



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Caractérisation et prédiction des propriétés chimiques et de la masse volumique
du bois de l'érable à sucre par spectroscopie infra-rouge proche

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

YOUSSEF BEN SLIM

Juin 2023

DÉDICACE

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
que je dédie ce modeste travail de fin d'études
à mes chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour
ma réussite et m'ont éclairé le chemin par
leurs conseils judicieux.
J'espère qu'un jour,
Je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils m'ont
fait pour moi, que Dieu leur prête bonheur et longue vie.
Je dédie aussi ce travail à mon frère,
ma sœur, ma famille, mes amis,
tous mes professeurs qui m'ont enseigné
et à tous ceux qui me sentent chers.*

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
AVANT-PROPOS	x
RÉSUMÉ.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I.....	3
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1 Introduction.....	3
1.1.1 Description botanique.....	3
1.1.2 Habitat et végétation.....	4
1.1.3 Perturbations, insectes, champignons et maladies.....	5
1.1.4 Morphologie des tiges d'érable à sucre.....	6
1.2 Formation, qualité et caractéristiques du bois.....	10
1.2.1 Formation du bois.....	10
1.2.2 Qualité du bois.....	10
1.3 La carie du bois.....	21
1.3.1 Les parasites et les champignons de l'érable à sucre.....	21
1.3.2 Les champignons de carie blanche	22
1.3.3 Impact de la carie sur les propriétés du bois.....	23
1.4 Spectroscopie infrarouge proche.....	25
1.5 Problématique	30

1.6	Conclusion	31
	CHAPITRE II	32
	MATÉRIELS ET MÉTHODES	32
2.1	Introduction.....	32
2.2	Matériels	33
2.2.1	Choix et localisation des sites expérimentaux.....	33
2.2.2	Échantillonnage	34
2.2.3	Méthodologie.....	35
2.2.4	Analyses statistiques.....	44
2.3	Conclusion	47
	CHAPITRE III.....	48
	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	48
3.1	Introduction.....	48
3.2	Propriétés physiques	48
3.2.1	Proportions du duramen, de l'aubier et de la carie.....	48
3.2.2	Mesure de la masse volumique.....	50
3.3	Caractérisations des propriétés chimiques	55
3.3.1	Méthodes conventionnelles	55
3.3.2	Spectroscopie par l'infrarouge proche (NIRS).....	59
3.3.3	Corrélations des résultats chimiques avec les spectres infrarouges	61
3.4	Conclusion	69
	CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS PRATIQUES.....	70
	RÉFÉRENCES	72
	ANNEXES	84

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Illustration de croquis d'écorce, fruits, feuilles et bourgeons d' <i>Acer saccharum</i> (du gauche vers la droite) (Cope et al, 2002)	4
Figure 1.2 : Carte de végétation et des domaines bioclimatiques du Québec (Saucier et al. 2009).....	5
Figure 1.3 : Coupe transversale d'une tige d'arbre (Mohamed, 2018)	7
Figure 1.4 : Bois coloré formé à cause des blessures (a et b), limite du bois coloré (c) et (d) bois coloré compartimenté dans l'aubier (Baral et al., 2016)	9
Figure 1.5 : Image MEB d'une coupe transversale d'une surface périphérique du bois d'érable à sucre raboté avec un couteau fraîchement affûté et recouvert de polyuréthane obtenu par MEB (Fernando Moura, 2006).....	12
Figure 1.6 : a) Ultrastructure d'une paroi cellulaire de bois montrant schématiquement l'orientation des microfibrilles, b) une vue en coupe transversale (Su, 2015).....	13
Figure 1.7 : Structure moléculaire de la cellulose (Mounguengui, 2008).....	15
Figure 1.8 : Différents monosaccharides constituent les hémicelluloses (Mounguengui, 2008).....	16
Figure 1.9 : Structure générale de la lignine (Mounguengui, 2008)	17
Figure 1.10 : Effet de la coloration/carie sur le MOED au niveau des cernes (Ammar, 2022).....	23
Figure 1.11 : Effet de la coloration/carie sur la masse volumique au niveau des cernes (Ammar, 2022).....	24
Figure 1.12 : Bandes d'absorption dans la région NIR et spectre typique d'un échantillon de biomasse solide (Skvaril et al., 2017).....	25
Figure 1.13 : Spectre NIR pour différents clones de saule. Les principaux composants chimiques associés aux bandes spécifiques étaient (l) la lignine ; (c) la	

cellulose ; (he) les hémicellulose ; (ho) l'hollocellulose; (e) les extractibles ; (w) et l'eau (Sandak et al., 2017).....	28
Figure 1.14 : Modèles de prédictions PLS pour la cellulose (a), l'hémicellulose (b), les extractibles (c), l'hollocellulose (d), la teneur en lignine (e), et le pouvoir calorifique élevé (f) déterminés pour les clones de saule (Sandak et al., 2017)	29
Figure 2.1 : Localisation des sites expérimentaux (Saucier et al., 2009).....	34
Figure 2.2 : Échantillons de bois : à gauche une rondelle (2 sites, 18 arbres) et à droite une carotte (8 sites, 240 carottes).....	35
Figure 2.3 : a) Rondelle échantillonnée du bois d'érable à sucre, b) Préparations des échantillons pour le densitomètre à rayon X.....	36
Figure 2.4 : Extraction des substances extractibles à l'aide d'un soxhlet.....	37
Figure 2.5 : a) Dispositif expérimental du densitomètre à rayons X, et exemple d'un échantillon scanné par le densitomètre; b) Détermination de la transition du bois initial (BI) au bois final (BF) par la méthode de point d'inflexion (Bouslimi, 2014).	38
Figure 2.6 : Image d'un échantillon de bois d'érable à sucre traité par imageJ. La portion rouge correspond à l'aubier	39
Figure 2.7 : a) Séchage des échantillons dans un four à 50°C b) Broyeur à couteaux disponible au laboratoire biomatériaux à la Sarre.....	40
Figure 2.8 : Tamiseuse agitatrice de laboratoire	41
Figure : 2.9 : Montage d'extraction Soxhlet	42
Figure 2.10 : Spectrophotomètre NIR.....	44
Figure 3.1 : Exemple d'un échantillon carié de bois d'érable à sucre scanné par densitomètre à rayons X (échantillon T01-12R-3).....	51
Figure 3.2 : Variation de la masse volumique moyenne des cernes (a), de la masse volumique du bois initial (b) et de la masse volumique du bois final (c) en fonction de la classe du carie (C0, C1 et C2) et du bois (aubier, duramen et bois carier) chez	

l'érable à sucre. Classe de la carie : C0= bois sain ; C1= stade initial de décomposition et C2 = stade avancé de décomposition.....	53
Figure 3.3 : Variation de la composition chimique moyenne en extractible, cellulose, hémicellulose et lignine entre l'aubier, le duramen et la carie du bois d'érable à sucre	55
Figure 3.4 : Structure spongieuse du bois d'érable à sucre en phase terminale.....	59
Figure 3.5 : Spectre infrarouge proche (ligne noire continue) et spectre de la dérivée seconde (ligne grise) du bois d'érable à sucre. Les deux spectres indiquent la moyenne de tous les échantillons (n=44).....	59
Figure 3.6 : Effet du nombre de facteurs sur le RMSEC et le RMSECV pour les extractibles (A), la lignine (B), la cellulose (C) et l'hémicellulose (D).....	62
Figure 3.7 : Modèles de calibration obtenu après traitement statistique des résultats de dosage des extractibles (A), la lignine (B), la cellulose (C) et l'hémicellulose (D) des 44 échantillons et de leurs spectres NIR	65
Figure 3.8 : Modèle de calibration obtenu après traitement statistique des résultats de la masse volumique des 44 échantillons et de leurs spectres NIR	67
Figure 3.9 : Variation des différentes teneurs prédites de la composition chimique des carottes de bois d'érable à sucre en fonction des sites.....	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Composition chimique moyenne (pourcentage du poids de bois sec) du bois résineux et du bois feuillus et du bois d'érable à sucre adaptées par Gullichsen et al., (2000).	14
Tableau 1.2 : Composition chimiques du bois d'érable à sucre selon la littérature..	14
Tableau 1.3 : Propriétés mécaniques du bois d'érable à sucre adaptées par Ross (2010).....	20
Tableau 1.4 : Variation de R^2 entre différentes essences de bois.....	30
Tableau 3.1 : Statistiques descriptives des proportions en surface d'aubier, de duramen et de carie (%) par arbre entier (n=8 arbres cariés).....	49
Tableau 3.2 : Coefficients de corrélation de Pearson entre les proportions d'aubier, de duramen, de carie l'âge et le DHP.....	50
Tableau 3.3 : Moyennes et coefficients de variation de la masse volumique des cernes pour l'aubier, le duramen et la carie (coloré et stade avancé) prélevé à hauteur de poitrine des 18 rondelles de bois d'érable à sucre.	51
Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse de variance des effets fixes valeurs de F et de P, les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final pour l' <i>Acer saccharum</i>	54
Tableau 3.5 : Résultats de l'analyse de variance ANOVA de la composition chimique du bois d'érable à sucre.	57
Tableau 3.6 : Attribution des bandes d'absorption représentatives pour le bois d'érable à sucre	61
Tableau 3.7 : Caractéristiques des modèles de calibration obtenues en NIR.....	63
Tableau 3.8 : Valeurs indicatives générales pour estimer les performances d'un modèle, les applications appropriées mentionnées entre parenthèses.....	64
Tableau 3.9 : Comparaison entre les valeurs de la littérature avec leurs valeurs prédites par les modèles de calibration du bois d'érable à sucre.	66

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AC: Age cambial

CC : Classe de la carie

CV : Coefficient de variation

Def : Déformation

DHP : Diamètre à hauteur de poitrine (1,30 m)

