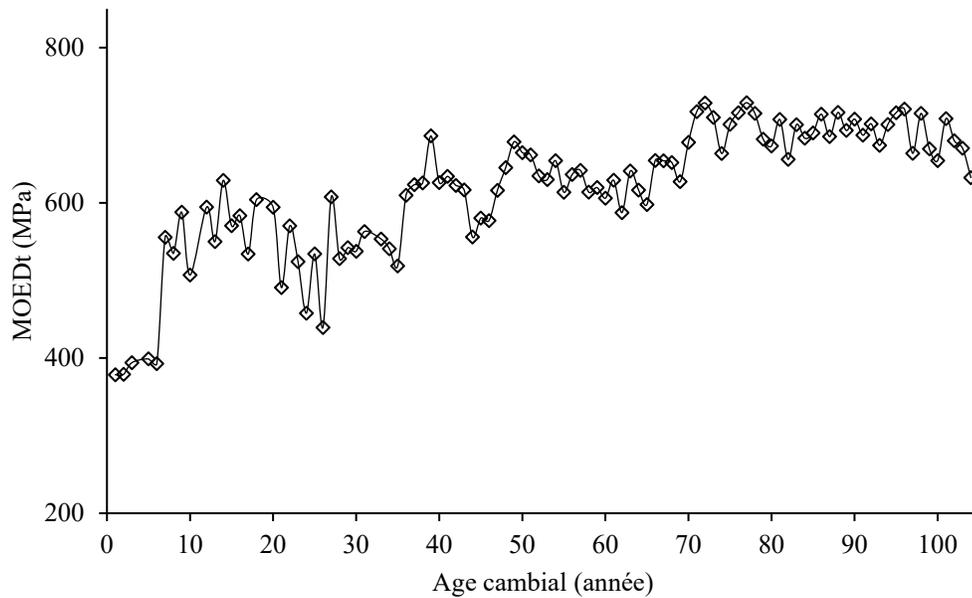


Figure 3.3 : Profil radial des valeurs moyennes du MOEDt en fonction de l'âge cambial

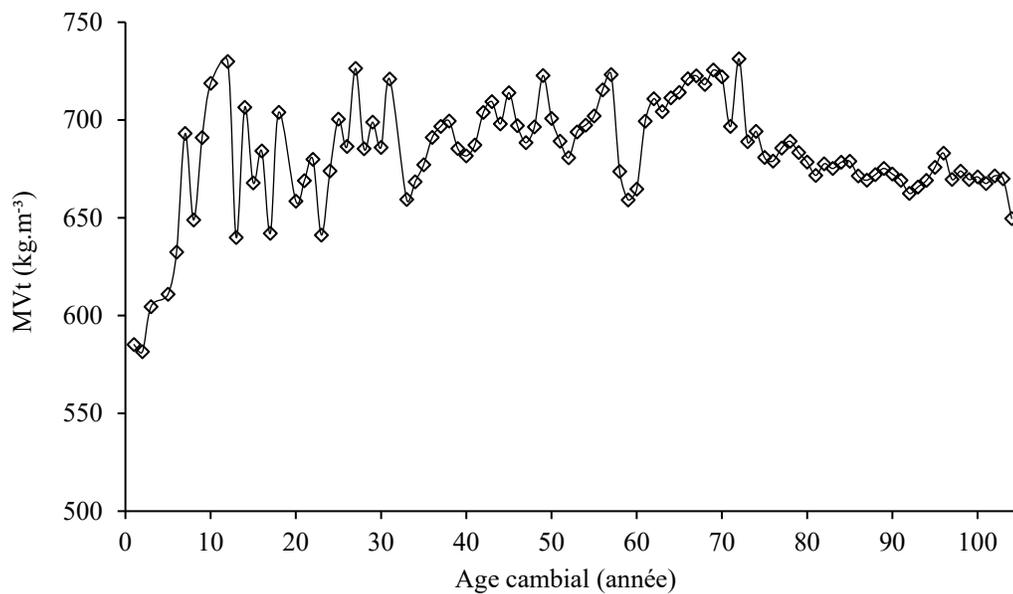


Figure 3.4 : Profil radial des valeurs moyennes de la MVt en fonction de l'âge cambial

L'importance de l'identification du point de transition entre les deux composantes du cerne de croissance (BI et BF) s'apparaitre lors de l'estimation des propriétés du bois du cerne de croissance, y compris leur largeur, la rigidité ainsi que les proportions de chaque composante.

Le tableau 3.1 récapitule les valeurs moyennes, l'étendue et l'écart type des MOED de quelques cernes au niveau du point de transition (MOED<sub>t</sub>), du bois initial (MOED<sub>BI</sub>) et du bois final (MOED<sub>BF</sub>). En analysant ce tableau, on constate une grande variation pour la plupart des propriétés. Il semble que cette dispersion est due à la variabilité inter-arbre. De plus, les trois modules augmentent en se dirigeant de la moelle vers l'écorce avec des petites fluctuations. Le bois final présente des valeurs un peu élevées de MOED comparativement au bois initial puisqu'il est plus rigide (Barrios et al., 2016; Mott et al., 2002). Ces caractéristiques du BF peuvent être expliquées par plusieurs facteurs notamment la valeur élevée de la densité (Winandy et Rowell, 2005) et la moindre valeur de l'angle de microfibrille (Fang et al., 2006).

### 3.2.3 Profil de la variation radiale de la masse volumique

La figure 3.5 montre le patron de la variation radiale de la densité moyenne du cerne (MV<sub>C</sub>), la densité du bois initial (MV<sub>BI</sub>) et la densité du bois final (MV<sub>BF</sub>). Les trois profils représentent quasiment la même allure. Ces profils sont fluctuants et ils ne dévoilent aucune tendance particulière jusqu'au 70<sup>e</sup> cerne. Au-delà de cette valeur, la densité se stabilise avec moins de fluctuation et diminue progressivement en se dirigeant vers l'écorce. Les valeurs élevées avant le 70<sup>e</sup> cerne peuvent être expliquées par l'existence du bois de compression qui se produit pendant les premières années de la croissance. Dans cette période, l'arbre n'est pas encore résistant aux contraintes appliquées telles que les charges des neiges et le vent (Kennedy, 1995).

Tableau 3.1 : Valeurs moyennes, intervalles et écarts types (entre parenthèses) du MOED du point de transition, du BI et du BF en fonction de l'âge cambial pour 53 arbres d'érable à sucre

Propriétés		Type de bois							
		Bois juvénile				Bois mature			
Âge cambial		10	20	30	40	50	60	70	80
<b>MOED<sub>t</sub></b> <b>(MPa)</b>	Moyenne	507 (96)	453 (114)	479 (70)	604 (209)	665 (197)	606 (167)	673 (190)	691(174)
	Intervalle	431-	365-	435-	458-	267-	201-	241-	302-
	min-max	583	758	741	912	866	1051	1083	1065
<b>MOED<sub>BI</sub></b> <b>(MPa)</b>	Moyenne	502 (103)	431 (106)	461 (66)	594 (213)	637 (196)	593 (172)	649 (185)	660 (177)
	Intervalle	427-	345-	411-	441-	238-	125-986	241-	302-
	min-max	577	730	745	906	854		1024	1025
<b>MOED<sub>BF</sub></b> <b>(MPa)</b>	Moyenne	524 (96)	461 (114)	483 (70)	602 (209)	675 (197)	620 (167)	685 (190)	700 (165)
	Intervalle	433-	370-	438-	442-	276-	228-	245-	306-
	min-max	615	769	746	906	895	1086	1100	1084

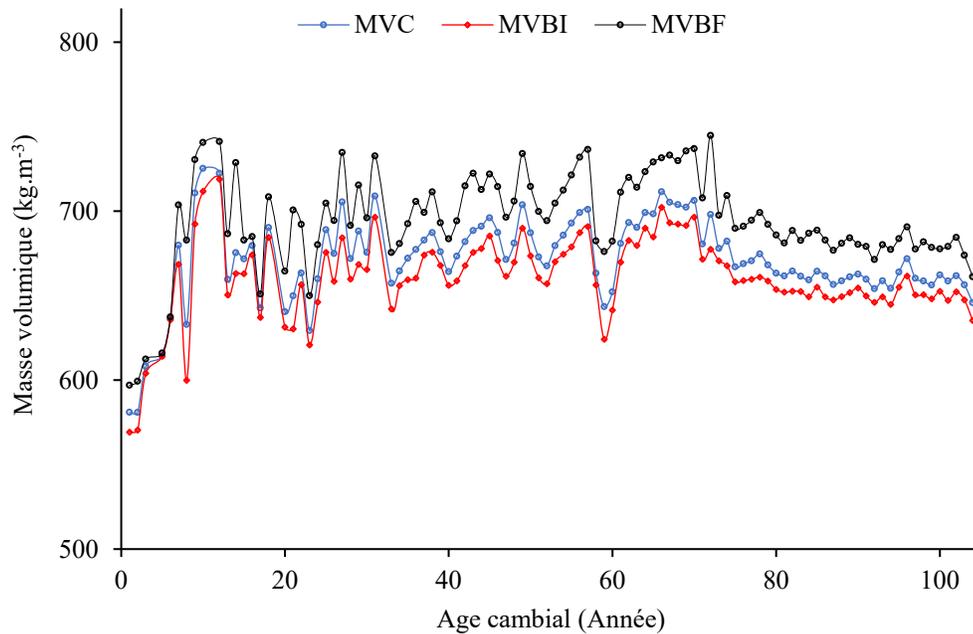


Figure 3.5 : Profil radial moyen (n=53) de la masse volumique du cerne (MVC), du bois initial (MV<sub>BI</sub>) et du bois final (MV<sub>BF</sub>)

### 3.2.4 Profil de la variation radiale du module d'élasticité dynamique

L'estimation des propriétés mécaniques d'aspect dynamique en utilisant des carottes permet de prédire la qualité du peuplement ainsi que les propriétés du bois d'œuvre grâce à la relation étroite entre les deux (Bucur et Perrin, 1981; Downes et al., 2002).

La figure 3.6 illustre la variation radiale du MOED qui est obtenue en calculant la moyenne de cette grandeur de chaque cerne pour tous les arbres des deux sites étudiés. Pour chaque arbre, le MOED du cerne a été calculé à travers la masse volumique moyenne du cerne, multipliée par la vitesse de propagation de l'onde sonore adéquate, au carré. Les profils du MOED du cerne (MOED<sub>C</sub>), du bois initial (MOED<sub>BI</sub>) et du bois final (MOED<sub>BF</sub>) présentent aussi la même allure. En fait, chaque profil du possède 3 paliers en passant de la moelle à

l'écorce. Ces paliers représentent les zones du bois cariée, colorée et saine. Le MOED augmente graduellement d'un palier à un autre avec une grande fluctuation surtout au niveau des deux premiers paliers (zones cariée et colorée) avant qu'il se stabilise relativement au niveau de la zone du bois sain.

Étant donné que le MOED est calculé en fonction de deux paramètres principaux, dont la masse volumique et la vitesse de propagation de l'onde sonore, ces deux grandeurs sont très sensibles aux variations du bois. L'hétérogénéité de ce dernier et son anisotropie remarquable causent une grande variation de la densité et la vitesse de propagation de l'onde sonore (Zobel et Van Buijtenen, 1989). De plus, Hasegawa et al. (2011) ont expliqué l'effet des propriétés du bois, dont la longueur des trachéides (LT), l'angle de microfibrille (AMF) et la densité, sur la vitesse de propagation des ondes sonores. En effet, ils ont approuvé que la LT présente une forte corrélation avec la vitesse de propagation de l'onde sonore tandis que la densité et l'AMF présentent une relation inversement proportionnelle avec la vitesse.

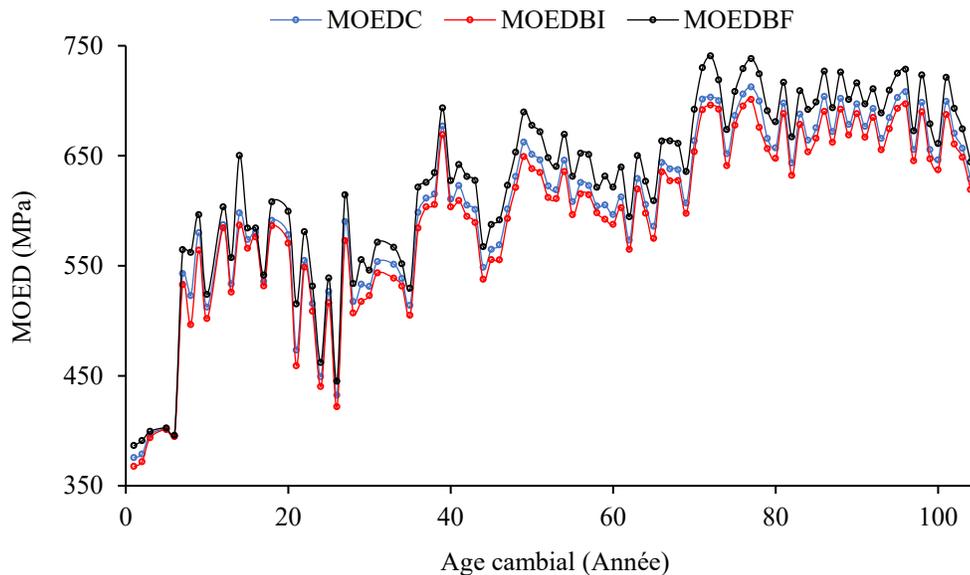


Figure 3.6 : Profil radial moyen (n=53) du MOED du cerne (MOED<sub>C</sub>), du bois initial (MOED<sub>BI</sub>) et du bois final (MOED<sub>BF</sub>)

### 3.2.5 Statistiques descriptives

Le tableau 3.2 résume les valeurs moyennes du MOED au niveau du cerne annuel ( $MOED_C$ ), du bois initial ( $MOED_{BI}$ ) et du bois final ( $MOED_{BF}$ ) ainsi que les écarts types entre ces valeurs pour chaque cerne des arbres provenant des sites situés à La Tuque. La valeur moyenne du  $MOED_C$  varie de 627 à 659 MPa, et l'écart type varie de 179 à 197 MPa. Quant à la valeur moyenne du  $MOED_{BI}$ , elle est d'environ 633 MPa, alors que la valeur moyenne du bois final  $MOED_{BF}$  est de 666 MPa.