FT-NIR : Fourier transform near-infrared spectroscopy

IR : Infrarouge

IT : Identity test

MOE : Modulus of elasticity

MOR : Modulus of rupture

NIR : Near infrared

NIRS : Near infrared spectroscopy

PCA : Analyse en composantes principales

PLS : Partial least squares

QMS : Quintek measurement system

RMSECV : Root mean square error of cross validation

RMSEC: Root mean square error of calibration

RPD : Relative percent difference

SEP : Standard error of prediction

Str : Stretching

AVANT-PROPOS

Cette étude rentre dans le cadre d'un projet qui cible la distribution, la croissance et la qualité des érablières nordiques de l'ouest du Québec dans un contexte de changements climatiques. C'est dans ce cadre que la présente maîtrise intitulée « Caractérisation et prédiction des propriétés chimiques et de la masse volumique du bois de l'érable à sucre par spectroscopie infra-rouge proche » a été menée. Ce travail est le fruit de la collaboration entre l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et le Ministère des forêts, de la faune et des parcs (MFFP). Je voudrais remercier M. Ahmed Koubaa directeur de recherche, Mme. Sana Koubaa codirectrice de recherche, M. Alexis Achim et M. Yves Bergeron codirecteurs de la mémoire pour leurs supports moraux et financiers contribuant à la réalisation de ce projet. Ce projet de recherche analysera les propriétés physiques et chimiques des érablières qui présentent une mauvaise qualité de tiges (coloration et carie) car cette problématique à laquelle sont confrontés les industriels est mal connue. Il devient donc important de caractériser le bois avec des méthodes non destructives comme le densitomètre à rayons X et la spectroscopie infrarouge proche. Sur la base de ces connaissances, nous pourrions modéliser la qualité et la croissance actuelle et future des érablières. Ce mémoire présente 5 parties :

1. Introduction comportant une mise en contexte, les objectifs ainsi que les hypothèses de ce projet.
2. Le premier chapitre résumant l'état de connaissance. Dans ce chapitre une revue de littérature a montré le potentiel du bois d'érable à sucre en particulier son abondance, sa masse volumique élevée, et ses bonnes propriétés mécaniques. Cependant, il a montré les points de faiblesse de cet arbre qui sont la coloration interne du bois de cœur et l'attaque par des champignons qui entraînent une dégradation importante de la qualité du bois.

3. Le deuxième chapitre résume l'approche méthodologique utilisée dans ce travail : les matériels pour la caractérisation chimique et physique du bois ainsi que la démarche pour la construction des modèles de prédictions.
4. Le troisième chapitre porte sur les résultats obtenus par la caractérisation des propriétés physiques et chimiques et l'efficacité des modèles prédictifs.
5. Les conclusions résument les résultats trouvés en concluant à quel degré les objectifs ont été atteints.

RÉSUMÉ

L'érable à sucre (*Acer saccharum*) est l'une des principales composantes de la forêt feuillue du sud-est du Canada. Il est généralement admis que les arbres peu vigoureux ont une faible croissance ainsi qu'une proportion de carie et de coloration plus importante. Cette augmentation de la proportion de coloration chez le bois de l'érable à sucre induit une baisse de sa valeur marchande et entraîne une variation importante de ses propriétés.

Les variations intra-arbres, intra-sites et inter-sites des attributs de la qualité du bois de l'érable à sucre ainsi que l'impact de la présence de la carie sur ses caractéristiques physiques et chimiques ont été étudiées. Plusieurs sites écologiques où cette essence est suffisamment abondante au Québec ont été échantillonnés. Deux types d'échantillonnage ont été réalisés : (i) un échantillonnage non destructif dans huit sites à raison de 240 carottes prélevé à hauteur de poitrine (1,3) et (ii) un échantillonnage destructif dans deux sites à raison de neuf arbres par site. Des travaux de caractérisation multi-échelles de la qualité du bois de l'érable à sucre ont été réalisés à l'aide de différents outils, notamment le densitomètre à rayons X, des analyses de la composition chimique du bois par des méthodes conventionnelles et de sa chimie de surface par la spectroscopie infrarouge proche.

Les études de densitomètre à rayons X et d'analyse par le logiciel de traitement d'images (ImageJ) de bois ont permis d'établir les profils des variations de la masse volumique des cernes et de déterminer les proportions de bois d'aubier, de duramen, et de carie. Les résultats ont montré une grande variation des proportions du type de bois entre les arbres et que la masse volumique moyenne du bois d'érable à sucre diminue avec l'apparition de la carie spécifiquement dans un état avancé. L'analyse des propriétés chimiques a montré que le bois de l'érable à sucre est très riche en celluloses (46,6%) et en hémicelluloses (30,5%). La présence de la carie blanche se manifeste par une diminution importante de la teneur en lignine. Les résultats ont été utilisés pour construire les modèles de prédictions des composantes chimiques en utilisant la spectroscopie infrarouge proche (NIR).

Les résultats obtenus lors de notre étude permettent de prédire la composition chimique dans un arbre et par la suite une détection de la présence ou pas de la pourriture pour cette population. Cela va permettre aux forestiers de cibler les meilleurs arbres pour la récolte.

Mots Clés : Érable à sucre, spectroscopie infrarouge proche, propriétés physico-chimiques de bois, chimie de surface, carie et coloration du bois, modèles de prédictions.

ABSTRACT

Sugar maple (*Acer saccharum*) is one of the main components of the northern hardwood forest of southeastern Canada. It is generally admitted that less vigorous trees have weak growth and a greater proportion of decay and discoloration. This increase in the proportion of discolored wood decreases its market value and leads to significant variations in its properties.

This study investigated the intra-tree, intra-site, and inter-site variations in the wood quality attributes of sugar maple and the impact of decay on its physical and chemical properties. Several ecological sites where this species is sufficiently abundant in Quebec were sampled. Two samplings were conducted: (i) non-destructive sampling at eight sites at the rate of 240 cores taken at diameter at breast height and (ii) destructive sampling at two sites at the rate of nine trees per site. Multi-scale characterization work on the quality of sugar maple wood was carried out using various X-ray densitometry, wood composition analysis by conventional methods, and near-infrared spectroscopy.

The X-ray densitometry studies and the analysis by the image processing software (ImageJ) of wood made it possible to establish the density variations profiles of the tree rings and to determine the proportions of SHD wood (Sapwood, Heartwood, and Decay). The results showed a large variation in wood proportions between trees. The average density of sugar maple wood decreases with the appearance of decay and specifically at an advanced state. The analysis of the chemical properties showed that sugar maple wood is very rich in cellulose (46.6%) and hemicellulose (30.5%). The significant decrease in the lignin content indicates the presence of white rot. However, the polysaccharides remain intact. The results were also used to establish predictive models of chemical components using near-infrared spectroscopy (NIRS).

These models established during our study are strong enough to determine the chemical composition in a tree and, subsequently, detect the presence or absence of decay for this population. These findings are important for foresters in selecting trees with the most interesting attributes.

Keywords: Sugar maple, Near-Infrared Spectroscopy, physico-chemical properties, surface chemistry, wood decay and discoloration, prediction models.

INTRODUCTION

Les érables sont des arbres et des arbustes du genre *Acer*. Il existe environ 150 espèces d'érables dans le monde, dont la plupart se trouvent dans les régions tempérées de l'hémisphère nord et sont originaires d'Asie de l'Est (Xin et al., 2002). En Amérique du Nord, les érables sont importants sur les plans écologique, économique et social (Faubert, 2007). Parmi les 13 espèces d'érable (genre *Acer*) que l'on trouve en Amérique du Nord, dix espèces se trouvent au Canada. Parmi elles, l'érable à sucre (*Acer saccharum*) est l'une des principales composantes de la forêt de feuillus du nord du sud-est du Canada (Faubert, 2007). Les érables à sucre sont économiquement importants pour la production de sirop d'érable et de bois de grande valeur. Le bois d'érable à sucre est très apprécié en raison de son aubier de couleur claire. Il est utilisé dans les produits extérieurs comme les placages, les planchers et les meubles (Baral et al., 2016).

La coloration et la carie du bois de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall) affectent la qualité de son bois (Havreljuk et al., 2013). Bien qu'ils ne soient pas mortels, ils réduisent le volume et entraînent une perte importante de valeur. Dans certains cas, de nombreux arbres sont tellement endommagés que la récolte n'est pas rentable. Il y a beaucoup de confusion sur les causes de la coloration du bois de l'érable à sucre, mais des recherches récentes ont montré que le tissu profondément coloré dans la zone du cœur était une tache ou une coloration et non du vrai bois de cœur. La difficulté à différencier le bois sain et le bois coloré ou carié rend difficile l'évaluation précise de sa performance. Ce qui signifie qu'il est essentiel de trouver de nouvelles méthodes de caractérisation du bois d'érable à sucre.

L'une des méthodes les plus intéressantes de caractérisation non destructives de la qualité de bois est le tomographe acoustique. Ammar (2022) a utilisé cet appareil pour la détection de la carie dans les peuplements d'érable à sucre et l'évaluation de son impact sur les propriétés mécaniques et physiques de ce bois. Cette étude a été effectuée comme une première partie d'un projet qui vise à caractériser la qualité et la croissance du bois des érablières nordiques.

La deuxième partie, sur laquelle ce mémoire est basé, consiste à caractériser les composants chimiques et la qualité du bois d'érable à sucre par la spectroscopie infrarouge proche (NIRS). Cette méthode a été utilisée récemment sur d'autres essences et elle a un potentiel élevé d'être non destructive et rapide pour estimer les propriétés chimiques et physiques du bois. Même dans certains cas, il a été prouvé que le NIRS pouvait différencier certains groupes d'essences de bois (Cooper et al., 2011). La spectroscopie infrarouge proche peut caractériser et différencier les zones de bois (aubier, duramen, et carie) en quelques secondes et sans préparation de surface sur la base des corrélations entre les différences chimiques observées dans les spectres NIR numérisés et les propriétés d'intérêt. Cette étude vise à (i) déterminer la relation entre la coloration/carie et les propriétés chimiques et physiques du bois dégradé de l'érable à sucre, (ii) créer des modèles prédictifs des composants chimiques du bois de l'érable à sucre et (iii) développer des modèles qui peuvent utiliser des variables chimiques et/ou physiques au niveau de l'arbre pour prédire la probabilité des arbres ayant une forme de cœur irrégulière ou attaqués par la carie.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

L'érable à sucre (*Acer saccharum*) est sans doute l'espèce la plus importante sur le plan écologique et économique dans les forêts feuillues du nord-est de l'Amérique du Nord. Écologiquement, l'érable à sucre fournit une litière riche en nutriments aux sols forestiers, favorise la minéralisation de l'azote, réduit le lessivage de nitrate dans les eaux souterraines et façonne la diversité des communautés de faune et de flore. Économiquement, l'arbre fournit les matières premières pour l'industrie du sirop d'érable et du bois dur durable pour les meubles et les planchers, et offre un feuillage d'automne esthétique (Bishop et al., 2015).