Tableau 3.2 : Les valeurs moyennes et les écarts types du MOED et de la masse volumique du cerne et ses composantes selon le site d'étude

Site d'étude	Module d'élasticité dynamique (MPa)		
	Cerne ( $MOED_C$ )	Bois initial ( $MOED_{BI}$ )	Bois final ( $MOED_{BF}$ )
<b>Zec-Besson (n=29)</b>	659 (197)	649 (195)	683 (204)
<b>Lac-Édouard (n=24)</b>	627 (179)	617 (177)	649 (183)
<b>Moyenne des sites (n=53)</b>	643 (22)	633 (22)	666 (24)
Site d'étude	Masse volumique ( $kg.m^{-3}$ )		
	Cerne ( $MV_C$ )	Bois initial ( $MV_{BI}$ )	Bois final ( $MV_{BF}$ )
<b>Zec-Besson (n=29)</b>	681 (72)	669 (72)	705 (81)
<b>Lac-Édouard (n=24)</b>	666 (63)	656 (63)	690 (68)
<b>Moyenne des sites (n=53)</b>	674 (11)	663 (9)	698 (11)

Le tableau 3.2 présente aussi les valeurs moyennes de la masse volumique du cerne ( $MV_C$ ), du bois initial ( $MV_{BI}$ ) et du bois final ( $MV_{BF}$ ). La valeur moyenne de la  $MV_C$  est entre 681 et 666  $kg.m^{-3}$  avec un écart qui ne dépasse pas 72  $kg.m^{-3}$  dans les deux sites d'études. La valeur moyenne de la  $MV_{BI}$  varie de 656 à 669  $kg.m^{-3}$ . Quant à la moyenne de la  $MV_{BF}$ , elle est légèrement supérieure de celle du bois initial et elle

s'étale de 690 allant à 705  $\text{kg.m}^{-3}$ . Ces résultats sont en accord avec plusieurs études antérieures effectuées sur l'érable à sucre (Green et al., 1999; Panshin et Zeeuw, 1980). En examinant la variation de la masse volumique du bois à l'échelle du cerne, on constate que le bois de l'érable à sucre est relativement homogène. La densité moyenne des cernes des arbres étudiés était de 674  $\text{kg.m}^{-3}$ , avec une légère variation entre le bois initial et le bois final.

### 3.3 Étude des comportements statique et dynamique du bois et la masse volumique à l'échelle des billes

Le tableau 3.3 résume les valeurs moyennes de la masse volumique (MV) et les propriétés mécaniques, telles que les modules d'élasticité statiques (en flexion trois-points ( $\text{MOES}_F$ ) et en compression parallèle ( $\text{MOES}_C$ )) et les modules d'élasticité dynamiques (d'ultrason ( $\text{MOED}_U$ ) et du tomographe acoustique ( $\text{MOED}_T$ )).

Tableau 3.3 : Valeurs moyennes<sup>1</sup> et écarts types (entre parenthèses) de la masse volumique (MV) et les modules d'élasticité statiques (en flexion ( $\text{MOES}_F$ ) et en compression parallèle ( $\text{MOES}_C$ )) et dynamiques (d'ultrason ( $\text{MOED}_U$ ) et du tomographe acoustique ( $\text{MOED}_T$ ))

Site	MV ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Statique (MPa)		Dynamique (MPa)	
		$\text{MOES}_F$	$\text{MOES}_C$	$\text{MOED}_U$	$\text{MOED}_T$
Belleterre	714 (37)	9423 (1321)	11336 (3891)	16723 (2465)	740 (282)
Louvicourt	711 (45)	10233 (2176)	10772 (2526)	17934 (2498)	712 (231)
Moyenne	712 (42)	9828 (1796)	11054 (3146)	17329 (2483)	727 (260)

<sup>1</sup> Valeurs moyennes de tous les échantillons prélevés des zones colorées et saines.

Pour la masse volumique, on constate une légère variation entre les deux sites, soit de 711  $\text{kg.m}^{-3}$  et 714  $\text{kg.m}^{-3}$  à 6-8% d'humidité. Cependant, la valeur moyenne des deux sites trouvée (712  $\text{kg.m}^{-3}$ ) est plus élevée que celles rapportées dans la littérature, dont 597  $\text{kg.m}^{-3}$  (Jessome, 1977), 603  $\text{kg.m}^{-3}$  (Clermont et Schwartz, 1952), 605  $\text{kg.m}^{-3}$

(Cantin, 1967) et  $630 \text{ kg.m}^{-3}$  (Green et al., 1999; Panshin et Zeeuw, 1980). De plus, cette valeur moyenne mesurée avec la méthode gravimétrique à l'échelle des éprouvettes d'essai est aussi plus élevée que celle mesurée dans la présente étude avec le densitomètre à rayon X à l'échelle des carottes de sondage. Cette différence est due d'une part à l'échelle et la méthode de mesure utilisée. En effet, la densitométrie à rayon X est avantagée relativement à la méthode gravimétrique, vu qu'elle peut mettre en évidence la variation intracerne et inter-cerne de la masse volumique (Polge 1978). La mesure de la masse volumique du bois est fortement dépendante de l'effet d'échelle, ce qui provoque une grande variabilité de mesure (Bouslimi, 2014). D'autre part, la masse volumique a été mesurée à 6-8% d'humidité d'équilibre, or que celle des études mentionnées sont des masses volumiques mesurées à l'état basal (Bouhajja, 2015).

Les valeurs moyennes des modules d'élasticité statiques ( $\text{MOES}_F$  et  $\text{MOES}_C$ ) figurent dans le tableau 3.3. On y constate une variation intrasite importante du  $\text{MOES}_F$  qui varie entre 9423 MPa et 10233 MPa et une légère variation du  $\text{MOES}_C$  qui varie entre 10772 MPa et 11336 MPa. Les valeurs moyennes des sites du  $\text{MOES}_F$  et  $\text{MOES}_C$  sont égales à 9828 et 11054, respectivement (Tableau 3.3). Ces valeurs sont inférieures à celles rapportées dans la littérature. En effet, les valeurs rapportées par Jessome (1977) sont respectivement 11700 MPa et 1300 MPa. Cet écart est attribuable par le fait que les propriétés mécaniques ont été évaluées à partir seulement des éprouvettes de bois clair d'érable dur dans les études antérieures. D'ailleurs, les valeurs du  $\text{MOES}_F$  trouvées sont comparables avec celle rapportée par Duchesne et al. (2016) (10684 MPa) qui ont évalué les deux parties du bois (coloré et sain).

Le tableau 3.3 montre aussi les modules d'élasticité dynamique d'ultrason ( $\text{MOED}_U$ ) et du tomographe acoustique ( $\text{MOED}_T$ ). On constate aussi une variation intrasite importante du  $\text{MOED}_U$  qui varie entre 16 723 MPa et 17 934 MPa et une légère variation du  $\text{MOED}_T$  qui varie entre 712 MPa et 740 MPa. Les valeurs moyennes des sites du  $\text{MOED}_U$  et  $\text{MOED}_T$  sont égales à 17 329 MPa et 727 MPa, respectivement. La valeur moyenne du  $\text{MOED}_U$  est supérieure à celle rapportée par Smulski (1991) soit 15 857 MPa. Cette différence peut être expliquée par des facteurs environnementaux,

génétiques (Zobel et Van Buijtenen, 1989) ainsi qu'expérimentaux (Bucur, 2006). De plus, la mesure des vitesses de propagation des ondes sonores à l'aide de la technique d'ultrason est très sensible et demande une pression constante appliquée sur les deux extrémités de l'échantillon afin de garantir la bonne lecture.

Les valeurs trouvées du  $MOED_T$  sont très faibles par rapport aux celles des autres modules mesurés. En effet, il représente seulement 7%, 6%, et 4%, respectivement des modules  $MOES_F$ ,  $MOES_C$  et  $MOED_U$ . Cependant, l'ordre de grandeur des valeurs trouvé pour ce module est comparable à celui rapporté par Gallet et al. (2010) pour le bois du peuplier (382 MPa).

#### 3.4 Effet de la coloration/carie sur les propriétés du bois étudiées de l'érable à sucre

Dans cette partie, on explique dans un premier temps l'évaluation de la proportion de la carie chez les arbres mesurés par deux méthodes : le tomographe acoustique et l'inspection visuelle. Dans un deuxième temps, l'effet de la coloration/carie sur les propriétés étudiées du bois de l'érable à sucre, dont la masse volumique et le  $MOED$  au niveau du cerne, du bois initial et du bois final. Pour cela, les données du tomographe acoustique ainsi que les données du densitomètre à rayon X ont été analysées par une analyse de variance à l'aide du modèle linéaire à effet mixte dans le but d'évaluer les variables indépendantes et ses interactions sur la variable dépendante en question. Finalement, une analyse on étudie l'effet de la coloration/carie sur la masse volumique et les propriétés mécaniques tels que les modules d'élasticité statiques (en flexion trois-points ( $MOES_F$ ) et en compression parallèle ( $MOES_C$ )) et les modules d'élasticité dynamiques (du tomographe acoustique ( $MOED_T$ ) et de la méthode d'ultrason ( $MOED_U$ )) au niveau de l'arbre. Les données du tomographe acoustique, d'ultrason ainsi que l'appareil d'essai universel Zwick ont été analysé par la même étude précédente.

### 3.4.1 Évaluation de la proportion de la carie chez les arbres

Dans la présente étude, la proportion de carie a été mesurée par deux méthodes : le tomographe acoustique et l'inspection visuelle pour 18 sections transversales des arbres d'érable à sucre prises au diamètre à hauteur de poitrine (DHP). En effet, le tomographe permet de fournir un tomogramme (Figure 7a) de différentes couleurs indiquant la présence ou non de cavités ou de foyers de pourriture à l'intérieur de l'arbre ainsi que le pourcentage du bois carié ou creux (Göcke, 2017). Quant à la méthode visuelle (Figure 7b), les proportions de carie sont calculées à l'aide du logiciel Image J qui permet de sélectionner manuellement les zones cariées et par la suite permet de mesurer leurs surfaces.

Dans 11 échantillons où aucune carie n'était présente, le tomographe à leur tour n'a détecté aucune carie. Dans les 7 échantillons restants, les différences de pourcentage entre les deux méthodes étaient en moyenne d'environ 11%. L'écart type entre les pourcentages de la carie trouvé dans ces cas était de 7%.

De plus, les tomogrammes étaient étroitement corrélés à l'évaluation visuelle de la carie. D'ailleurs, il y avait une bonne corrélation entre la proportion de la carie détectée par le tomographe acoustique et la quantité réellement présente dans les sections transversales ( $R^2 = 0,76$ ) pour toutes les sections transversales (Figure 3.8). Ces résultats sont comparables à ceux trouvés par Gilbert et Smiley (2004) pour le chêne blanc et le caryer. Cette étude révèle une différence moyenne de 5% avec un écart type de 6% et un fort coefficient de corrélation de 0,90.

Dans ce contexte, le tomographe permet d'identifier des sections transversales d'arbres contenant des caries. Si une dégradation significative était présente dans une section, le tomographe était capable de détecter son emplacement et sa proportion (Gilbert et Smiley, 2004). En outre, selon Dudkiewicz et Durlak (2021) et Martiansyah et al., (2022), les résultats du tomographe des échantillons étudiés ont confirmé l'évaluation visuelle préliminaire.