Aujourd'hui, l'érable à sucre, également connu sous le nom d'érable franc, est l'un des bois les plus utilisés en foresterie québécoise. En raison de sa dureté élevée, il est très apprécié sur le plan commercial, en particulier dans l'industrie de la construction grâce à sa qualité esthétique (Geoffroy, 2019).

1.1.1 Description botanique

L'érable à sucre est une espèce d'arbre à feuilles caduques à longue durée de vie. Elle peut vivre jusqu'à 250 ans (Payette et Rochefort, 2001). Elle a été reconnue sensible aux changements climatiques (Goldblum et Rigg, 2010).

L'arbre peut être identifié par ses feuilles jaunes, oranges et rouges à l'automne et est apprécié pour l'eau qui coule au printemps et sert à faire du sirop d'érable.

Cet arbre peut atteindre jusqu'à 45 mètres (150 pieds) de hauteur (Goldblum et Rigg, 2010).

La floraison a lieu au début du printemps après 30 à 55 jours de croissance. Son fruit mesure 1 à 3 cm de long, et porte deux graines globuleuses tombant de l'arbre en automne. La figure 1.1 représente une illustration de croquis d'écorce, fruits, feuilles et bourgeons d'*Acer saccharum*.

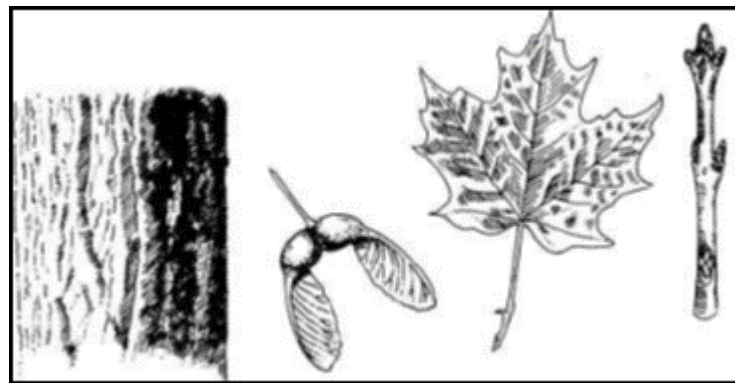


Figure 1.1 : Illustration de croquis d'écorce, fruits, feuilles et bourgeons d'*Acer saccharum* (du gauche vers la droite) (Cope et al, 2002)

1.1.2 Habitat et végétation

L'érable à sucre domine de nombreux peuplements forestiers de feuillus du nord et forêts mixtes de mésophytes. Il est réparti en Nouvelle-Écosse et dans l'ouest du Nouveau-Brunswick, en Ontario et au Manitoba, au sud du Minnesota, à l'est du Kansas, puis dans le nord-est du Texas (Baral et al., 2016). Les érables poussent dans une grande variété d'écosystèmes et d'altitudes, mais préfèrent les sols profonds, humides et fertiles. Ils constituent une partie importante de nombreuses forêts tempérées (Turner et al., 2009).

Au Québec, l'érable à sucre domine trois domaines bioclimatiques qui sont, du sud au nord : l'érablière à caryer cordiforme, l'érablière à tilleul et l'érablière à bouleau jaune. Ces trois domaines forment la zone bioclimatique tempérée du Québec qui s'étend du 42^e et 48^e degré de latitude (Gagnon, 2004). Au Québec, la sous-région

couvre une superficie de 110 800 kilomètres carrés, soit 7% de la superficie du Québec (Gagnon, 2004). L'érable à sucre est l'espèce dominante de l'érablière. D'autres espèces d'arbres à feuilles caduques (comme le hêtre, le frêne blanc, le tilleul, le chêne rouge et le bouleau jaune) sont moins abondantes.

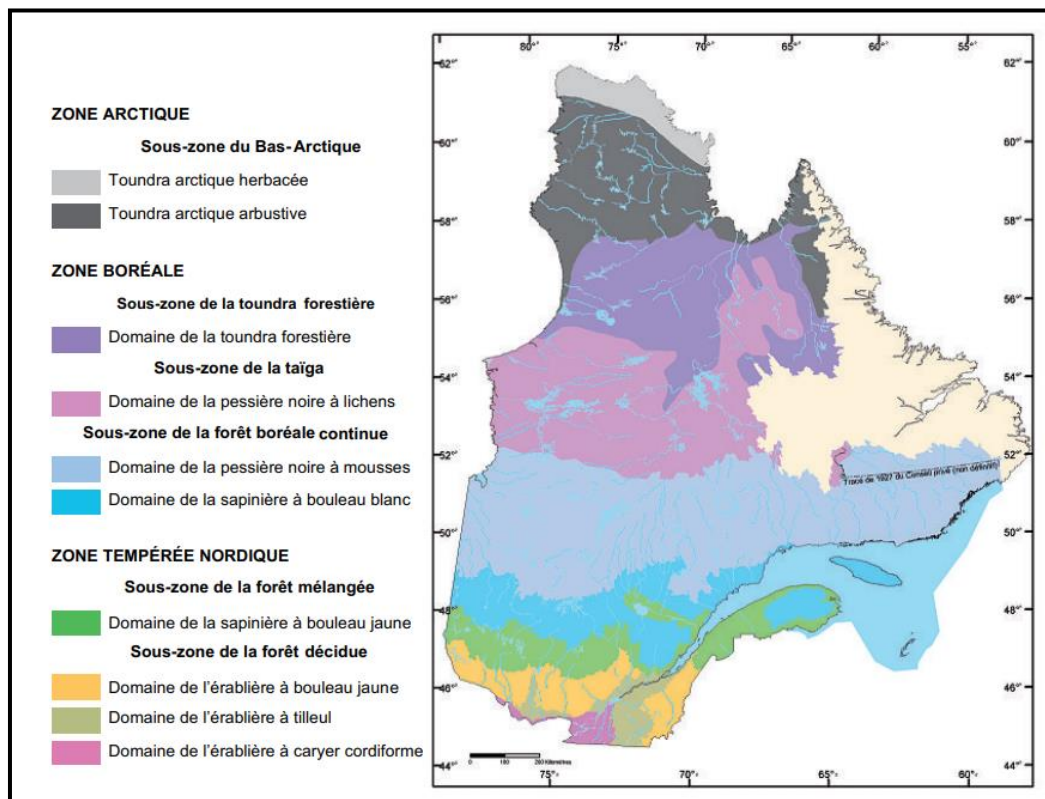


Figure 1.2 : Carte de végétation et des domaines bioclimatiques du Québec (Saucier et al. 2009)

1.1.3 Perturbations, insectes, champignons et maladies

Nombreux sont les facteurs qui influencent la croissance, la santé et la productivité des érablières (Houston et al., 1990). Il y a notamment les perturbations d'origine naturelle (blessures mécaniques), le stress climatique (la sécheresse et les gelées tardives), ainsi que les activités humaines (polluants atmosphériques) (Houston et al., 1990; Monger, 1991). À cela s'ajoutent, un nombre considérable d'insectes dont les actions peuvent conduire jusqu'au dépérissement ou déclin de l'arbre (Houston et al., 1990).

Les champignons peuvent causer des dommages allant de la nécrose foliaire jusqu'à la mortalité de l'arbre. En l'occurrence, les chancres affectent l'écorce et le tronc, entraînent des zones mortes et rendent l'arbre inadéquat à l'entailage (Houston et al., 1990; Monger, 1991).

Le bois est constitué majoritairement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Selon la substance qui se dégrade en premier, on distingue quatre catégories de champignons: les moisissures de surface et les colorations de l'aubier, les champignons de carie brune, les champignons de carie molle et enfin les champignons de carie blanche (Boulet, 2003; Martínez et al., 2005).

Ces derniers sont les plus courants et ils peuvent décomposer la lignine, la cellulose et les hémicelluloses. Les *basidiomycètes*, considérés comme les principaux agents de décomposition, génèrent des moisissures brunes et blanches. Les champignons infectent les deux types de plantes vasculaires (Angiospermes et Gymnospermes ligneuses), mais la pourriture brune affecte presque exclusivement les arbres résineux (Gymnospermes) (Green III et Mélanie, 1997; Martínez et al., 2005). Seulement la cellulose et les hémicelluloses sont dégradées par la pourriture brune. Le bois se sépare en petits morceaux d'où le nom de « carie brune cubique ». La lignine est responsable de la coloration brune. Martinez et al. (2005) ont étudié la biodégradation fongique des substances lignocellulosiques. La pourriture blanche est la plus dévastatrice parce qu'elle cible simultanément la lignine, la cellulose et les hémicelluloses. Les arbres feuillus sont les plus touchés. Les champignons en décomposition du bois forment des niches écologiques et fournissent des nutriments et un abri à une variété d'autres organismes grâce à ce processus de décomposition.

1.1.4 Morphologie des tiges d'érable à sucre

Le tronc d'un arbre est généralement constitué d'une fine couche d'écorce, de phloème, de cambium et de xylème (Figure 1.3). Une grande partie des arbres est représentée par le xylème, qui peut être divisé en aubier et en duramen (bois de cœur) (Baral et al., 2016). L'aubier est la partie conductrice active de la tige, où le

parenchyme est toujours actif et métaboliquement actif, tandis que le bois de cœur (duramen) ne participe pas aux transports de l'eau (Wiedenhoeft et Miller, 2005). Dans les érables à sucre, les 30 à 40 cernes de croissance externe sont physiologiquement actifs et sont utilisés pour la transmission de la sève et pour le stockage de réserve des substances telles que l'amidon (Baral et al., 2016; Christophe et al., 2001).

Le duramen est la couche interne du bois qui ne contient plus de cellules vivantes et le matériau de réserve qu'il contient a été retiré ou transformé en bois de cœur (IAWA, 1964). Le duramen se forme lorsque les vaisseaux sont bloqués par l'air, qui subit ensuite des changements histochimiques (Hillis, 1968). Les recherches de Good et al., (2011) ont fourni des preuves sur la formation du duramen de l'érable à sucre. Bien que les recherches sur la formation du duramen de l'érable à sucre soient très limitées, des études sur d'autres essences de feuillus à pores diffus ont montré que la formation du duramen est un mécanisme d'ajustement qui contrôle la quantité d'aubier (Bamber, 1976).

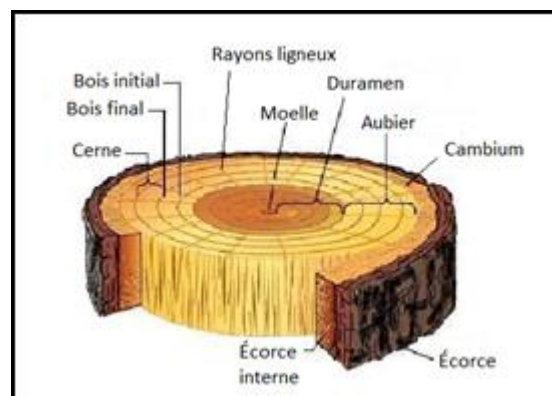


Figure 1.3 : Coupe transversale d'une tige d'arbre (Mohamed, 2018)

D'autre part, le bois coloré, que l'on observe autant dans l'aubier que dans le duramen, n'est pas formé par des processus physiologiques normaux, mais par une infection microbienne de tissus de xylème exposés par des blessures (Ohman, 1968). La formation de bois de couleur implique la modification du tissu du bois par le colmatage des vaisseaux, la formation de composés polyphénoliques et le

dépôt de substances foncées causées par des blessures et des infections (Ohman, 1968; Shigo, 1984). La teneur en humidité des cellules du bois autour du point de blessure diminue normalement à la suite d'embolies. Ces nouvelles conditions sont favorables à la colonisation microbienne et conduisent finalement à la coloration du bois (Baral et al., 2016).

Selon le modèle CODIT (Compartmentalisation of Decay in Trees), les arbres sont séparés par quatre lignes de défense (Dujesiefken, 2010). La zone affectée est isolée des tissus environnants en formant un compartiment étanche. La première ligne de défense est formée en bloquant les vaisseaux longitudinalement, la deuxième est formée radialement par la formation de bois mature dans chaque cerne de croissance, la troisième est formée par la paroi transversale formée par les cellules des rayons, et la quatrième ligne de défense consiste à produire des bandes de cellules de différentes tailles contenant des composés antibiotiques (par exemple, la subérine), inhibant ainsi la croissance des micro-organismes. Par conséquent, la colonne de coloration verticale est générée en bloquant les vaisseaux, modifiant ainsi la couleur, et la coloration radiale interne causée par le changement du contenu cellulaire dans le parenchyme des rayons (Shigo, 1979).

Lorsqu'un arbre est blessé, la coloration est le premier stade d'infestation qui conduira éventuellement à la carie. Shigo et Marx, (1977) ont montré une série d'organismes différents impliqués dans le processus de coloration et de carie du bois. Ils ont expliqué que la zone blessée était colonisée par des bactéries depuis le début. Après un certain temps, la zone affectée a été colonisée par des champignons non destructifs (Figures 1.4a, b). Enfin, les champignons de décomposition (*hyménomycètes*) infectent le substrat et les cellules du bois pourrissent complètement. Les champignons importants associés à la coloration et à la pourriture de l'érable à sucre sont *Conmmus conatus*, *Fommesignarius* et *Polyporusglomeratus* (Boulet, 2005).



Figure 1.4 : Bois coloré formé à cause des blessures (a et b), limite du bois coloré (c) et (d) bois coloré compartimenté dans l'aubier (Baral et al., 2016)

L'aubier coloré (Figure 1.4) est situé au point de lésion de l'aubier et la proportion de ce type de bois coloré est très faible au niveau de l'arbre (Hart, 1963). Au contraire, la proportion de xylème coloré est importante dans le centre. Ainsi, la zone de xylème de couleur blanc pâle dans la région externe est conçue comme une zone de bois clair et la zone de xylème de couleur foncée dans le centre est appelée zone de bois coloré. Cependant, ces zones de bois clair et coloré ne sont pas respectivement équivalentes aux zones physiologiques d'aubier et de bois de cœur. La zone de bois clair comprendrait les zones d'aubier et de bois de cœur non coloré, tandis que la zone de bois coloré comprendrait la petite zone d'aubier coloré et le bois de cœur coloré (Hart, 1963; Shigo, 1967).

Certains auteurs pensent que les composants en bois pourris et colorés ont des propriétés anatomiques et mécaniques différentes de celles du bois sain (Schwarze, 2007). Cependant, le degré de changement dépend de l'état de décomposition et de coloration.

1.2 Formation, qualité et caractéristiques du bois

1.2.1 Formation du bois

Le bois est un ensemble de tissus cellulaires plus ou moins durs qui forme la masse principale du tronc. Les tissus de bois sont constitués de cellules issues de la division de l'assise génératrice libéro-ligneuse ou par division du cambium (Bouslimi, 2014). C'est cette fonction de base qui permet au diamètre de l'arbre de croître. Les cellules cambiales donnent naissance aux cellules du liber (phloème) par division centrifuge, et aux cellules du bois (xylème) par division centripète. Les couches cellulaires les plus jeunes (les plus proches du cambium) forment le bois d'aubier. Les cellules plus âgées situées dans la zone intérieure constituent le duramen (ou bois de cœur), qui est formé à partir de l'aubier moyennant la mort des cellules et l'accumulation des matières extractibles (Fromm, 2013). De plus, Il existe une zone de bois intermédiaire entre le duramen et l'aubier (Bouslimi, 2014).

La croissance en diamètre en longueur du tronc, des branches et des racines convient à deux organisations différentes. La première appelée « croissance primaire » est assurée par le fonctionnement de méristèmes primaires localisés au sommet du tronc, des branches et des racines (Fromm, 2013). La seconde, appelée « croissance secondaire », est issue du cambium qui donne naissance à des cellules de méristèmes secondaires responsables de la croissance en diamètre (Bouslimi, 2014).

1.2.2 Qualité du bois

Jozsa et Middleton, (1994) ont défini la qualité du bois comme étant « son aptitude à être utilisée pour un usage précis ». Cependant, chaque caractéristique du bois dépend de son utilisation associée, contribuant ainsi à sa qualité. Par conséquent, bien qu'il soit parfois difficile de définir le concept de qualité, il existe plusieurs critères pour déterminer la capacité de la qualité à répondre aux exigences spécifiques. Certains sont liés à la structure du bois (anatomie, chimie), et d'autres à l'expression des facteurs intrinsèques (c'est-à-dire, la morphologie des trachéides

et les propriétés physiques et mécaniques). Toutefois, de nombreuses caractéristiques du bois sont héréditaires et contrôlées par les conditions de croissance. Par ailleurs, les facteurs déterminants de la qualité du bois dépendent des variations internes dans l'arbre, grâce à son caractère anisotrope qui est lié à la diversité des tissus et à leurs réponses aux changements des conditions extérieures (Bouslimi, 2014).

Compte tenu des multiples usages du bois, toutes les propriétés chimiques, anatomiques, physiques et mécaniques du bois peuvent être considérées comme des facteurs de qualité du bois. La compréhension de ses propriétés est très importante pour la bonne utilisation de ce dernier. Les facteurs de qualité du bois sont relativement nombreux, notamment la masse volumique du bois, le rapport entre le bois juvénile et le bois mature, le rapport entre le bois de cœur et l'aubier, le bois de compression, les propriétés mécaniques, la longueur et le diamètre des trachéides ainsi que la teneur en lignine, cellulose et hémicellulose et la quantité de matières extractibles (Bouslimi, 2014).

La masse volumique de bois, pour la plupart des essences, est considérée comme un critère déterminant de la qualité du bois car elle influence les propriétés mécaniques du bois (Barbour et al., 1996) et le rendement en fibres (Zhang, 1997).

1.2.2.1 Description anatomique

En matière de pourcentage en volume, l'érable à sucre possède 21% de vaisseaux, 61% de fibres, 17,9% de parenchymes radiales et 0,1% de parenchymes longitudinales. Les vaisseaux de l'érable à sucre sont de petits diamètres et sont uniformément répartis dans le cerne de croissance (porosité diffuse) (Figure 1.5). La longueur moyenne d'un seul vaisseau est de 0,41 mm. Le diamètre des fibres est de 16 à 30 μm et la longueur moyenne est de 0,92 mm (Moura, 2006). Les parois des fibres varient de minces à moyennement épaisses. Les rayons sont divisés en deux types de largeur, à savoir 3 à 8 cellules ou 1 à 2 cellules. Les rayons plus larges peuvent atteindre une hauteur de 800 μm , tandis que les rayons plus fins ne peuvent

généralement pas atteindre 200 μm . Le parenchyme longitudinal peut être des types paratrachéal, apotrachéal diffus, métatrachéal diffus ou terminal (Moura, 2006; Panshin et Zeeuw, 1980).

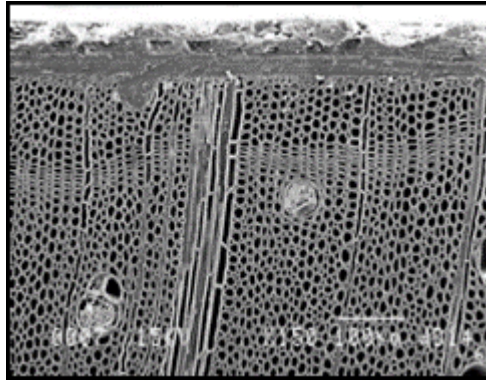


Figure 1.5 : Image MEB d'une coupe transversale d'une surface périphérique du bois d'érable à sucre raboté avec un couteau fraîchement affuté et recouvert de polyuréthane obtenu par MEB (Fernando Moura, 2006)

1.2.2.2 Composition chimique du bois

La composition chimique du bois est complexe et très hétérogène. Les principaux composants du bois sont les fibres de cellulose (35 à 50%), les microfibrilles, la matrice de lignine (18 à 25%) et l'hémicellulose (20 à 35%). Les extractibles ne représentent que 0% à 10% des composants chimiques mineurs, mais ils jouent un rôle important dans la durabilité du bois.