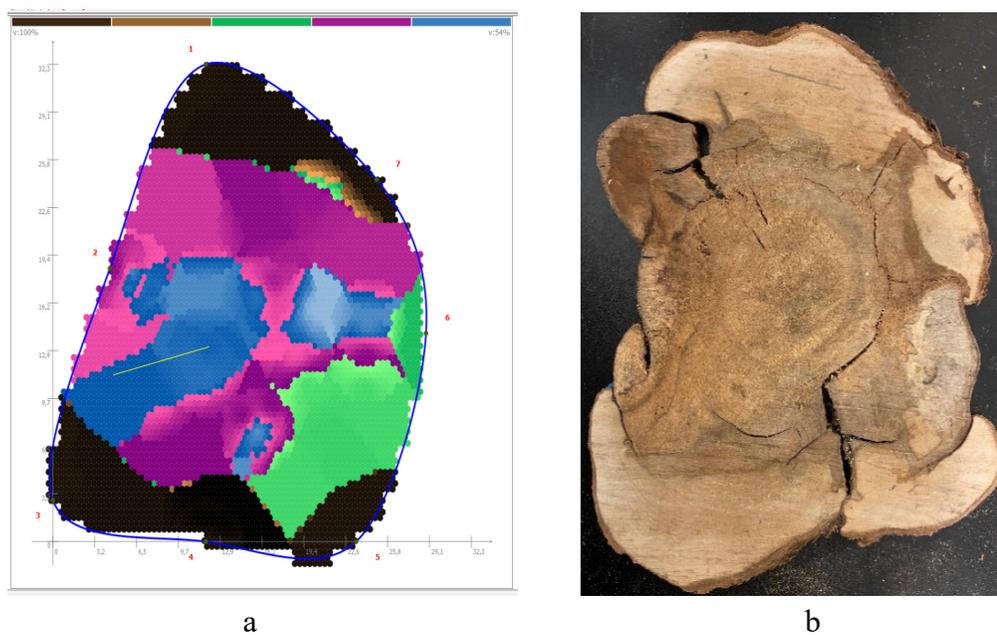


Figure 3.7 : Exemple d'un tomogramme (a) et d'une photo (b) de l'une des sections transversales étudiées de l'érable à sucre

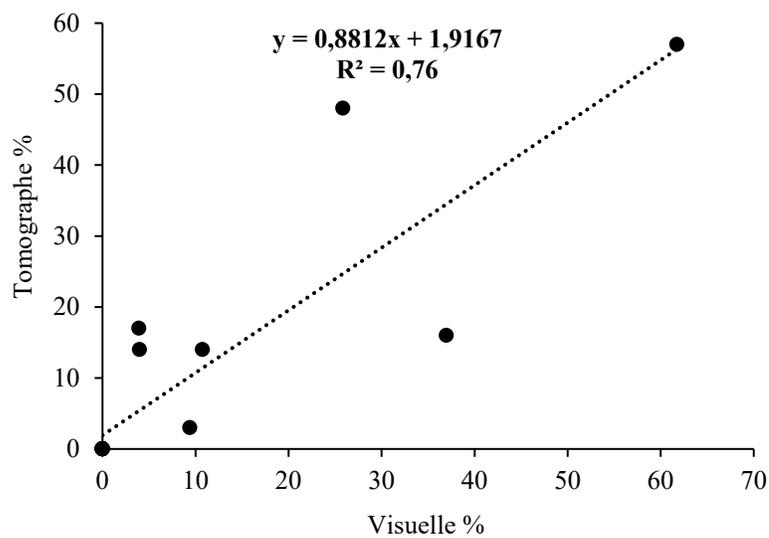


Figure 3.8 : Étude de régression entre la proportion de la carie mesurée par le tomographe et par la méthode visuelle

### 3.4.2 Effet de la coloration/carie sur les propriétés étudiées au niveau du cerne et ses composantes

Le tableau 3.4 résume les résultats d'analyse de variance sur l'effet de la coloration/carie sur la masse volumique (MV) et le module d'élasticité dynamique au niveau du cerne, du bois initial et du bois final.

Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse de variance des effets du site (S), de la classe de coloration (CC), de la classe de diamètre (CD) et de leurs interactions sur les modules d'élasticité dynamique (MOED) et de la masse volumique (MV) du cerne, du bois initial (BI) et du bois final (BF) de l'érable à sucre.

Sources de variation	MOED			MV		
	Cerne	BI	BF	Cerne	BI	BF
<b>Test des effets fixes (Valeurs de F)</b>						
<b>Constante</b>	315,3***	322,0***	311,4***	6427,8***	6595,9***	5950,6***
<b>S</b>	16,1*	11,8*	18,4**	0,203 <sup>ns</sup>	0,037 <sup>ns</sup>	0,125 <sup>ns</sup>
<b>CD</b>	6,6*	5,1*	7,6*	0,720 <sup>ns</sup>	0,930 <sup>ns</sup>	0,432 <sup>ns</sup>
<b>CC</b>	10,3*	7,3*	11,4*	0,760 <sup>ns</sup>	0,788 <sup>ns</sup>	0,796 <sup>ns</sup>
<b>S * CC</b>	16,1*	13,1*	18,4**	0,637 <sup>ns</sup>	0,534 <sup>ns</sup>	0,948 <sup>ns</sup>
<b>S * CD</b>	12,1*	9,6*	13,1**	0,082 <sup>ns</sup>	0,048 <sup>ns</sup>	0,063 <sup>ns</sup>
<b>CC * CD</b>	6,2 <sup>ns</sup>	4,672 <sup>ns</sup>	6,8*	0,763 <sup>ns</sup>	0,804 <sup>ns</sup>	0,557 <sup>ns</sup>
<b>Estimations des paramètres de covariance (Wald Z)</b>						
<b>Résidu</b>	0,976 <sup>ns</sup>	0,921 <sup>ns</sup>	1,154 <sup>ns</sup>	2,3*	2,4*	2,3*
<b>Arbre</b>	1,771 <sup>ns</sup>	1,505 <sup>ns</sup>	2,1*	0,8 <sup>ns</sup>	0,7 <sup>ns</sup>	0,6 <sup>ns</sup>

Les degrés de signification : <sup>ns</sup>(non significatif), \*\*\*(p<0,001), \*\*(p<0,01) et \*(p<0,05).

### 3.4.2.1 Effet de la coloration/carie sur le module d'élasticité dynamique

L'analyse de variance de cette partie (Tableau 3.4) montre que le site (S), la classe DHP (CD) ainsi que la classe de coloration (CC) ont un effet significatif sur les modules d'élasticité dynamiques du cerne  $MOED_C$ , du bois initial  $MOED_{BI}$  et du bois final  $MOED_{BF}$ . Par conséquent, ces résultats confirment à leur tour l'hypothèse 3 de la présente étude (H3 : Une augmentation de la proportion de la carie et de coloration de l'arbre engendre une perte des propriétés mécaniques du bois). La figure 3.9 illustre la variation des modules d'élasticité en fonction de la classe de coloration (très pourri, pourri et coloré) et l'état du bois (coloré/carié et sain). L'analyse attentive de cette figure indique que les réponses du MOED du cerne, du bois initial et du bois final sont très variables. Tous les modules ont subi une diminution peu importe la classe de coloration sous l'effet de la coloration ou la carie. D'ailleurs, cette diminution s'accroît en augmentant la proportion de la coloration dans l'arbre. En effet, pour le  $MOED_C$ , la diminution est de l'ordre de 40,08% pour la classe très pourrie, 32,1% pour la classe pourrie et 9,3% pour la classe colorée. Quant au  $MOED_{BI}$ , il a montré une perte de 40,7%, 27,8% et 9,7% respectivement pour les trois classes. Concernant le  $MOED_{BF}$ , il suit presque une variation similaire à celle de  $MOED_C$  et  $MOED_{BI}$ . Effectivement, le  $MOED_{BF}$  diminue de 38,8% et 27,0% et 8,7%, respectivement dans les mêmes classes de coloration (Annexe A, Tableau A.1).

Le tableau 3.4 révèle ainsi que l'effet du site ainsi que ses interactions avec la classe du DHP et la classe de coloration a été statistiquement significative au niveau du MOED du cerne ( $p < 0,05$ ), du bois initial ( $p < 0,05$ ) et du bois final ( $p < 0,01$ ). De plus, les classes du DHP et de la coloration ont à leurs tours un effet significatif ( $p < 0,05$ ) sur le  $MOED_C$ , le  $MOED_{BI}$  et le  $MOED_{BF}$ . Cependant, leur interaction a un effet significatif seulement au niveau du  $MOED_{BF}$ . Ceci est cohérent avec les résultats de Bouslimi et al (2014) selon laquelle la coloration et la carie conduisent inévitablement à une diminution des propriétés mécaniques et spécifiquement sur le module d'élasticité MOE.

### 3.4.2.1 Effet de la coloration/carie su la masse volumique du cerne

La figure 3.10 montre la variation de la masse volumique du cerne ( $MV_C$ ), du bois initial ( $MV_{BI}$ ) et du bois final ( $MV_{BF}$ ) en fonction de la classe de coloration (très pourri, pourri et coloré) et l'état du bois (coloré/carié et sain). La constatation générale qu'on peut tirer c'est que seulement de faibles variations de la MV entre le bois coloré/carié et le bois sain. En effet, la MV diminue légèrement dans la classe très pourrie et augmente légèrement dans les deux autres classes. D'ailleurs, la  $MV_C$  diminue de l'ordre de 1,94% pour la classe très pourrie et augmente de 4,16% pour la classe pourrie et de 6,95% pour la classe colorée. Quant à la  $MV_{BI}$ , elle diminue de 3,07 % pour la classe très pourrie et augmente de 3,84% et 6,37% respectivement pour les classes pourrie et colorée. En ce qui concerne la  $MV_{BF}$ , elle diminue de 0,27%, 4,62% et 7,86% respectivement pour les trois classes de coloration. La diminution de la MV au niveau des classes très pourrie et pourrie est en accord avec les résultats de Merela et Katarina (2013) alors que l'augmentation de cette grandeur au niveau de la classe colorée est en accord avec les résultats de Lamb et Marden (1970) qui ont trouvé que la MV du bois coloré est légèrement supérieure à la MV du bois sain de l'ordre 6%. Le tableau 3.4 de l'analyse de variance révèle que la classe de coloration et leurs interactions étudiées n'ont aucun effet significatif sur la MV du cerne et ses composantes. Ceci est en accord avec les résultats de Bouslimi (2014) au niveau du bois final.

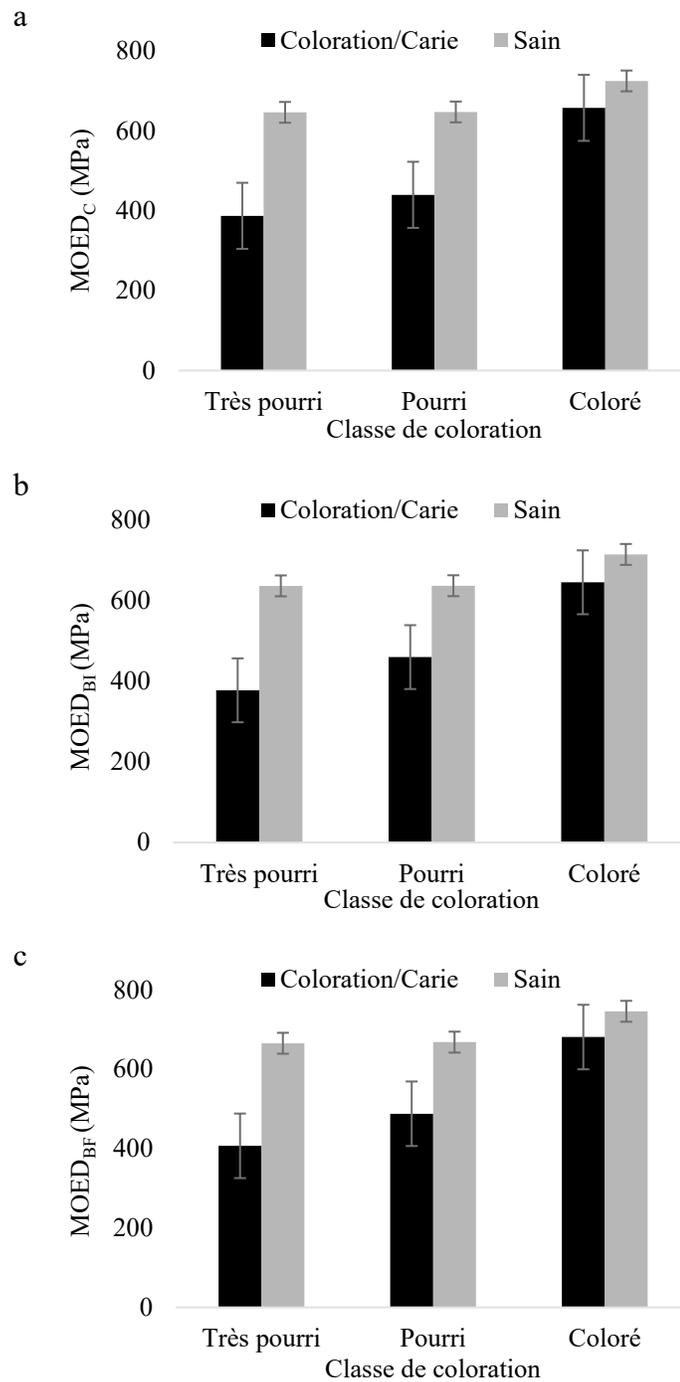


Figure 3.9 : Effet de la coloration/carie sur le MOED au niveau (a) des cernes (MOED<sub>c</sub>), (b) du bois initial (MOED<sub>BI</sub>) et (c) du bois final (MOED<sub>BF</sub>)

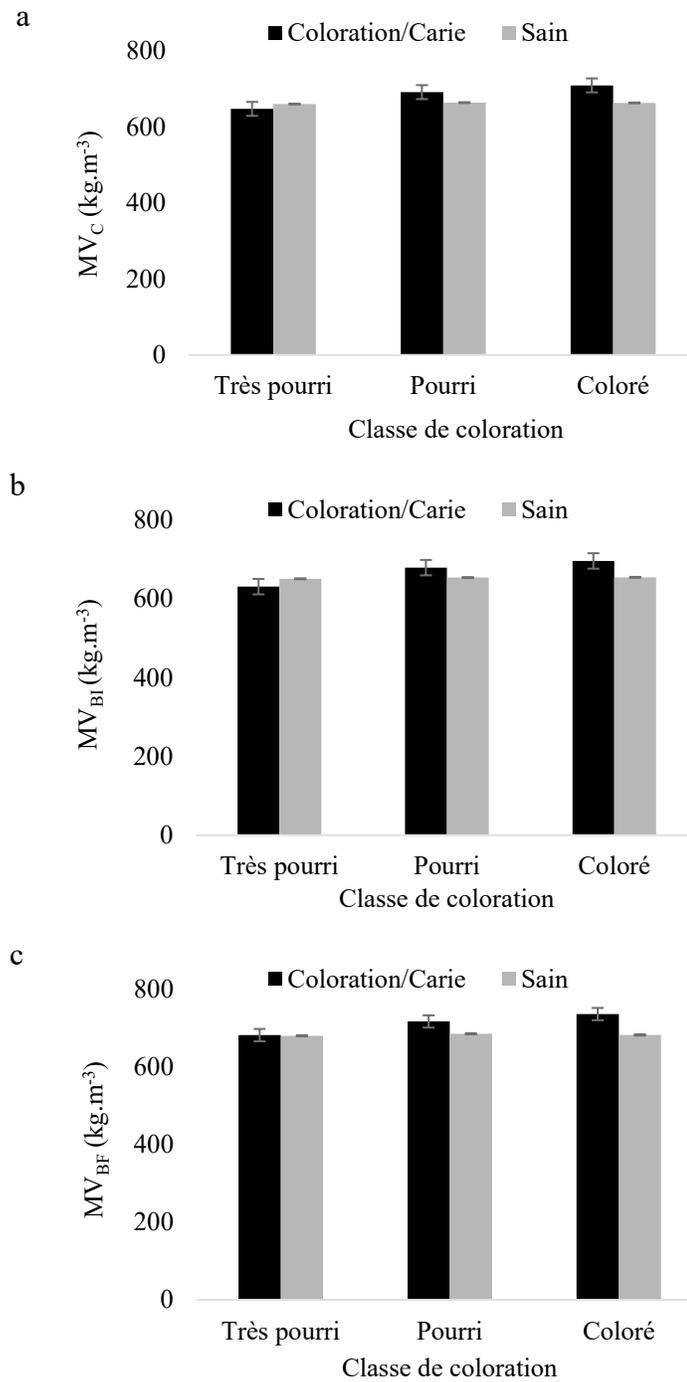


Figure 3.10 : Effet de la coloration/carie sur la masse volumique au niveau (a) des cernes ( $MV_C$ ), (b) du bois initial ( $MV_{BI}$ ) et (c) du bois final ( $MV_{BF}$ )

### 3.4.3 Effet de la coloration/carie sur les propriétés étudiées au niveau des billes

On s'intéresse dans cette section à éclaircir l'effet de la coloration/carie sur la masse volumique et les propriétés mécaniques tels que les modules d'élasticité statiques ( $MOES_F$  et  $MOES_C$ ) et les modules d'élasticité dynamiques ( $MOED_U$  et  $MOED_T$ ) du bois de l'érable à sucre au niveau des billes. Pour chaque arbre, les propriétés ont été étudiées au niveau du bois coloré ou carié et au niveau du bois sain. Le tableau 3.5 expose les résultats de l'analyse de variance en rapport avec l'effet de la coloration/carie sur la masse volumique et les propriétés mécaniques. Les effets du site (S), de la classe de diamètre au DHP (CD) et la classe de coloration (CC) ont été ainsi pris en considération dans cette analyse en tant qu'effets fixes. Les interactions de la classe coloration avec les sites et les classes de diamètre ont été intégrées dans le modèle. Cependant, les autres interactions n'ont pas été incluses dans le modèle vu qu'ils ne sont pas significatifs et ont été confondues avec le terme d'erreur. L'effet de l'arbre a été considéré comme une variable aléatoire. Cette dernière s'est avérée non significative pour l'ensemble des propriétés statiques et dynamiques ainsi que la masse volumique.

#### 3.4.3.1 Effet de la coloration/carie sur les modules d'élasticités statiques et la masse volumique

En se référant aux résultats d'analyse de variance (Tableau 3.5), l'effet du site est statiquement non significatif sur les propriétés étudiées à l'exception du module en compression vu que les deux sites sélectionnés sont très proches. La classe DHP n'a pas d'effet sur les propriétés étudiées. Ceci peut être expliqué par l'écart des niveaux de DHP étudié qui varie de 236 à 504 mm. La classe de la coloration a un effet non significatif sur la masse volumique (Lamb et Marden, 1970) et le module en flexion (Duchesne et al., 2016) et un effet significatif ( $p < 0,01$ ) sur le module en compression parallèle (Bouslimi, 2014). Cependant, les interactions entre la classe de coloration et la classe de DHP sont statiquement significatives sur toutes les propriétés étudiées, ce

qui suggère que la réponse diffère d'une classe de DHP à l'autre. Ces résultats sont en accord avec les résultats de Duchesne et al. (2016) qui indiquent que les échantillons de bois clair situés à 50 % du rayon présentaient un MOE significativement inférieur à ceux situés près de l'écorce pour l'érable et avec les résultats de Middleton et al. (1995) qui ont relevé une diminution du MOE lorsque le DHP augmentait.

La figure 3.11 et la figure 3.12 illustrent les variations de la masse volumique et des modules d'élasticité statiques en fonction de la classe de coloration (très pourri, pourri et coloré) et l'état du bois (coloré/carié et sain). La masse volumique présente une variation relativement faible pour les trois classes de coloration (Annexe A, Tableau A.2) telles qu'elle diminue de 4% pour la classe très pourrie, 3% pour la classe pourrie et la classe colorée. À propos le  $MOES_F$ , il présente une perte de 20% pour la classe très pourrie, 23% pour la classe pourrie et 11% pour la classe colorée. En ce qui concerne le  $MOES_C$ , il présente une chute de 27% pour la classe très pourrie, 31% pour la classe pourrie et 23% pour la classe colorée (Annexe A, Tableau A.2).

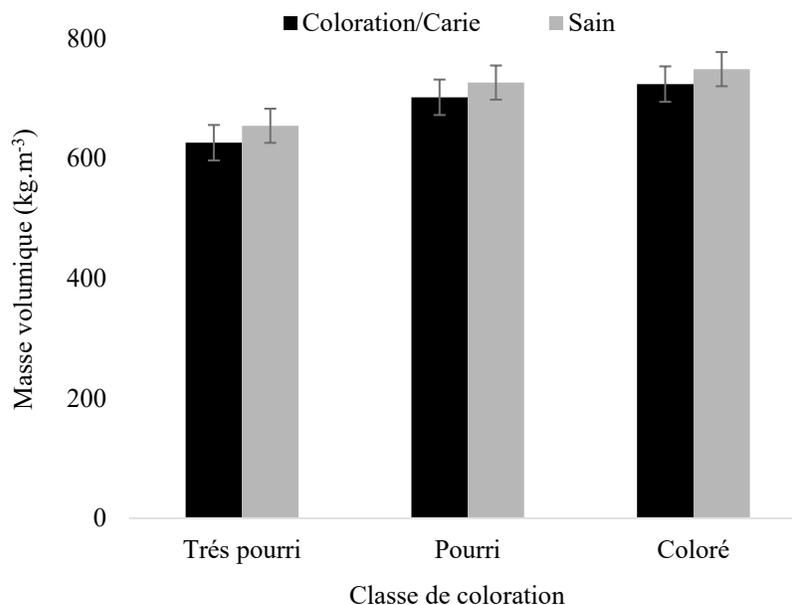


Figure 3.11 : Effet de la coloration/carie sur la masse volumique

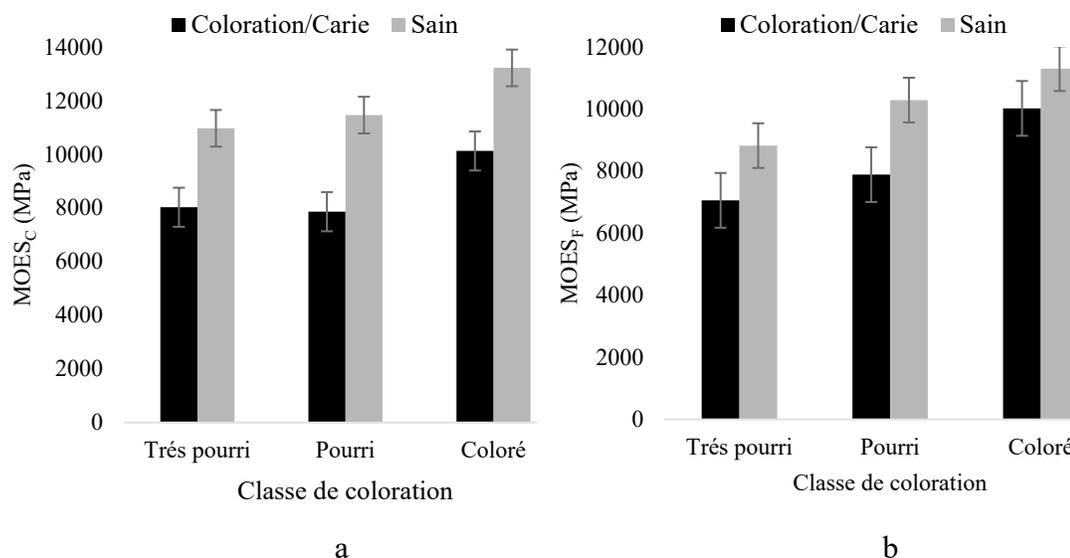


Figure 3.12 : Effet de la coloration/carie sur les modules d'élasticité statiques (a) en compression parallèle (MOES<sub>C</sub>) et (b) en flexion trois-points (MOES<sub>F</sub>)

#### 3.4.3.1 Effet de la coloration/carie sur les modules d'élasticité dynamiques

Dans cette section, le résultat de l'analyse statistique des données (Tableau 3.4) montre que le site a un effet significatif sur le MOED<sub>U</sub> et non significatif pour le MOED<sub>T</sub>. La classe de coloration a un effet significatif pour les deux modules. Quant à la classe de DHP, elle n'a aucun effet significatif comme facteur principal, mais elle a un effet significatif modulé avec la classe de coloration.

La figure 3.13 montre les variations des modules d'élasticité dynamiques (MOED<sub>U</sub> et MOED<sub>T</sub>) en fonction de la classe de coloration (très pourri, pourri et coloré) et l'état du bois (coloré/carié et sain). Le MOED<sub>U</sub> présente une diminution de 14% pour les classes très pourrie et pourrie et une légère diminution de 1% pour la classe colorée. Quant au MOED<sub>T</sub>, il présente une perte de 60%, 38% et 12% respectivement pour les trois classes de coloration (Annexe A). Vu que le MOED dépend de la vitesse de propagation sonore (Équation 2.2), cette chute de ces deux modules peut être expliquée par le fait que la vitesse de propagation de l'onde sonore est relativement lente dans la

zone colorée ou cariée. En effet, la présence de la coloration ou d'un défaut dans le bois provoque une déviation du signal sonore ce qui explique l'augmentation du temps de propagation et par conséquent la diminution de la vitesse de propagation de l'onde et du MOED (Feio, 2005).

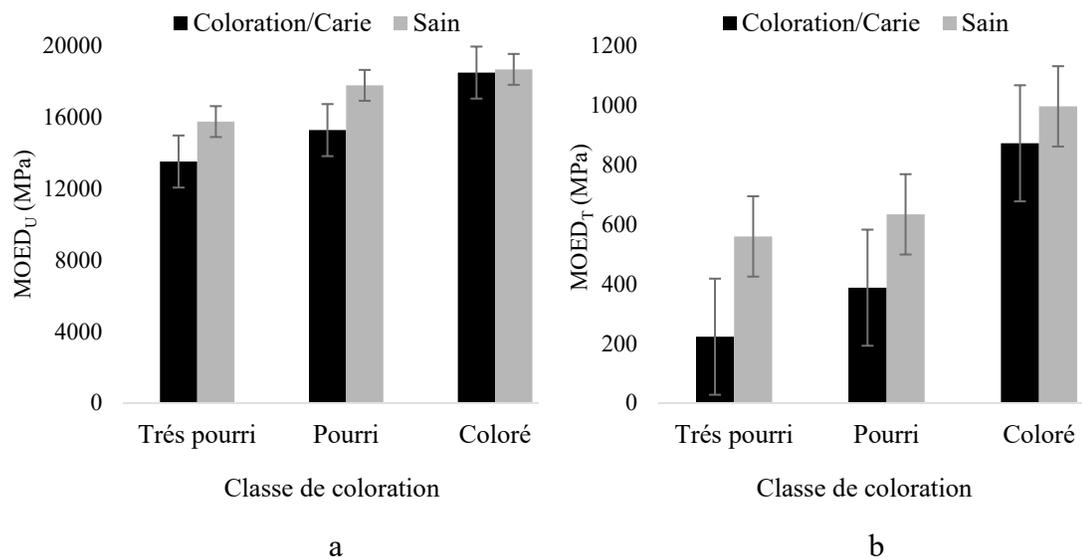


Figure 3.13 : Effet de la coloration/carie sur les modules d'élasticités dynamiques (a) d'ultrason (MOED<sub>U</sub>) et (b) du tomographe acoustique (MOED<sub>T</sub>)

Tableau 3.5 : Résultats de l'analyse de variance des effets du site (S), de la classe de coloration (CC), de la classe de diamètre (CD) et de leurs interactions sur la masse volumique (MV) et des modules d'élasticité statiques (MOES<sub>F</sub> et MOES<sub>C</sub>) et dynamiques (MOED<sub>U</sub> et MOED<sub>T</sub>)

Sources de variation	MV	Comportement statique		Comportement dynamique	
		MOES <sub>F</sub>	MOES <sub>C</sub>	MOED <sub>U</sub>	MOED <sub>T</sub>
		Test des effets fixes (valeurs de F)			
<b>Constante</b>	5044,38***	371,67***	47,04***	231,27***	243,93***
<b>S</b>	2,75 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	93,53***	294,31***	3,19 <sup>ns</sup>
<b>CD</b>	0,28 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	4,25 <sup>ns</sup>	2,64 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>
<b>CC</b>	0,57 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	8,08**	6,93**	35,33***
<b>S * CD</b>	7,71**	6,96**	18,83***	5,30*	2,18 <sup>ns</sup>
<b>S * CC</b>	7,08*	5,39*	3,70 <sup>ns</sup>	3,21 <sup>ns</sup>	6,17*
<b>CD * CC</b>	6,64*	3,42	46,55***	11,01**	3,45*
Estimations des paramètres de covariance (Wald Z)					
<b>Résidu</b>	7,60***	7,70***	7,68***	7,68***	2,86**
<b>Arbre</b>	1,57 <sup>ns</sup>	1,64 <sup>ns</sup>	1,53 <sup>ns</sup>	1,53 <sup>ns</sup>	1,18

<sup>ns</sup>(non significatif), \*\*\*( $p < 0,001$ ), \*\*( $p < 0,01$ ) et \*( $p < 0,05$ ).