La paroi cellulaire du bois se compose de plusieurs couches, dont principalement la paroi primaire (P), la paroi secondaire (S) et la lamelle moyenne (ML) (Figure 1.6). La structure et la composition chimique de ces couches sont différentes. La paroi primaire est la première couche mince formée dans laquelle les microfibrilles sont peu serrées et disposées selon des motifs aléatoires. Puis une deuxième paroi (S) est formée, où les microfibrilles sont étroitement emballées et présentent un motif d'enroulement en spirale (Good et al., 2011). Sur la base de différentes orientations de microfibrilles, la paroi secondaire est en outre divisée en couche externe (S1), couche intermédiaire (S2) et couche interne (S3). Parmi eux, la couche externe (S1)

est formée en premier et a une structure de fibrilles croisées. La couche intermédiaire (S2) est généralement la partie la plus épaisse de la paroi cellulaire et son angle en microfibrilles est de 5-30°. La couche interne (S3) est la couche la plus fine et contient des microfibrilles avec un angle de 50 à 90° (Good et al., 2011). La lamelle moyenne est située entre les cellules, dans laquelle les parois principales des deux côtés sont adjacentes et ont pour fonction de lier les cellules entre elles. Elle est difficile à distinguer de la paroi primaire adjacente (P). La concentration de lignine (pourcentage dans chaque couche) est plus élevée dans la paroi primaire et la lamelle moyenne. La paroi secondaire (S) contient la plus forte concentration de polysaccharides.

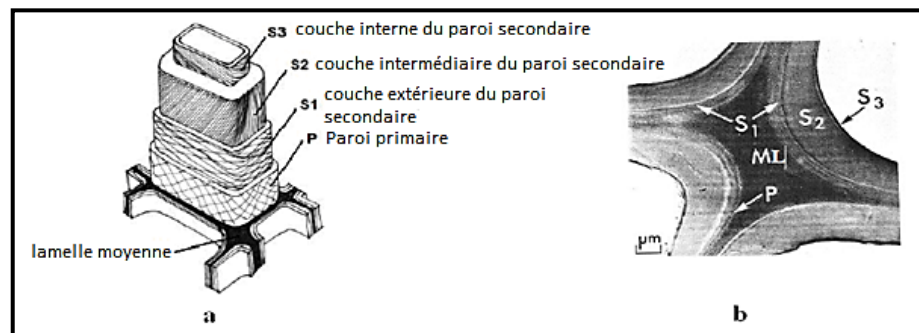


Figure 1.6 : a) Ultrastructure d'une paroi cellulaire de bois montrant schématiquement l'orientation des microfibrilles, b) une vue en coupe transversale (Su, 2015)

Le bois est un matériau constitué par des fibres naturelles avec des caractéristiques différentes en matière de forme et de composition chimique. Les principaux composants chimiques du bois sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. La cellulose est le principal composant des parois cellulaires entourées d'hémicellulose et de lignine. En plus de ces trois composants, le bois contient également de la pectine, de l'amidon et divers autres composés de faible poids moléculaire, tels que des extraits et des substances inorganiques à diverses concentrations. La distribution et la concentration de composants chimiques dans le bois varient d'une espèce à l'autre, d'un arbre à l'autre ou même au sein d'un même arbre. Le tableau 1.1 présente une comparaison entre les concentrations moyennes des principaux composants du bois dans les tiges de feuillus et de résineux.

Tableau 1.1 : Composition chimique moyenne (pourcentage du poids de bois sec) du bois résineux et du bois feuillus et du bois d'érable à sucre adaptées par Gullichsen et al., (2000).

Composant	Bois résineux	Bois feuillus
Cellulose	41-46	42-49
Hémicellulose	25-32	23-34
Lignine	26-31	20-26
Extractibles	1-2,5	2-8

Il est à souligner que les extractibles sont des composés à faible poids moléculaire contribuant significativement à conférer au bois certaines propriétés à savoir l'odeur, l'acidité et la couleur (Stevanovic et Perrin, 2009). La lignine, faite d'unités de phénylpropanes, est un composant structural du bois lui conférant son caractère rigide (Stevanovic et Perrin, 2009). La cellulose, quant à elle, est un polysaccharide fait d'unités linéairement juxtaposées d'anhydroglucose. Sa quantité contribue d'une façon décisive aux propriétés du bois en tant que biomatériau. Le glucomannane et le glucuronoxylane appartiennent respectivement aux groupes de mannane et de xylane de l'hémicellulose. Ce dernier adhère étroitement à la cellulose jouant le rôle de renfort mécanique (Stevanovic et Perrin, 2009). Le tableau 1.2 représente une comparaison entre les différents pourcentages de la composition chimique de l'érable à sucre selon d'autres travaux de recherches.

Tableau 1.2 : Composition chimiques du bois d'érable à sucre selon la littérature.

Références	Extractibles	Lignine	Cellulose	Hémicellulose
Sjostrom (1993)	5,5	25,5	40,7	30,8
Isenberg (1981)	2,73	20,3-21,8	56,8-60,8	22,3
Moura (2006)	1,37-2,65	21,1	46,8	22,2
Fengel et Wegener (1984)	1,9-2,9	20,7-25,3	38,3-47,4	-

Selon Moura, (2006), l'érable à sucre de l'Est canadien présente des proportions de lignine, de cellulose et d'hémicelluloses de 21,1%, 46,8% et 22,2%, respectivement. Les teneurs en extractibles solubles dans l'eau froide varient de 1,37% à 2,65%, et une teneur en cendres de 0,4%. Selon Panshin et De Zeeuw, (1980), la portion minérale de ce bois est riche en manganèse.

Le bois, comme les autres types de biomasses lignocellulosiques, est une matière organique, principalement composée de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, suivie d'autres hétéroatomes (N, S ...) et de composés inorganiques. Cette composition se traduit par des types de structures récurrentes.

- La cellulose

La cellulose est formée par une chaîne polymérique linéaire, constituée de glucose en tant qu'unité monomère $(C_6H_{10}O_5)_n$, dont une partie est représentée sur la figure 1.7. L'interaction physico-chimique entre les groupements hydroxyles d'une ou plusieurs molécules de cellulose rend le bois rigide. Ces interactions sous forme de liaisons hydrogènes sont également à l'origine de l'insolubilité de ce polymère relativement polaire dans l'eau et la plupart des solvants organiques (Geoffroy, 2019).

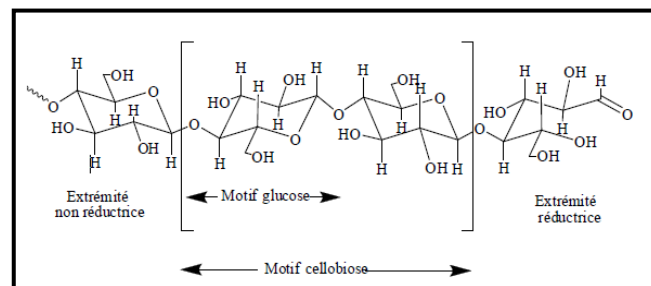


Figure 1.7 : Structure moléculaire de la cellulose (Mounguengui, 2008)

- Les hémicelluloses

L'hémicellulose est également un polysaccharide qui constitue la paroi cellulaire de bois, mais contrairement à la cellulose assez cristalline et à haut degré de

polymérisation, ce sont des polymères amorphes de plus faible poids moléculaire (Geoffroy, 2019).

Les hémicelluloses les plus courantes comprennent le mannose, le glucose, le galactose et l'arabinose et désoxy-aldose et ses formes uroniques. Les hémicelluloses sont hydrosolubles et leur structure globale (Figure 1.8) est constituée d'un réseau aléatoire très ramifié de dérivés de pentoses et d'hexoses.

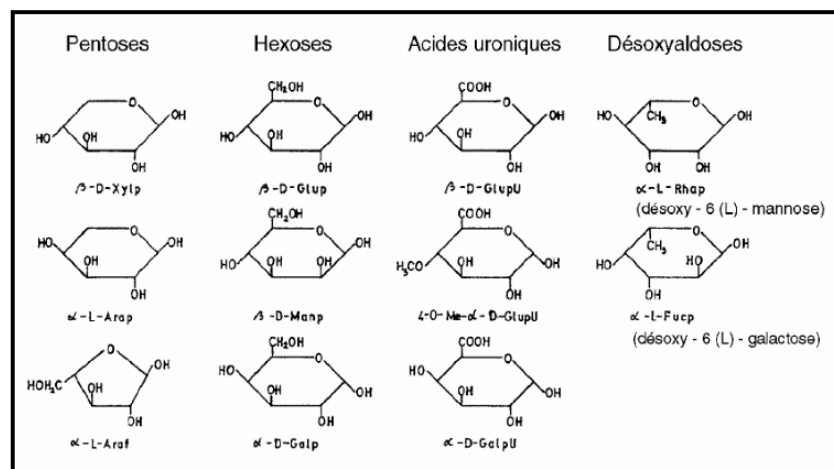


Figure 1.8 : Différents monosaccharides constituent les hémicelluloses (Mounguengui, 2008)

- La lignine

La lignine est un polymère phénolique composé d'unités phénylpropane utilisées pour lier la cellulose et l'hémicellulose à la paroi cellulaire, jouant ainsi un rôle protecteur (Geoffroy, 2019). C'est un polymère tridimensionnel synthétisé au niveau de la paroi cellulaire, résultant de la polymérisation oxydative de trois unités monomériques (Figure 1.9).

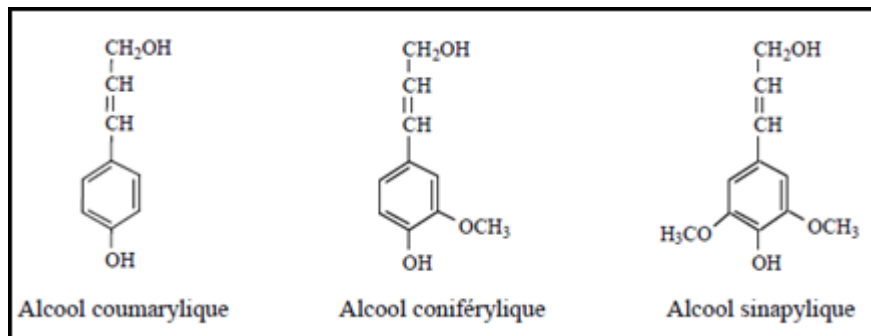


Figure 1.9 : Structure générale de la lignine (Mounguengui, 2008)

- Les extractibles

Les extractibles sont des composés de faible poids moléculaire qui sont solubles dans l'eau et/ou les solvants organiques. Ils sont situés dans la partie poreuse du bois et participent au fonctionnement normal de l'arbre. Leur quantité et leur nature varient selon les espèces d'arbres, le site d'échantillonnage, la saison et l'endroit où l'arbre pousse. Les extractibles déterminent de nombreuses caractéristiques du bois, telles que la durabilité, l'odeur ou la couleur (Mounguengui, 2008). Les taux d'extractibles dans les feuillus tempérés sont généralement inférieurs à ceux des résineux (Mounguengui, 2008).