### 3.5 Étude de régression entre le MOED et les propriétés du bois

#### 3.5.1 Étude de régression entre le MOED et la masse volumique au niveau du cerne de croissance et ses composantes

La densité a été largement considérée comme le meilleur indicateur de la qualité du bois. En d'autres termes, Jozsa et Middleton (1994) considèrent que la densité du bois est parmi les meilleurs outils pour prédire les caractéristiques du bois, dont la rigidité, la résistance, la dureté, l'usinabilité, le pouvoir calorifique, le rendement en pâte et la

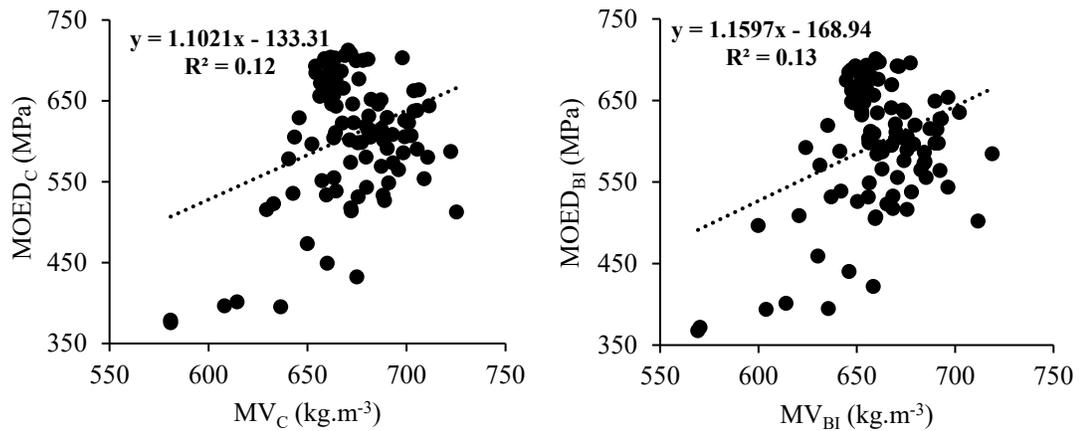
qualité de la fabrication du papier, avant leur utilisation finale. Compte tenu de la relation étroite entre la masse volumique et les propriétés mécaniques du bois spécifiquement le MOE (Macdonald et Hubert, 2002; Panshin et Zeeuw, 1980; Zhang, 2003), une masse volumique élevée engendre couramment une augmentation des propriétés mécaniques (Macdonald et Hubert, 2002).

Cependant, Zhang (1995) a indiqué que la variation de la masse volumique n'explique qu'une partie de la variation totale des propriétés mécaniques. En effet, la prédiction des propriétés mécaniques basée seulement sur la masse volumique n'est pas fiable, car une variation relativement faible de la masse volumique du bois peut engendrer une variation beaucoup plus importante des propriétés mécaniques (Zhang, 1995). L'étude de Duchesne et al. (2016), appliquée sur les érables à sucre, a montré que le MOE est resté plus ou moins constant dans toute la gamme de densités de bois mesurées.

Dans notre cas d'étude, les résultats de l'analyse de régression entre le MOED<sub>C</sub> et la MV<sub>C</sub>, le MOED<sub>BI</sub> et la MV<sub>BI</sub> et le MOED<sub>BF</sub> et la MV<sub>BF</sub> ont révélé de faibles relations. En effet, la figure 3.14 montre que la variation de la masse volumique explique uniquement environ 15% de la variation du MOED. Ceci est comparable aux résultats trouvés par Guller (2007). Par conséquent, il semble que la masse volumique et le MOED possèdent une relation assez importante. Étant donné qu'environ 80% de la variation du MOED ne peut pas toujours être expliqués par la variation de la masse volumique, l'utilisation de cette dernière seule pour prédire les propriétés mécaniques et évaluer l'impact de la coloration et la pourriture du bois ne semble pas être suffisante pour refléter et évaluer d'une manière efficace les propriétés mécaniques spécifiquement le MOED.

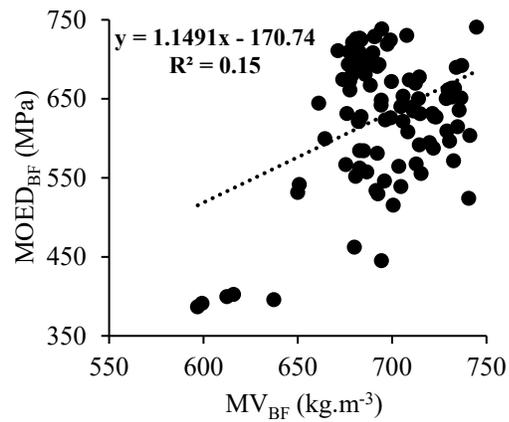
Pour conclure, aucune relation linéaire significative entre le MOE et la masse volumique n'a été mise en évidence (Alteyrac et al., 2006; Zhang et Koubaa, 2009). Néanmoins, il y avait d'autres paramètres qui ont montré une relation étroite avec le

MOE à l'exemple de l'angle de microfibrille. D'ailleurs, cette dernière est considérée un excellent outil permettant de prédire le MOE ( $R^2=0,78$ ) (Alteyrac et al., 2006).



a

b



c

Figure 3.14 : Régression entre le MOED et la masse volumique au niveau (a) des cernes (MOED<sub>C</sub> Vs MV<sub>C</sub>), (b) du bois initial (MOED<sub>BI</sub> Vs MV<sub>BI</sub>) et (c) du bois final (MOED<sub>BF</sub> Vs MV<sub>BF</sub>)

### 3.5.2 Étude de régression entre le MOED et les propriétés du bois étudiées au niveau des billes

L'intérêt d'une évaluation non destructive du module d'élasticité statique réside principalement dans le fait de développer des modèles de prédiction. Ces derniers permettent d'estimer la relation entre les modules d'élasticité statiques (MOES) : en flexion trois points et en compression parallèle et les modules d'élasticité dynamiques (MOED) mesurés par deux méthodes non destructives : le tomographe acoustique et l'ultrason.

Plusieurs études antérieures ont examiné la relation entre le MOED du bois mesuré à l'aide des techniques acoustiques et le MOES déterminé par les essais statiques conventionnels (Sales et al., 2011). Les travaux de Koubaa et al. (2012) ont relevé une corrélation linéaire significative entre le MOED et le MOES pour différentes essences de bois et spécifiquement pour l'érable à sucre. Des résultats similaires ont été déterminés par Zhenbo et al. (2006). Horáček et al. (2012) ont montré des coefficients de régression qui atteignent 0,96 entre le MOED mesuré par la méthode d'ultrason et le MOES en flexion pour le bois de pin sylvestre.

Dans la présente étude, une analyse de régression entre les modules d'élasticité dynamiques et la masse volumique ainsi qu'entre les modules dynamiques et statiques a été effectuée. En partant par les relations entre les modules dynamiques (MOED<sub>U</sub> et MOED<sub>T</sub>) et la masse volumique (MV), les coefficients de régression obtenus sont faibles (Figure 3.15), mais un peu supérieurs à ceux trouvés à l'échelle des cernes. Cela peut être expliqué par la différence de l'échelle (Boulimi, 2014) et de la méthode (Polge 1978) de mesure de la masse volumique utilisés vu que le MOED a été mesuré de la même façon.

En ce qui concerne les relations entre le MOED<sub>U</sub> et les modules statiques (MOES<sub>F</sub> et MOES<sub>C</sub>), une forte régression significative a été obtenue pour ces deux relations avec des coefficients qui atteignent respectivement  $R^2=0,89$  et  $R^2=0,71$  (Figure 3.16). Des

résultats comparables ont été trouvés pour la relation avec le  $MOES_F$  (Jarboui, 2019; Van de Kuilen et al., 2007, Mvolo et al., 2021, Van Duong et al., 2022) et pour la relation avec le  $MOES_C$  (Bouhajja, 2015, Gallego et al., 2021). Quant aux relations entre le  $MOED_T$  et les mêmes autres modules statiques étudiés (Figure 3.17), les coefficients de détermination sont respectivement 0,60 et 0,51. La figure 3.18 montre la relation entre les deux modules dynamiques étudiés ( $MOED_U$  et  $MOED_T$ ) avec un  $R^2=0,61$ . Il est à noter que ces différentes relations avec la méthode du tomographe acoustique sont peu étudiées dans la littérature.

En observant les résultats des mesures du MOES et du MOED, la constatation qui peut être tirée que les valeurs du MOED mesurées par la technique d'ultrason sont supérieures à celles des valeurs du MOES obtenues par des essais statiques à des pourcentages aux alentours de 40%. Ceci est en accord aux résultats de Haines et al. (1996) qui montrent que le MOED est souvent supérieurs MOES à des pourcentages allant de 7 à 40 % selon les essences de bois étudiées.

La différence entre le module d'élasticité des méthodes dynamiques et celui obtenu à partir des essais statiques peut être expliquée par différents facteurs. D'une part, le comportement viscoélastique et la capacité d'absorption des chocs élevée du bois expliquent les valeurs élevées du MOED par rapport au MOES (Haines et al., 1996). D'autre part, l'étude Chiu et al. (2013) montre une autre approche basée sur les caractéristiques vibratoires du bois où la force élastique restaurée présente une variation proportionnelle au déplacement. En revanche, la force dissipative est proportionnelle à la vitesse. Par conséquent, si on applique une force pour une courte durée sur le bois, ce dernier présente un comportement élastique solide. Cependant, si la force appliquée demeure relativement pour une longue période, le bois se comporte comme un liquide visqueux. Ce comportement se présente davantage dans le test statique (longue durée) que le test dynamique par la méthode d'ultrason. Pour cela, le  $MOED_U$  est supérieur aux modules statiques étudiés.

Pour les valeurs du MOED mesurées par le tomographe, elles sont très faibles par rapport au module dynamique ( $MOED_U$ ) ainsi qu'aux modules statiques ( $MOES_F$  et  $MOES_C$ ). En effet, ces valeurs représentent seulement de 3 à 12% du  $MOES_F$ , 3 à 16% du  $MOES_C$  et 2 à 7% du  $MOED_U$ . Cela peut être dû au fait que les hautes fréquences de la méthode d'ultrasons sont supérieures à celle du tomographe. Vu que la vitesse de propagation de l'onde sonore est directement proportionnelle à la fréquence, le module d'élasticité, qui est proportionnel au carré de la vitesse, diminue lorsque la fréquence diminue (Sales et al., 2011).

De plus, les valeurs des vitesses mesurées avec le tomographe acoustique varient entre 494 m/s et 1245 m/s. Ces valeurs sont comparables aux valeurs des vitesses mesurées sur le hêtre qui sont comprises entre 460 m/s et 2350 m/s (Martinis et al., 2004).