Certains extractibles peuvent être lipophiles, tandis que d'autres sont hydrophiles. Selon leurs propriétés chimiques, ils peuvent être divisés en trois catégories : (1) les graisses et cires, (2) les terpènes, y compris les terpènes simples et les trapèzes et (3) les composés phénoliques, y compris les phénols simples, les flavonoïdes, les stilbènes, les lignanes et les tanins (Mounguengui, 2008).

- Les minéraux

Les minéraux, bien que leurs pourcentages soient très faibles, jouent un rôle important dans le développement des arbres. C'est le cas des minéraux comme le potassium, le calcium et le magnésium. La teneur en minéraux du bois dans les régions tropicales est plus élevée que celle du bois dans les régions tempérées et est généralement associée à des niveaux anormalement élevés de silice. C'est pourquoi le bois de *Baillonella toxisperma* a une teneur en silice très élevée de 0,2-0,5%, ce

qui pose des problèmes lors du sciage de ce dernier (Mounguengui, 2008). Une fois la matière organique brûlée à haute température, les minéraux sont entièrement contenus dans les cendres sous forme oxydée (Mounguengui, 2008).

1.2.2.3 Propriétés physiques du bois de l'érable à sucre

- Masse volumique

La définition de la masse volumique du bois par Elliott (1970) est de loin la formule la plus complète. En effet, pour lui, ce n'est pas seulement une question de caractéristiques physiques ; c'est plutôt le résultat d'une variété de facteurs liés à la croissance et à la physiologie de l'arbre, un effet qui donne au bois une qualité relativement facile à mesurer. Dans le sens le plus simple, la masse volumique fournit une excellente estimation de la quantité en matière ligneuse que contient un morceau de bois séché. En conséquence, c'est un très bon indicateur de la résistance du bois. De plus, elle est souvent liée à la qualité globale du bois et fréquemment corrélée au rendement en pâte. Pour un expert en xylologie, la masse volumique est une caractéristique cruciale du bois puisqu'elle peut affecter la production de pâte et la résistance du bois d'œuvre. Elle a aussi de l'intérêt pour ceux qui se spécialisent en foresterie puisqu'on sait qu'elle est grandement déterminée par les circonstances de croissance d'un arbre et, par conséquent, il est possible d'utiliser ces facteurs pour influencer la nature de la matière première.

Le bois est un matériau hygroscopique qui subit des variations massiques et volumiques (Ross, 2010). Par conséquent, la masse volumique et la densité relative dépendent largement de la teneur en humidité. Ainsi, il devient important de spécifier la teneur en humidité lors de la mesure de la masse volumique (Ross, 2010). À 12% d'humidité, la densité relative de l'érable à sucre est de $D_{12}=0,63$ (Lupien, 2006). Le bois d'érable à sucre présente une masse volumique élevée. Les valeurs moyennes de la masse volumique basale rapportées dans la littérature pour cette espèce sont : 560 kg/m^3 (Kline, 2001), 597 kg/m^3 (Jessome, 1977), 603 kg/m^3 (Clermont, 1952), 605 kg/m^3 (Cantin, 1967) et 630 kg/m^3 (Green, 1999).

- Teneur en humidité

Le bois est un matériau hygroscopique : en fonction de la teneur en humidité du bois, de la température et de l'humidité relative du milieu environnant, le bois absorbera ou désorbera l'eau, ce qui provoquera respectivement un gonflement ou un retrait (Ross, 2010). Compte tenu de l'influence de la teneur en humidité sur les propriétés et les performances du bois, il est nécessaire d'évaluer le conditionnement, la durabilité et la transformabilité du bois. La teneur en humidité du bois a un impact direct sur le développement des champignons et leur capacité à métaboliser et à dégrader la substance de la paroi cellulaire au fil du temps.

Le bois fraîchement abattu à l'état vert est défini comme étant l'état basal. Cela dit que de plus que l'eau située dans le lumen, la paroi cellulaire est aussi saturée en eau (Ross, 2010). Dans les arbres à feuilles caduques, l'ampleur de la différence en teneur d'humidité entre le bois de cœur et l'aubier est différente d'une espèce à une autre (Ross, 2010). Dans le cas d'érable à sucre, il présente une teneur en humidité de 65% pour le bois de cœur et 72% pour l'aubier (Lupien, 2006; Ross, 2010).

1.2.2.4 Propriétés mécaniques

Le comportement mécanique du bois dépend fortement de la température, de la teneur en humidité, de la géométrie de la pièce, ainsi que de l'historique de sorption. Il est alors indispensable de caractériser le comportement du bois sous l'action mixte de la température, de l'humidité relative et d'une charge mécanique pour prédire son comportement durant l'utilisation et pour mieux maîtriser les procédés de transformation et également obtenir un matériau pouvant répondre à des besoins bien spécifiques. Le tableau 1.3 présente les propriétés mécaniques du bois d'érable à sucre.

Tableau 1.3 : Propriétés mécaniques du bois d'érable à sucre adaptées par Ross (2010)

Propriétés mécaniques	Valeurs
Module d'élasticité (GPa)	12,6
Module de rupture (MPa)	109
Résistance à la compression parallèle au fil (MPa)	54
Résistance à la compression perpendiculaire au fil (MPa)	10,1
Dureté (N)	60,4

L'élasticité implique que les déformations dimensionnelles induites à la suite d'une contrainte modérée soient parfaitement réversibles une fois la contrainte levée (Ross, 2010). Étant un matériau anisotrope, chaque direction possède un module d'élasticité qui lui est propre (Ross, 2010). À 12% d'humidité, Ross, (2010) a montré que le module d'élasticité pour l'érable à sucre est de $E = 12,6$ GPa alors que Duchesne et al. (2016) ont trouvé un module d'élasticité de $E = 10,6$ GPa. Tandis que les valeurs des ratios d'élasticité sont comme suit : $E_T/E_L = 0,087$ et $E_R/E_L = 0,131$ (Ross, 2010). Green David (1999) a trouvé que le module d'élasticité à l'état vert de l'érable à sucre égale à 15,5 GPa tandis que le module d'élasticité à 12% d'humidité est de 18,3 GPa. Le module de rupture est un indicateur de la déflexion causée par le cisaillement (Ross, 2010). Il renseigne sur la charge maximale que le matériau pourrait la supporter. Quant à l'érable à sucre le module de rupture égale à 109 MPa et les ratios module de rupture par module d'élasticité dans la direction longitudinale valent : $G_{LR}/E_L = 0,124$, $G_{LT}/E_L = 0,113$ et $G_{RT}/E_L = 0,019$ (Ross, 2010). Green David (1999) a trouvé que le module de rupture à l'état vert de l'érable à sucre égale à 94 MPa tandis que le module de rupture à 12% d'humidité est de 158 MPa. Duchesne et al. (2016) ont montré que le module de rupture à 12% d'humidité de l'érable à sucre égale à 113,2 MPa. Pour la résistance à la compression, il s'agit d'appliquer une contrainte à charge maximal et de rapporter le ratio longueur par la maximale dimension (White, 1968). La

compression parallèle au fil propre à l'érable est de 54 MPa. Tandis que la compression perpendiculaire au fil est de 10,1 MPa (Ross, 2010). Green David, (1999) a trouvé que la compression parallèle au fil à l'état vert du bois d'érable à sucre égal à 40,2 MPa alors qu'à l'état humide (12%) égale à 78,3 MPa. Pour la compression perpendiculaire, ils ont trouvé 6,4 MPa à l'état vert et 14,7 MPa à 12% d'humidité.

1.3 La carie du bois

1.3.1 Les parasites et les champignons de l'érable à sucre

Chez l'érable à sucre, et comparativement à tous les autres agents destructeurs, ce sont les maladies qui induisent les pertes les plus massives. Il est notable que la plupart des maladies foliaires, dont l'érable à sucre, soient d'origine fongique. Toutefois, ces maladies peuvent apparaître aussi à cause des polluants atmosphériques (Houston et al., 1990).

Le bois d'érable à sucre est sensible à une variété d'agents pathogènes, entraînant habituellement des pertes inférieures à 40 %, qui sont principalement causées par les champignons de carie blanche (Basham et Morawski, 1964). Les trois formes les plus courantes de cette carie sont la carie chancreuse blanche, la carie spongieuse blanche du tronc et la carie friable blanche. Ces espèces de caries se nourrissent fréquemment de vieux érables (Boulet, 2003). De plus, la coloration et la carie du bois posent des problèmes importants aux sylviculteurs qui veulent augmenter la valeur des peuplements du bois d'érable (Boulet, 2003). Certes, avant l'âge de 60 ans, le défaut le plus connu est la coloration du duramen 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. Les blessures au niveau des branches présentent un bon terrain aux bactéries

et champignons en s'infiltrant dans les cicatrices et par conséquent ils induisent la carie du bois et la coloration (Boulet, 2003).

1.3.2 Les champignons de carie blanche

Les champignons de carie blanche sont parmi les types de champignons les plus destructeurs (Boulet, 2003). Ce sont des champignons lignivores à carie fongique causée par des basidiomycètes. Ces derniers sont capables de dégrader la lignine du bois. Les champignons de la pourriture blanche sont généralement associés à la décomposition du bois dur et leurs schémas de décomposition du bois peuvent prendre différentes formes. Le bois attaqué par la pourriture blanche devient de couleur brune et cela peut se produire uniformément, laissant au bois une masse spongieuse ou filandreuse. Les champignons de la pourriture blanche possèdent à la fois des enzymes qui dégradent la cellulose et la lignine et ces champignons ont donc le potentiel de dégrader l'intégralité de la structure du bois dans des conditions environnementales correctes (Kamei, 2020). 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 ou filandreuse (Boulet, 2003).

Enebak et al (1989) ont montré qu'il existe une carie nommée *Cerrena unicolor* qui cause une carie blanche importante chez l'érable à sucre. La coloration du xylème, la formation de callus et les couches de périderme étaient plus importantes chez l'érable que chez le bouleau. Ils ont affirmé aussi que cette carie réussit à franchir les barrières de l'hôte grâce à une masse d'hyphes qui pénètrent à chaque année les points faibles du périderme prophylactique et tuent par la suite le cambium adjacent.

1.3.3 Impact de la carie sur les propriétés du bois

Bien que la présence d'un duramen rouge uniforme soit souhaitable pour certaines essences, la présence simultanée d'aubier clair et le duramen rouge sont généralement considérés comme peu attrayants par les consommateurs. En conséquence, la coloration du bois de cœur réduit considérablement la valeur du bois (Havreljuk et al., 2013). Alors que le duramen coloré de certaines autres essences, comme le chêne et le cerisier, fait partie d'un processus de vieillissement normal, on pense que la coloration du bois de cœur de l'érable à sucre et du bouleau jaune proviennent d'un traumatisme (Havreljuk et al., 2013). Le duramen rouge n'affecte pas les propriétés mécaniques du bois, mais pourrait être suivi d'une invasion de champignons hyménomycètes qui causent la pourriture du bois (Havreljuk et al., 2013). Citons l'exemple de Duchesne et al. (2016), qui ont montré que les échantillons de bois clair situés à 50 % du rayon ont un MOE et un MOR nettement inférieurs à ceux situés près de l'écorce pour l'érable, mais pas pour le bouleau. De plus, Le MOR dans l'érable a été légèrement affecté par le nombre de cernes de l'arbre (indicateur de taux de croissance).

Ammar (2022) a montré que l'augmentation de la proportion de la carie et de coloration de l'arbre engendre une perte des propriétés mécaniques du bois. En effet, le module d'élasticité dynamique au niveau des cernes (MOEDC) à montrer une diminution de l'ordre de 40,08% pour la classe très pourrie, 32,1% pour la classe pourrie et 9,3% pour la classe colorée (Figure 1.10).

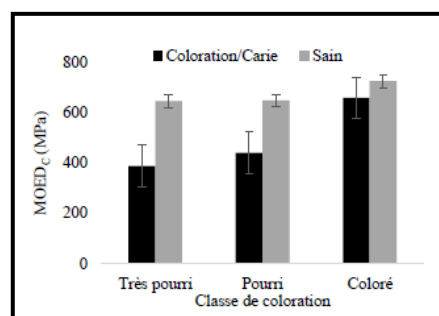


Figure 1.10 : Effet de la coloration/carie sur le MOED au niveau des cernes (Ammar, 2022)

Il a aussi affirmé que la masse volumique au niveau du cerne (MVC) 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 (Figure 1.11). Jerrold et al. (2000), ont prouvé qu'au fur et à mesure que la décomposition progressait, elle affectait séquentiellement différents composants chimiques. En effet, ils ont montré que le début de la perte de poids détectable visuellement est corrélé au début de la diminution des teneurs en mannane et xylane et qu'il y a une perte de poids majeur et perte de rigidité (MOE) corrélés à la diminution de la teneur de glucane. De plus, ils ont prouvé qu'une perte de poids mesurable due à la pourriture brune de l'aubier du pin du sud a commencé après une perte d'environ 40 % de MOR.

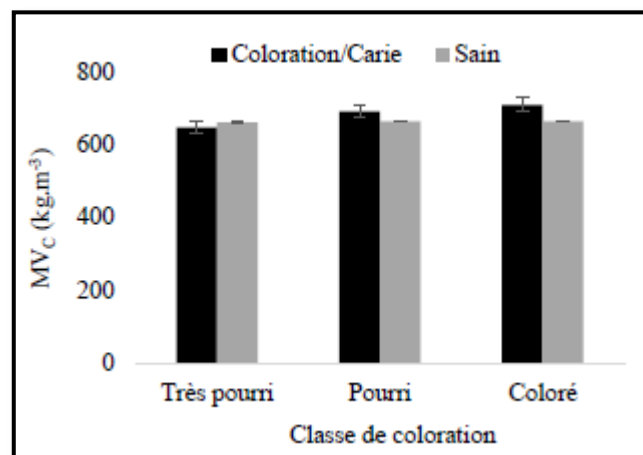


Figure 1.11 : Effet de la coloration/carie sur la masse volumique au niveau des cernes (Ammar, 2022)

La capacité des champignons de pourriture à dégrader le bois varie selon les espèces de champignons et dépend de la structure et les propriétés chimiques des composants en bois. Une résistance naturelle à la pourriture est l'une des propriétés les plus attrayantes du bois, et est principalement attribuable à sa teneur en lignine et en extractibles (Oliveira et al., 2010).

Après la cellulose, la lignine est le deuxième biopolymère le plus abondant sur terre et confère aux plantes une résistance à la dégradation microbienne, influençant considérablement la durabilité du bois (Gierlinger et al., 2004; Syafii et Yoshimoto,

1991). Bien que les extractibles ne représentent qu'un petit pourcentage de la composition totale du bois, elles fournissent aux arbres des mécanismes de défense inestimables contre les attaques microbiennes, grâce à leurs propriétés fongicides et antioxydantes (Curnel et al., 2008; Silva et al., 2007). Les composants chimiques et leur assemblage dans la paroi cellulaire sont directement liés aux propriétés du bois, et leur effet peut être soit positif, soit négatif, selon l'utilisation finale. Dans le bois, le rôle de la lignine est associé à la résistance à la compression et celle de la cellulose à la traction et à la flexion et des changements dans leur contenu ou leur topochimie peuvent affecter ses propriétés.

1.4 Spectroscopie infrarouge proche

La gamme d'ondes électromagnétiques entre 800 et 2500 nm, c'est-à-dire entre le visible (380–780 nm) et l'infrarouge (IR) (2 500 à 25 000 nm), est définie comme la gamme infrarouge proche (NIR). La spectroscopie basée sur l'absorption ou l'émission à la plage NIR est appelée NIRS. Les composés organiques se composent de divers groupes fonctionnels (Figure 1.12), dont la vibration moléculaire est observée à l'intervalle infrarouge (Tsuchikawa et Kobori, 2015).

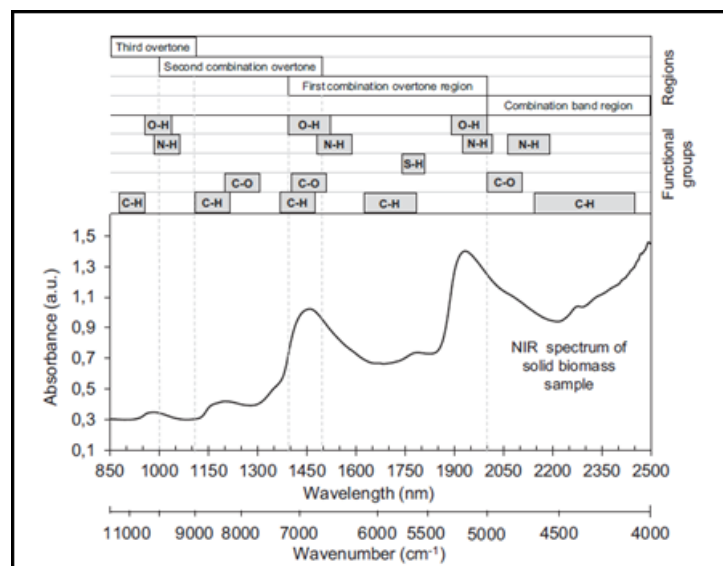


Figure 1.12 : Bandes d'absorption dans la région NIR et spectre typique d'un échantillon de biomasse solide (Skvaril et al., 2017)

L'analyse est basée sur la spectroscopie vibrationnelle, qui mesure comment la lumière interagit avec la substance. En spectroscopie, les molécules de l'échantillon absorbent la lumière avec une fréquence spécifique et l'énergie de la molécule augmente, ce qui fait vibrer la molécule. Chaque molécule absorbe une certaine longueur d'onde. Il existe une relation linéaire (équations 1.1) entre l'absorption et la concentration des espèces absorbantes :

$$A = a_{\lambda} \cdot b \cdot c \quad (1.1)$$

Avec

A : absorbance

a_{λ} : coefficient d'absorbance

b : longueur du trajet

c : concentration

Depuis la découverte de la région NIR en 1800, la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) est devenue l'une des technologies analytiques les plus connues. Cette méthode rapide et non destructive fonctionne avec tous les matériaux organiques et ne nécessite pratiquement aucune préparation d'échantillon (Pasquini, 2003). Des mesures précises peuvent être obtenues en introduisant cette méthode optique qui permet une caractérisation qualitative et quantitative rapide des matières solides et liquides (Tsuchikawa et Kobori, 2015). Cette technique a été utilisée depuis plusieurs décennies dans le secteur pharmaceutique comme technologie analytique (Bakeev, 2010). Le NIRS a été également appliqué largement dans l'industrie de l'alimentation humaine et animale (Huang et al., 2008) en mettant l'accent sur les applications dans différents systèmes alimentaires tels que la viande, les fruits et les légumes, les produits laitiers, les huiles, les poissons et les produits de la pêche et les boissons. Benito et al (2008) ont examiné les applications de NIRS dans l'analyse environnementale et alimentaire en se concentrant principalement sur la conception d'instruments et le contrôle de processus par NIRS, avec une section dédiée au contrôle environnemental, y compris les applications NIRS dans la production de biocarburants (biogaz, bioéthanol et biodiesel).

Ces dernières années, le NIRS a commencé à s'étendre à d'autres industries telles que le bois, les pâtes et papiers. Selon Hein et al. (2017), les principales études des applications NIRS dans ce domaine ont été étudiées par Tsuchikawa (2007), Tsuchikawa et Schwanninger (2013) et Tsuchikawa et Kobori (2015).