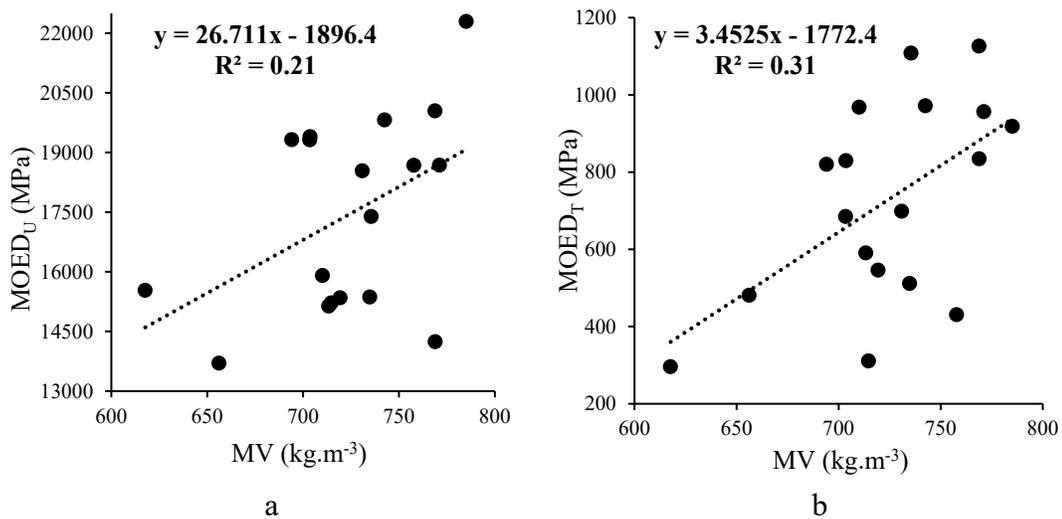


Figure 3.15 : Régressions (a) entre la masse volumique (MV) et le MOED d'ultrason (MV Vs  $MOED_U$ ) et (b) entre la MV et le MOED du tomographe (MV Vs  $MOED_T$ )

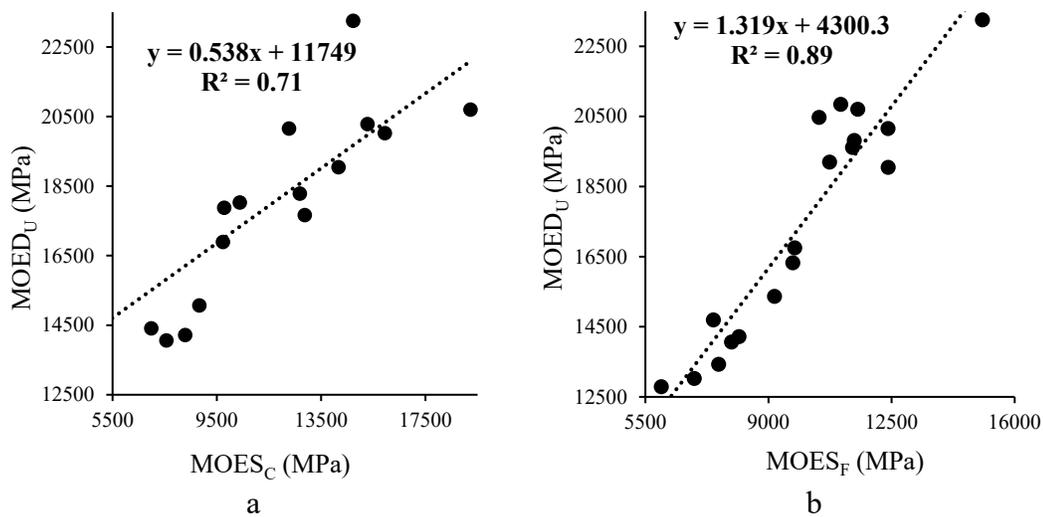


Figure 3.16 : Régressions (a) entre le MOED d'ultrason et le MOES en compression (MOED<sub>U</sub> Vs MOES<sub>C</sub>) et (b) entre le MOED<sub>U</sub> et le MOES en flexion (MOED<sub>U</sub> Vs MOES<sub>F</sub>)

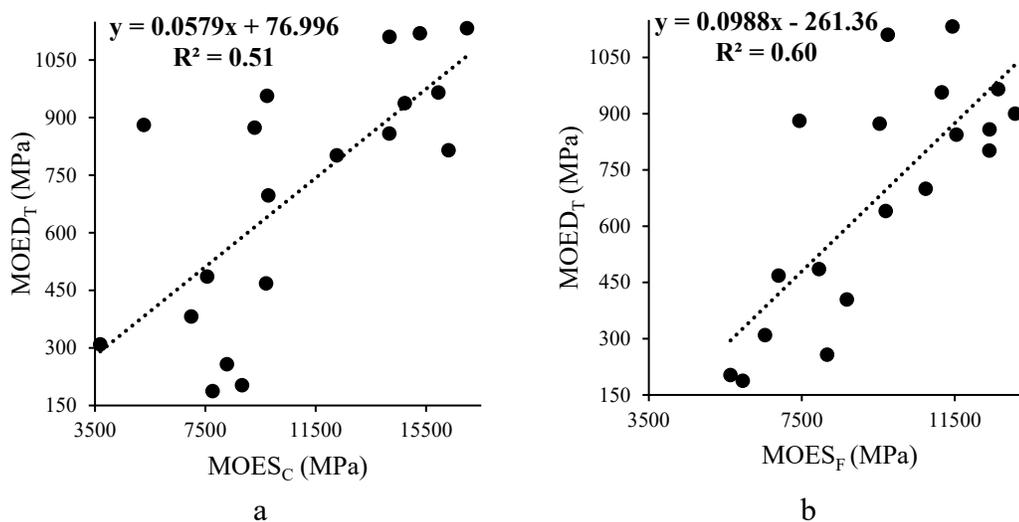


Figure 3.17 : Régressions (a) entre le MOED du tomographe et le MOES en compression (MOED<sub>T</sub> Vs MOES<sub>C</sub>) et (b) entre le MOED<sub>T</sub> et le MOES en flexion (MOED<sub>T</sub> Vs MOES<sub>F</sub>)

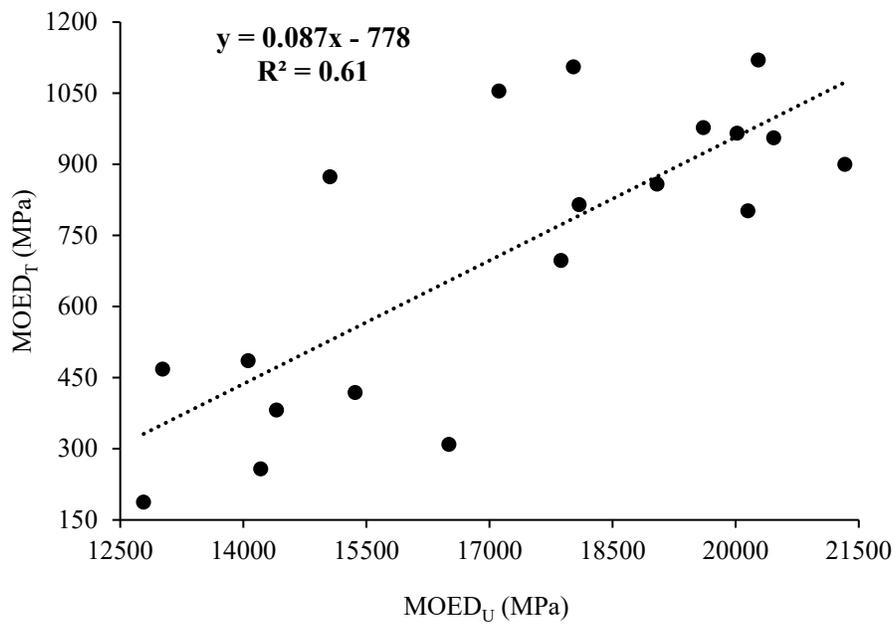


Figure 3.18 : Régression entre le MOED du tomographe et d'ultrason (MOED<sub>T</sub> Vs MOED<sub>U</sub>)

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce projet consistait à évaluer l'effet de la coloration et la carie sur les propriétés mécaniques du bois de l'érable à sucre en utilisant des outils non destructifs. Les variations intracerne et intra-arbre de ces propriétés ont été également étudiées. Pour ce faire, deux types d'échantillonnage ont été effectués :

- 1) Un échantillonnage pour la caractérisation non destructive se traduit par 53 arbres sur pied sélectionnés des deux sites localisés à l'Abitibi-Témiscamingue.
- 2) un échantillonnage pour la caractérisation destructive se traduit par 18 billes sélectionnées et récoltées des deux sites situés à La Tuque.

La détermination de la vitesse de l'onde sonore en utilisant le tomographe acoustique et de la masse volumique en utilisant le densitomètre à rayon X permet d'évaluer le module d'élasticité dynamique (MOED) de l'érable à sucre non seulement à l'échelle du cerne, mais aussi à l'échelle de l'arbre.

Pour le premier échantillonnage, une caractérisation non destructive de la masse volumique et du MOED a été effectuée à l'échelle du cerne et ses composantes (bois initial et le bois final). Les analyses des profils des variations des différentes propriétés du bois nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les propriétés mécaniques du bois peuvent être examinées avec précision à l'échelle intracerne à l'aide des outils non destructifs particulièrement le tomographe acoustique et le densitomètre à rayon X.

- À l'échelle intracerne, le patron de la variation du MOED suit une fonction polynomiale de 6<sup>e</sup> degré. De plus, les points d'inflexion de ce patron présentent également les points de transition entre le bois initial et le bois final de chaque cerne annuel.
- Le MOED augmente de la moelle à l'écorce avec une grande fluctuation afin qu'il se stabilise relativement à partir du 70<sup>e</sup> cerne.

L'analyse des variances de cette partie montre que le site, la classe DHP ainsi que la classe de coloration ont un effet significatif sur les modules d'élasticité dynamiques du cerne et ses composantes. Cependant, ces facteurs n'ont aucun effet significatif sur la masse volumique et ses composantes. D'ailleurs, la diminution du MOED s'accroît en augmentant la proportion de la coloration chez l'arbre. Contrairement à la masse volumique qui a subi une légère variation.

Le bois de l'érable à sucre est relativement homogène. La densité moyenne des cernes des arbres étudiés était de  $643 \text{ kg.m}^{-3}$ , avec une légère variation entre le bois initial et le bois final.

Les résultats de l'analyse de régression entre le MOED et la masse volumique ont révélé une faible relation. Effectivement, la variation de la masse volumique explique uniquement environ 15 % de la variation du MOED. Pour cela, l'utilisation de cette dernière seule pour prédire les propriétés mécaniques et évaluer l'impact de la coloration et la carie du bois ne semble pas être suffisante pour refléter et évaluer d'une manière efficace les propriétés mécaniques spécifiquement le MOED. Dans ce contexte, considérant l'importance de prédire les propriétés mécaniques, il est recommandé d'étudier l'influence de la coloration sur l'angle des microfibrilles (AMF). En effet, l'AMF cause des perturbations du chemin de propagation des ondes ultrasonores, ce qui à son tour entraîne des modifications du MOED.

Pour le deuxième échantillonnage, deux types de caractérisation (destructive et non destructive) ont été effectués à l'échelle de l'arbre. La coloration a un effet non significatif sur la masse volumique et le module en flexion, mais un effet significatif sur le module en compression parallèle, le MOED d'ultrason et le MOED du tomographe. Cependant, les interactions entre la classe de coloration et la classe de DHP sont statiquement significatives sur toutes les propriétés étudiées.

Tous les modules d'élasticité statiques et dynamiques étudiés ont subi une diminution sous l'effet de la coloration et de la carie alors que la masse volumique présente une variation relativement faible. Par conséquent, il semble que la coloration engendre un changement au niveau structurel du bois même s'il n'y avait pas une perte de la densité.

Un faible coefficient de détermination a été obtenu entre les modules d'élasticité dynamiques et la masse volumique. En revanche, ces modules étaient bien corrélés avec les modules statiques avec des coefficients allant jusqu'à 0,89. Pour cela, cette étude valide que le tomographe acoustique ainsi que la méthode d'ultrason sont efficaces pour l'évaluation d'une façon non destructive des propriétés mécaniques de l'érable à sucre.

Cependant, il est également à noter que le matériel utilisé dans cette étude est limité, seulement 70 arbres ont été sélectionnés dans 4 peuplements forestiers de la région de La Tuque et de l'Abitibi-Témiscamingue au Québec, Canada. Bien que les résultats soient comparables aux résultats des études précédentes, ils ne sont qu'indicatifs en raison des limites des données.

Le tomographe acoustique est une technique encore naissante au Canada et a le potentiel d'être amélioré dans un avenir proche. Cet équipement est utilisé généralement pour la détection et la prédiction de la pourriture des arbres sur pied. D'ailleurs, une bonne relation existe entre la proportion de la carie détectée par le tomographe acoustique et la quantité réellement présente dans les sections

transversales des troncs des arbres ( $R^2 = 0,76$ ). Néanmoins, peu d'études l'ont utilisé pour prédire les propriétés mécaniques et évaluer l'effet la carie du bois sur ces propriétés.

D'un grand potentiel d'utilisation, le tomographe acoustique a besoin de validations avant d'être utilisé à grande échelle. Afin de pouvoir prédire avec plus de précision et de réalisme l'effet de la coloration sur les caractéristiques du bois produit dans les régions nordiques, d'autres recherches avec d'autres essences doivent être menées à l'aide d'un ensemble de données plus important qui représente une plus grande variété de zones géographiques. De plus, il est nécessaire d'approfondir les recherches sur le phénomène de propagation des ondes sonores dans le bois en établissant des liens directs entre la carie dans le bois qui se manifeste par la coloration et la perte des propriétés mécaniques. Il est ainsi important de développer d'autres méthodes qui relient la carie et les pertes des propriétés mécaniques afin d'optimiser l'utilisation du tomographe acoustique.

## ANNEXES

### Annexe A. Méthode du calcul des pourcentages de réduction

Le calcul des pourcentages de réduction (3.4.2 et 3.4.3) entre les valeurs moyennes des propriétés étudiées mesurées au niveau du bois coloré/carié et niveau du bois sain a été effectué en utilisant l'équation A.1.

$$R\% = \left(1 - \frac{VMBC}{VMBS}\right) \times 100 \quad (A.1)$$

Avec :

- R% : Pourcentage de réduction
- VMBC : Valeur moyenne mesurée au niveau du bois coloré/carié
- VMBS : Valeur moyenne mesurée au niveau du bois sain

Le tableau A.1 présente les variations de la MV et du MOED moyennes du cerne, du bois initial et du bois final en fonction de la classe de coloration (très pourri, pourri et coloré) et l'état du bois (coloré/carié ou sain) pour 53 arbres ainsi que les pourcentages de réduction (Équation A.1) entre les valeurs du bois coloré et sain.

Tableau A.1 : Valeurs moyennes et pourcentages de réduction de la masse volumique au niveau des cernes ( $MV_C$ ), du bois initial ( $MV_{BI}$ ) et du bois final ( $MV_{BF}$ ) et du MOED au niveau des cernes ( $MOED_C$ ), du bois initial ( $MOED_{BI}$ ) et du bois final ( $MOED_{BF}$ ) pour 53 arbres

<b>Propriétés</b>	<b>Classe de coloration</b>	<b>VMBC</b>	<b>VMBS</b>	<b>R%</b>
$MV_C$	Très pourri	647,57	660,37	1,94
	Pourri	691,66	664,04	-4,16
	Coloré	709,37	663,27	-6,95
$MV_{BI}$	Très pourri	631,13	651,11	3,07
	Pourri	679,33	654,23	-3,84
	Coloré	696,41	654,71	-6,37
$MV_{BF}$	Très pourri	682,09	680,28	-0,27
	Pourri	717,21	685,51	-4,62
	Coloré	736,14	682,48	-7,86
$MOED_C$	Très pourri	387,28	646,33	40,08
	Pourri	439,87	647,31	32,05
	Coloré	657,61	724,95	9,29
$MOED_{BI}$	Très pourri	378,04	637,45	40,69
	Pourri	460,51	637,83	27,80
	Coloré	646,31	715,58	9,68
$MOED_{BF}$	Très pourri	407,08	665,49	38,83
	Pourri	487,9	668,38	27,00
	Coloré	681,19	746,07	8,70

Le tableau A.2 présente les variations de la MV et les propriétés mécaniques moyennes tels que les modules d'élasticité statiques ( $MOES_F$  et  $MOES_C$ ) et les modules d'élasticité dynamiques ( $MOED_U$  et  $MOED_T$ ) pour 18 billes en fonction de la classe de coloration

(très pourri, pourri et coloré) et l'état du bois (coloré/carié ou sain) ainsi que les pourcentages de réduction (Équation A.1) entre les valeurs du bois coloré et sain.

Tableau A.2 : Valeurs moyennes et pourcentages de réduction de la masse volumique (MV) et les modules d'élasticité en flexion (MOES<sub>F</sub>), en compression (MOES<sub>C</sub>), d'ultrason (MOED<sub>U</sub>) et du tomographe acoustique (MOED<sub>T</sub>) au niveau de 18 billes

<b>Propriétés</b>	<b>Classe de coloration</b>	<b>VMBC</b>	<b>VMBS</b>	<b>R%</b>
MV	Très pourri	626,1	654,3	4,3
	Pourri	701,8	726,4	3,4
	Coloré	723,8	748,8	3,3
MOES <sub>F</sub>	Très pourri	7059,4	8823,5	20
	Pourri	7887,5	10290,4	23,4
	Coloré	10022,1	11303	11,3
MOES <sub>C</sub>	Très pourri	8025,3	10969,6	26,8
	Pourri	7860,0	11461,6	31,4
	Coloré	10124,4	13220,7	23,4
MOED <sub>U</sub>	Très pourri	13499,7	15731,5	14,2
	Pourri	15255,7	17757,4	14,1
	Coloré	18469,9	18650,7	1,0
MOED <sub>T</sub>	Très pourri	222,6	558,9	60,2
	Pourri	387,0	632,9	38,9
	Coloré	871,1	995,0	12,4

## RÉFÉRENCES

- Alteyrac, J. (2005). Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea Mariana* (MILL.)B.S.P.). Thèse de doctorat. Université Laval, Québec, Québec, Canada. 136p.
- Alteyrac, J., Cloutier, A., et Zhang, S. (2006). Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) at different stand densities and sampling heights. *Wood Science and Technology*, 40, 124-138.
- Anseau, C., et Bernier, H. (1995). L'érable à sucre Caractéristiques, écologie et aménagement, Description morphologique de l'arbre. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, 13-16.
- Babin, A. (1995). L'acériculture, une activité économique en mutation. *Géographes*, 6, 43-54.
- Bættig, P., et Ricardo, M. (2005). Exploitation d'un rayonnement X poly-énergétique pour la détermination de la teneur en eau et de l'angle de microfibrilles du bois: approche théorique et expérimentale. Thèse de doctorat, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy, France, 365p.
- Baral, S. K. (2016). Modélisation de la structure des arbres pour expliquer la qualité du bois d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.). Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada, 140p.

- Barrios, A., Trincado, G., et Watt, M. S. (2016). Wood properties of juvenile and mature wood of *Pinus radiata* D. Don trees growing on contrasting sites in Chile. *Forest Science*, 63, 184-191.
- Basham, J. (1991). Stem decay in living trees in Ontario's forests: a user's compendium and guide. Information report OX-408. In: Forestry Canada, Ontario region, Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste Marie, ON. 69p.
- Basham, J., et Anderson, H. (1977). Defect development in second-growth sugar maple in Ontario. I. Microfloral infection relationships associated with dead branches. *Canadian Journal of Botany*, 55, 934-976.
- Basham, J., et Morawski, Z. (1964). Cull studies. The defects and associated basidiomycete fungi in the heartwood of living trees in the forests of Ontario. Publication, Département foresterie, Canada, No 1072, 67p.
- Beall, F. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood science and technology*, 36, 197-212.
- Beall, F. C. (1987). Fundamentals of acoustic emission and acousto-ultrasonics. *Proceedings of the 6th Nondestructive Testing of Wood Symposium*. Washington, USA, pp. 3-28.
- Beall, F.C. 1987b. Fundamentals of acoustic emission and acousto-ultrasonics. In: *Proceedings, 6th symposium on nondestructive testing of wood; 1987 September 14–16; Pullman, WA. Pullman. WA: Washington State University: 3–28.*
- Blanchette, R. A. (1980). Wood decomposition by *Phellinus* (*Fomes*) *pini*: a scanning electron microscopy study. *Canadian Journal of Botany*, 58, 1496-1503.
- Board, C. G. S. (1991). *Drapeau National Du Canada (pour Utilisation À L'extérieur)*. Canadian General Standards Board, 58p. En ligne : <https://books.google.ca/books?id=4k7OzAEACAAJ>, Consulté le 6 mars 2021.

- Bouhajja, A. (2015). Effet des coupes partielles sur les propriétés mécaniques du bois de l'épinette noire (*Picea Mariana*). Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada, 122p.
- Boulet, B. (2003). Les champignons des arbres de l'est de l'Amérique du Nord. Les Publications du Québec, Québec, Canada. 727p.
- Boulet, B. et Landry, G. (2015). La carie des arbres : fondements, diagnostic et application (3e éd.). Les Publications du Québec, Québec, Canada. 368p.
- Boulimi, B. (2014). Variation intra-arbre, intrasites et intrasites des attributs de la qualité du bois *Thuja occidentalis* L.). Thèse de doctorat, Université du Québec Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada, 395p.
- Boulimi, B., Koubaa, A., et Bergeron, Y. (2014). Effects of biodegradation by brown-rot decay on selected wood properties in eastern white cedar (*Thuja occidentalis* L.). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 87, 87-98.
- Bowyer, J. L., Shmulsky, R., et Haygreen, J. G. (2003). *Forest products and wood science: An introduction*. Ames Iowa: Iowa State Press.
- Brashaw, B. K., Bucur, V., Divos, F., Goncalves, R., Lu, J., Meder, R., Pellerin, R. F., Potter, S., Ross, R. J., et Wang, X. (2009). Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update. *Forest products journal*, 59, 7-14.
- Bucur, V. (2005). Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees. *Ultrasonics*, 43, 237-239.
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood*, 2e éd. Springer Series in Wood Science Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. ISBN: 978-3-540-30594-1. 394p.
- Bucur, V. (2013). *Nondestructive characterization and imaging of wood*: Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 354p.

- Bucur, V., et Perrin, A. (1981). Détermination du module d'Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage. *Annales des Sciences Forestières*, 38, 283-298.
- Canada, R. N., (2020). L'état des forêts au Canada. Rapport annuel 2020. Ressources Naturelles Canada, Service Canadien des Forêts, Ottawa. 96p.
- Cantin, M. (1967). Propriétés d'usinage de 16 essences de bois de l'Est du Canada. Direction générale des Forêts. Publication (1111), 31.
- Cermak, J., Nadezhdina, N., Trcala, M., et Simon, J. (2015). Open field-applicable instrumental methods for structural and functional assessment of whole trees and stands. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 8, 226.
- Chiu, C.-M., Lin, C.-H., et Yang, T.-H. (2013). Application of nondestructive methods to evaluate mechanical Properties of 32-Year Old Taiwan Incense Cedar (*Calocedrusformosana*) wood. *BioResources*, 8, 688-700.
- Clermont, L., et Schwartz, H. (1952). The chemical composition of Canadian woods II. *Pulp Paper Magazine of Canada*, 52, 102.
- Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., et Crews, K. (2016). A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. *Construction and Building Materials*, 102, 963-976.
- Damodarasamy, S. (2009). *Basics of Structural Dynamics and Aseismic Design*: PHI Learning Private Limited, New Delhi. ISBN:978-81-203-3843-2. 344p.
- De Oliveira Feio, A. J. (2005). *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour*. Universidade do Minho Escola de Engenharia, Minho, Portugal, 219p.
- De Oliveira, F. G. R., Candian, M., Lucchette, F. F., Saigon, J. L., et Sales, A. (2005). A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture

- content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*). *Building and Environment*, 40, 297-300.
- De Oliveira, F. G. R., et Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97, 2443-2446.
- Downes, G. M., Nyakuengama, J. G., Evans, R., Northway, R., Blakemore, P., Dickson, R. L., et Lausberg, M. (2002). Relationship between wood density, microfibril angle and stiffness in thinned and fertilized *Pinus radiata*. *Iawa Journal*, 23, 253-265.
- Duchesne, I., Vincent, M., Wang, X. A., Ung, C.-H., et Swift, D. E. (2016). Wood mechanical properties and discoloured heartwood proportion in sugar maple and yellow birch grown in New Brunswick. *BioResources*, 11, 2007-2019.
- Dudkiewicz, M., et Durlak, W. (2021). Sustainable Management of Very Large Trees with the Use of Acoustic Tomography. *Sustainability*, 13, 12315.
- Dumont-Fillon, J. (1996). Contrôle non destructif (CND). *Techniques de l'Ingénieur R 1400*, 42p. En ligne : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/cnd-methodes-globales-et-volumiques-42585210/controle-non-destructif-cnd-r1400/>, Consulté le 21 juillet 2022.
- Dündar, T., et Divos, F. (2014). European Wood NDT & NDE Research and Practical Applications. *Eurasian Journal of Forest Science*, 1, 35-43.
- Dikrallah, A. (2007). Etude de la typologie des défauts des arbres sur pied, analyse de l'anisotropie acoustique et détection des altérations par tomographie: Application au Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V- Agdal, Rabat, Maroc, 146p.
- Everett, T. H., Weber, L. M., Berlyn, G. P. (2007). Tree structure and growth. *Encyclopaedia britannica*. En ligne :

<https://www.britannica.com/plant/tree/Tree-structure-and-growth>, Consulté le 4 février 2022.

- Fang, S., Yang, W., et Tian, Y. (2006). Clonal and within-tree variation in microfibril angle in poplar clones. *New Forests*, 31, 373.
- Farrar, J. L. (1996). *Les arbres du Canada*. Les Editions Fides. Ottawa, Canada, 502p.
- Feio, A. J. d. O. (2005). *Inspection and diagnosis of historical timber structures : NDT correlations and structural behaviour*. Thèse de doctorat, University of Minho, Minho, Portugal. 208p.
- Frenet, D. (2000). *Application de la technologie multi-elements à la caractérisation des matériaux par ondes acoustiques de surface en régime impulsionnel*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 170p.
- Gallego, A., Ripoll, M. A., Timbolmas, C., Rescalvo, F., Suarez, E., Valverde, I., et Merlo, E. (2021). Modulus of elasticity of I-214 young poplar wood from standing trees to sawn timber: influence of the age and stand density. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 1225-1239.
- Gallet, P., Brancheriau, L., Thaunay, P., et Lasaygues, P. (2010). *Caractérisation des bois sur pied par imagerie ultrasonore*. In : Société française d'acoustique. CFA 10 : actes du 10ème Congrès Français d'Acoustique. Lyon, France, 12-16 Avril 2010.
- Giammei, N., Proust, A., Marlot, D., Lenain, J. C., Lanvin, J.-D., Brancheriau, L., et Klinka, J.-M. (2008). *Utilisation de techniques émission acoustique et acousto-ultrasons pour évaluation de l'état d'endommagement d'une aile d'avion en bois*.
- Giammei, N., Proust, A., Marlot, D., Lenain, J. C., Lanvin, J.-D., Brancheriau, L., et Klinka, J.-M. (2008, mai). *Utilisation de techniques émission acoustique et acousto-ultrasons pour évaluation de l'état d'endommagement d'une aile d'avion*

en bois. Communication présentée les Journées Cofrend Confédération Française pour les Essais Non Destructifs, Toulouse, France. En ligne : <https://www.ndt.net/article/cofrend2008/papers/118.pdf>, Consulté le 05 octobre 2020.

- Gilbert, E. A., et 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(5), 277-281.
- Giroud, G., Defo, M., Champagne, E., et Barrette, J. (2020) Évaluation non destructive des propriétés du bois (Partie 3 - La spectroscopie proche infrarouge). En ligne <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/ARF156.pdf>, Consulté le 20 juin 2022.
- Gocke, L. (2017). PiCUS Sonic Tomograph: Software Manual Q74. Argus Electronic GmbH, Rostock, Allemagne, 91p.
- Godman, R. M., Yawney, H. W., et Tubbs, C. H. (1990). *Acer saccharum* Marsh. sugar maple. *Silvics of North America*, 2(654), 78.
- Grabner, M., Wimmer, R., Gierlinger, N., Evans, R., et Downes, G. (2005). "Heartwood extractives in larch and effects on X-ray densitometry." *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 2781-2786.
- Green, D. W., Winandy, J. E., et Kretschmann, D. E. (1999). Mechanical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 4.1-4.45, 113.
- Guller, B. (2007). The effects of thinning treatments on density, MOE, MOR and maximum crushing strength of *Pinus brutia* Ten. wood. *Annals of forest science*, 64, 467-475.

- Haines, D. W., Leban, J. M., et Herbe, C. (1996). Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*, 30, 253-263.
- Hasegawa, M., Takata, M., Matsumura, J., et Oda, K. (2011). Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics*, 51, 296-302.
- Holz, V. D. (1984). Über einige Zusammenhänge zwischen forstlich-biologischen und akustischen Eigenschaften von Klangholz (Resonanzholz). *Holztechnologie*, 25, 31-36.
- Horáček, P., Tippner, J., et Hassan, K. T. (2012). Nondestructive evaluation of static bending properties of Scots pine wood using stress wave technique. *Wood Research*, 57, 359-366.
- Huang, C.-L., Lindström, H., Nakada, R., et Ralston, J. (2003). Cell wall structure and wood properties determined by acoustics—a selective review. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 321-335.
- Jarboui, W. (2019). Évaluation triaxiale des propriétés mécaniques du bois par les méthodes non-destructives. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada, 192p.
- Jeong, G. Y., Zink-Sharp, A., et Hindman, D. P. (2009). Tensile properties of earlywood and latewood from loblolly pine (*Pinus taeda*) using digital image correlation. *Wood and fiber science*, 41, 51-63.
- Jessome, A. (1977). Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada. Eastern Forest Products Laboratory, 37p. En ligne : <https://library.fpinnovations.ca/en/permalink/fpipub5201>, Consulté le 21 juillet 2022.

- Jones, P., Schimleck, L., Peter, G., Daniels, R., et Clark III, A. (2005). Nondestructive estimation of *Pinus taeda* L. wood properties for samples from a wide range of sites in Georgia. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 85-92.
- Jozsa, L. A., and Middleton, G. R. (1994). A discussion of wood quality attributes and their practical implications. Forintek Canada Corp. No. SP-34. 42p. En ligne: <https://pdfs.semanticscholar.org/57b5/7386b0f5029e60812695c70ac34eb624069b.pdf>, Consulté le 21 juillet 2020.
- Jozsa, L., et Middleton, G. (1997). Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: nature et conséquences pratiques. Sainte-Foy, Québec: Forintek Canada Corporation, Division de l'Est. 42p.
- Kennedy, R. (1995). Coniferous wood quality in the future: concerns and strategies. *Wood Science and Technology*, 29, 321-338.
- Kharrat, W. (2016). Conception et validation d'un dispositif pour la mesure du module d'élasticité dynamique dans le bois. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada, 112p.
- Kharrat, W., Koubaa, A., Khelif, M., et Bradai, C. (2019). Intra-Ring Wood Density and Dynamic Modulus of Elasticity Profiles for Black Spruce and Jack Pine from X-ray Densitometry and Ultrasonic Wave Velocity Measurement. *Forests*, 10, 569.
- Kirk, T., et Hammel, K. (1992, May 27-30). What Is the Primary Agent of Lignin Degradation in White-rot Fungi - Chapter 83. *Biotechnology in pulp and paper industry: Proceedings, 5th International conference on biotechnology in pulp and paper industry*, Kyoto, Japan. Tokyo, Japan.
- Koubaa, A., Schmittheisler, O., et Mvolo, C.-S. (2012). Use of x-ray densitometry and high frequency ultrasonic tools for non-destructive assessment of juvenile-

- mature wood quality. Pages 4-20 dans ForValueNet Conference, tenu le 6 décembre 2012, par Webinar.
- Koubaa, A., Zhang, S. T., et Makni, S. (2002). Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of forest science*, 59, 511-518.
- Kreber, B. (1995). The role of microorganisms in the phenomenon of hemlock brown stain. Thèse de doctorat. Université de Colombie-Britannique, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 202p.
- Lamb, F. M., et Marden, R. M. (1970). Variation in Density of Sugar Maple sapwood and heartwood. Research Note NC-90. St. Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station
- Lavallée, A. (1968). Détermination de la qualité de l'érable à sucre d'après des signes apparents de carie. *The Forestry Chronicle*, 44, 5-10.
- Lopez Saez, J., Corona, C., Berger, F., et Stoffel, M. (2009). L'utilisation de la résistographie en Dendrogéomorphologie. Retour d'expériences. Le cas du dépôt Pierres Jean Jeanne, Massif de l'Oisans, France. En ligne : <https://www.yumpu.com/fr/document/view/36980072/le-racsistographie-edytem>, Consulté le 21 juillet 2022.
- Lopez Saez, J., Corona, C., Berger, F., et Stoffel, M. (2010). L'utilisation de la résistographie en dendrogéomorphologie. Retour d'expériences. Collection EDYTEM. *Cahiers de géographie*, 11, 181-188.
- Lupien, P. (2006). Des feuillus nobles en Estrie et au Centre du Québec: guide de mise en valeur. Sherbrooke : Association forestière des Cantons de l'Est, 268p.
- Macdonald, E., et Hubert, J. (2002). A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry : An International Journal of Forest Research*, 75, 107-138.

- Martiansyah, I., Zulkarnaen, R. N., Hariri, M. R., Hutabarat, P. W. K., et Wardani, F. F. (2022). Tree Health Monitoring of Risky Trees in the Hotel Open Space: A Case Study in Rancamaya, Bogor. *Journal Sylva Lestari*, 10, 180-201.
- Martinis, R., Socco, L., Sambuelli, L., Nicolotti, G., Schmitt, O., et Bucur, V. (2004). Tomographie ultrasonore pour les arbres sur pied. *Annals of forest science*, 61, 157-162.
- Merela, M., et Katarina, K. (2013). Density and mechanical properties of oak sapwood versus heartwood. *Drvna industrija: Znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije*, 64, 323-334.
- MFFP. (2022). Guide d'utilisation de la carte interactive. Service des inventaires, Québec, 62p. En ligne : <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/inventaire-ecoforestier/foret-ouverte-wms/>, Consulté le 21 juillet 2022.
- Miller, R. (1999). "Structure of Wood; Wood handbook-Wood as an engineering material." General technical report. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin. 463 p.
- Mitchell, H.-L. (1961). A concept of intrinsic wood quality, and nondestructive methods for determining quality in standing timber: Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin. Report n°.2233.
- Moliński, W., Roszyk, E., et Puszyński, J. (2014). Variation in Mechanical Properties within Individual Annual Rings of the Resonance Spruce Wood *Picea abies* (L.) Karst.). *Drvna Industrija*, 65, 215-223.
- Mott, L., Groom, L., et Shaler, S. (2002). Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part II. Comparison of earlywood and latewood fibers with respect to tree height and juvenility. *Wood and Fiber Science*, 34, 221-237.

- Mullins, E. J., et McKnight, T. S. (1981). Les bois du Canada, leurs propriétés et leurs usages (traduction). Québec, Éditions du Pélican et Environnement Canada, 509p.
- Mvolo, C. S., Stewart, J. D., et Koubaa, A. (2021). Comparison between static modulus of elasticity, non-destructive testing moduli of elasticity and stress-wave speed in white spruce and lodgepole pine wood. *Wood Material Science & Engineering*, 1-11.
- Nowak, T., Hamrol-Bielecka, K., et Jasienko, J. (2015). Non-destructive testing of wood-correlation of ultrasonic and stress wave test results in glued laminated timber members. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology*, 92.
- Otjen, L., et Blanchette, R. A. (1986). A discussion of microstructural changes in wood during decomposition by white rot basidiomycetes. *Canadian Journal of Botany*, 64, 905-911.
- Panshin, A. J., et Zeeuw, C. (1980). "Textbook of wood technology: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada." New York, NY. 722p.
- Polge, H. (1978). "Fifteen years of wood radiation densitometry." *Wood Science and Technology*, 12, 187-196.
- Reis, M. N. d. (2017). Associação de métodos não destrutivos para inspeção de árvores= Association of nondestructive tools for tree inspection. Thèse de doctorat, Faculté de génie agricole de l'Université d'État de Campinas, Campinas, Brésil, 95p.
- Rinntech. (2015). Resistograph® Serie 6 Manual User, Technology and know-how for inspecting trees and forests, timber and structures, wood and tree-rings, Rintech e.k., Heidelberg, Germany, 15.

- Ross, R. J. (1992). Nondestructive testing of wood : Proceedings of Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials. University of Colorado.
- Ross, R. J. (1992). Nondestructive testing of wood: Proceedings of Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials. University of Colorado Boulder. 43-47p.
- Ross, R. J. (2010). Wood handbook: wood as an engineering material. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010, 509p.
- Ross, R. J., et Pellerin, R. F. (1994). Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. General Technical Report FPL-GTR-70 (Rev.), Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, WI. 1-40p.
- Winandy, J. E., & Rowell, R. M. (2005). Chemistry of Wood Strength. Chapitre 11, Pages 37-72, dans Rowell, R. M., "Handbook of wood chemistry and wood composites"; CRC Press, Taylor & Francis, New York, États-Unis.
- Sales, A., Candian, M., et de Salles Cardin, V. (2011). Evaluation of the mechanical properties of Brazilian lumber (*Goupia glabra*) by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials*, 25, 1450-1454.
- Scheffer, T.C. et Lindgren, R.M. (1940). Stains of sapwood and sapwood products and their control. USDA Technical Bulletin N°714, 121p.
- Schimleck, L., Evans, R., et Ilic, J. (2001). Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 1671-1675.
- Smulski, S. J. (1991). Relationship of stress wave-and static bending-determined properties of four northeastern hardwoods. *Wood and Fiber Science*, 23, 44-57.

- Sobue, N. (1986). Measurement of Young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a fast Fourier transformation spectrum analyzer. *Mokuzai Gakkaishi*, 32, 744-747.
- Son, J., Kim, S., Shin, J., Lee, G., et Kim, H. (2021). Reliability of non-destructive sonic tomography for detection of defects in old *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino trees. *Forest Science and Technology*, 17, 110-118.
- Tomikawa, Y., Iwase, Y., Arita, K., et Yamada, H. (1986). Nondestructive inspection of a wooden pole using ultrasonic computed tomography. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectric s, and frequency control*, 33, 354-358.
- Uzunovic, A., Byrne, T., Gignac, M., et Yang, D.-Q. (2008). *Les colorations du bois et leur prévention - Accent mis sur le bleuissement*, Pointe-Claire, FPIinnovations, Canada, 52p.
- Van de Kuilen, J. W. G., Ravenshorst, G. J. P., Brunetti, M., et Crivellaro, A. (2007). Species independent strength grading of hardwoods. In *International Scientific Conference on Hardwood Processing*, Quebec City (pp. 165-170).
- Van Duong, D., Schimleck, L., Tran, DL et Dai Vo, H. (2022). Variations radiales et interclonales de la vitesse des ondes de stress, de la densité du bois et des propriétés mécaniques chez des clones d'*Acacia auriculiformis* âgés de 5 ans. *BioResources*, 17, 2084.
- Wang, X., Senalik, C. A., et Ross, R. J. (2017). *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. General Technical Report FPL-GTR-246. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 539p.
- Wei, T.-C. (2001). *The morphology of decay by white rot and soft rot fungi*. Thèse de doctorat, State University of New York College of Environmental Science and Forestry Syracuse, New York, USA, 226p.

- Wiedenbeck, J. K. (2004). Defining hardwood veneer log quality attributes (Vol. 313). Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 36p.
- Witowski, P., Olek, W., et Bonarski, J. T. (2016). Changes in strength of Scots pine wood (*Pinus silvestris* L.) decayed by brown rot (*Coniophora puteana*) and white rot (*Trametes versicolor*). *Construction and Building Materials*, 102, 162-166.
- Yang, J.-L., et Fortin, Y. (2001). "Evaluating strength properties of *Pinus radiata* from ultrasonic measurements on increment cores." *Holzforschung*, 55, 606-610.
- Zhang, S. (1995). Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology*, 29, 451-465.
- Zhang, S. (2003). Wood quality attributes and their impacts on wood utilization, dans XII World Forestry Congress, Quebec City, Canada.
- Zhang, S. (2003). Wood quality attributes and their impacts on wood utilization. XII World Forestry Congress, Quebec City, Canada. En ligne: <https://www.fao.org/3/xii/0674-b1.htm#fn1>, Consulté le 04 octobre 2020.
- Zhang, S. Y., et Koubaa, A. (2009). Les résineux de l'Est du Canada: Écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. FPInnovations, Publication speciale SP.-526F, Québec, Canada. 400p.
- Zhenbo, L., Yixing, L., Haipeng, Y., et Junqi, Y. (2006). Measurement of the dynamic modulus of elasticity of wood panels. *Frontiers of Forestry in China*, 4, 425-430.
- Zobel, B. J., et Van Buijtenen, J. P. (2012). *Wood variation: its causes and control*. Springer Science et Business Media, Berlin, 363p.
- Zobel, B. J., et Van Buijtenen, J. P. (1989). *Wood variation: its causes and control*. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany, 363p.

Zobel, B. et Van Buijtenen, J. (1989). *Wood variation: its causes and control*. Springer-Verlag, Berlin, 363 p.

Zribi, Y. (2020). *Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur le module d'élasticité dynamique du bois de l'épinette noire à l'échelle du cerne*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada, 172p.