Ces revues se concentrent sur l'affectation des bandes d'absorption de l'infrarouge proche (NIR) liées au bois, la détermination de sa composition chimique, y compris la lignine, la cellulose et les extractibles, la teneur en humidité et les propriétés physiques et mécaniques, tels que la masse volumique, la rigidité, l'élasticité, la distribution des particules, la modification et la dégradation du bois, etc. La caractérisation chimique du bois était la principale préoccupation au début du développement de cette technologie. Par exemple, les premiers spectres NIR liés aux caractéristiques chimiques du bois, en particulier la quantité de cellulose, ont été publiés par (Birkett et Gambino, 1989). Thygesen a réussi à relier le spectre NIR à la masse volumique du bois en 1994. Il a ensuite permis de prévoir les résistances à la compression et à la flexion du bois sec ainsi que sa masse volumique (Hoffmeyer et Pedersen, 1995 ; Hein et al., 2017). De nombreuses études récentes dans ce domaine se sont concentrées sur l'évaluation de la composition chimique des feuilles et des propriétés du bois et de la pâte à papier (Fujimoto et al., 2007). Bien que le potentiel de la spectroscopie NIR comme technique de mesure non destructive a démontré la possibilité d'estimer la valeur théorique d'autres propriétés avec une grande précision il devrait être examinée plus profondément (Fujimoto et al., 2007). Aujourd'hui, la spectroscopie proche infrarouge (NIR) est devenue l'une des méthodes indirectes les plus rapides et les moins chères pour déterminer les propriétés chimiques du bois telles que la teneur en cellulose, en lignine et en extractibles (Poke et al., 2004).

Il n'y a pas beaucoup d'informations dans la littérature sur l'utilisation du NIR pour prédire la composition chimique du bois. Sandak et al. (2017) ont créé un modèle pour prédire la composition chimique de 17 clones de bois de saule à l'aide de données NIR. Pour extraire les données, ils ont utilisé des méthodes statistiques. Les spectres ont été analysés et des modèles chimio-métriques (Figure 1.14) ont été

créés à l'aide de l'analyse en composantes principales (PCA) (Figure 1.13), du test d'identité (IT) et des moindres carrés partiels (PLS), ainsi que du prétraitement du spectre dérivé second.

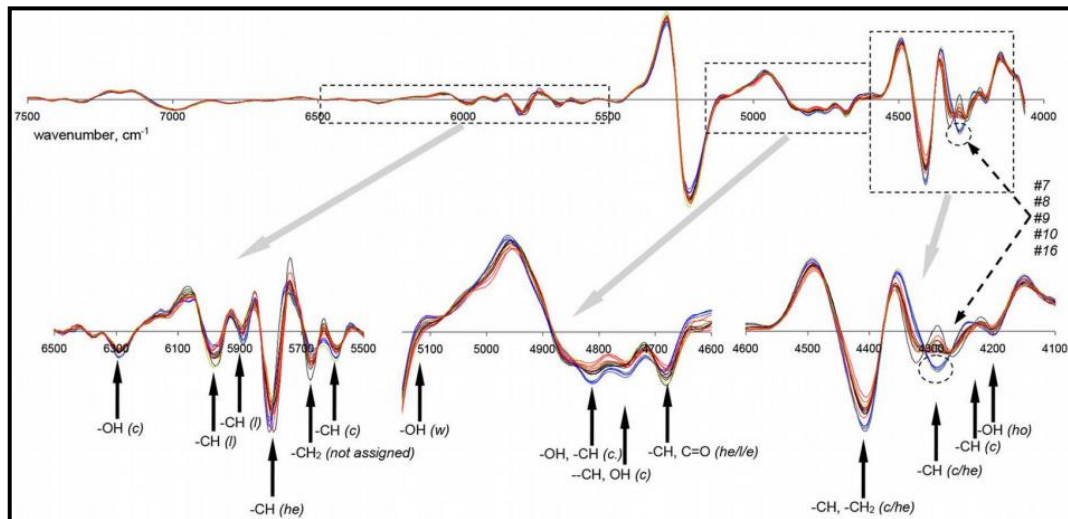


Figure 1.13 : Spectre NIR pour différents clones de saule. Les principaux composants chimiques associés aux bandes spécifiques étaient (l) la lignine ; (c) la cellulose ; (he) les hémicellulose ; (ho) l'hollocellulose; (e) les extractibles ; (w) et l'eau (Sandak et al., 2017)

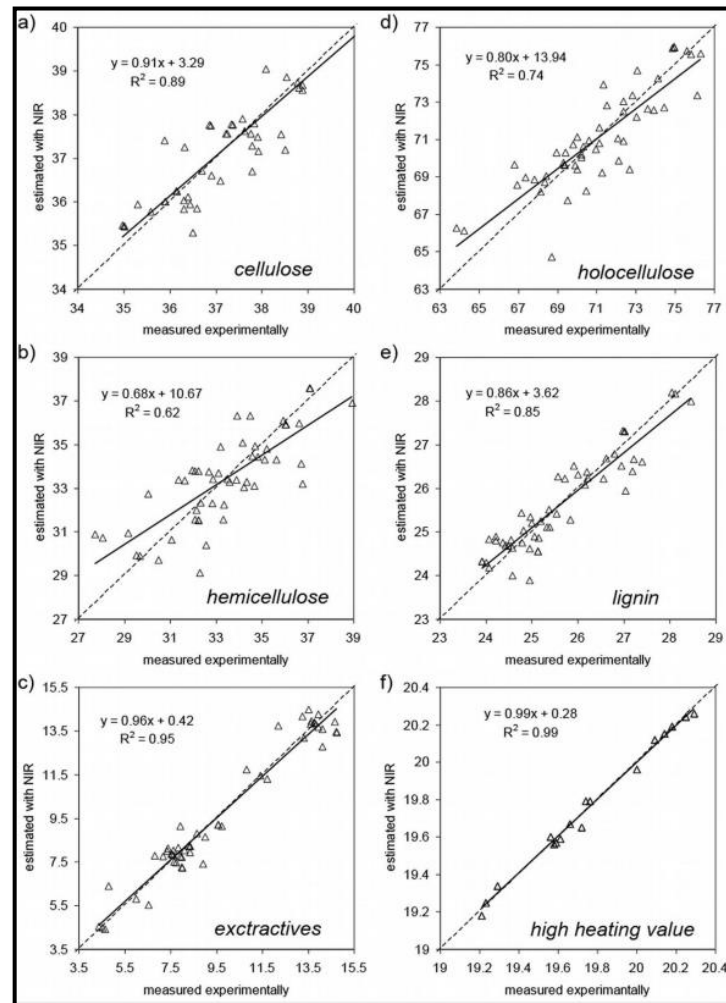


Figure 1.14 : Modèles de prédictions PLS pour la cellulose (a), l'hémicellulose (b), les extractibles (c), l'holocellulose (d), la teneur en lignine (e), et le pouvoir calorifique élevé (f) déterminés pour les clones de saule (Sandak et al., 2017)

Sykes et al. (2005) ont étudié le pin à encens et ont trouvé des valeurs satisfaisantes de prédiction des teneurs en lignine et en cellulose. Yeh et al. (2004) ont évalué la teneur en lignine avec des spectres NIR mesurés sur des carottes de sondages de pin à encens et ont trouvés de fortes corrélations ($R^2=0,81$) entre les données relatives à la lignine acquises par des méthodes conventionnelles et la prédiction NIR. Le tableau 1.4 représente les valeurs de R^2 pour des études sur la prédiction par NIR de la composition chimique de quelques essences de bois.

Tableau 1.4 : Variation de R^2 entre différentes essences de bois

Essence	Cellulose	Hémicellulose	lignine	Extractibles	Référence
Acacia mangium wild	0,79	0,82	0,41	0,54	Karlinasari et al., (2014)
Saule	0,89	0,62	0,85	0,95	Sandak et al., (2017)
Eucalyptus globuleux	0,88	-	0,78	0,84	Raymond and Schimleck, (2002)
Pin à l'encens	0,75	-	0,54	-	Sykes et al., (2005)

1.5 Problématique

Les défis actuels de la sylviculture des feuillus dans le sud-est du Canada sont, entre autres, de (i) maintenir la qualité des tiges et la vigueur des arbres du futur peuplement et (ii) améliorer la qualité du bois récolté en termes de grade et de produits (Bédard et Deblois, 2010; Pothier et al., 2013). Les caries et les colorations de l'érable à sucre causent de graves dommages entraînant des pertes économiques. En effet, la présence d'une colonne de bois coloré initiée par la blessure (cario) dans le noyau des tiges d'érable à sucre réduit la proportion de bois de couleur blanche (désirée). Cependant, la revue de littérature a révélé un très faible nombre d'études réalisées sur cette thématique. Notamment, pour notre problématique, les recherches sur les variations des propriétés chimiques et physiques du bois d'érable à sucre dues à la carie et la coloration sont restreintes. D'une part, des investigations ont découvert que la production de bois de cœur est un mécanisme de régulation de la gestion de l'aubier (Bamber, 1976), qui est lié à la croissance et à la vitalité de la cime de l'arbre (Chapman et Gower, 1991). Le lien entre les propriétés chimiques et physiques du bois d'érable à sucre et la présence de la colonne de bois colorée, en revanche, reste un mystère (Yanai et al., 2009).

Les statistiques reliant les caractéristiques de l'arbre et de la cime aux composantes de la structure du bois peuvent être utilisées pour prévoir les paramètres importants de la qualité du bois des érables à sucre récoltés (aubier, bois de cœur et coloration).

De plus, les modèles statistiques de ce type devraient être efficaces pour prévoir les changements dans la qualité des tiges et la vigueur des arbres à la suite de changements dans les caractéristiques chimiques du bois. De meilleures décisions sylvicoles pour les forêts de feuillus nord-américaines pourraient être recommandées à l'avenir.

1.6 Conclusion

Cette revue de littérature a montré le potentiel du bois d'érable à sucre en particulier son abondance, sa masse volumique élevée, et ses bonnes propriétés mécaniques. Cependant, la coloration interne du bois de cœur (ou cœur foncé) de l'érable à sucre entraîne une dégradation importante de la qualité du bois.

Pour estimer la valeur globale du rendement des arbres sur pied, les forestiers doivent comprendre comment prédire la proportion de cœur coloré au sein de chaque arbre individuel. Pour répondre à certaines de ces préoccupations, cette étude vise à (i) déterminer la relation entre la coloration/carie et les propriétés chimiques et physiques du bois dégradé de l'érable à sucre (ii) créer des modèles prédictifs des composantes chimiques du bois de l'érable à sucre et (iii) développer des modèles qui peuvent utiliser des variables chimiques et/ou physiques au niveau de l'arbre pour prédire la probabilité des arbres ayant une forme de cœur irrégulière.

Le chapitre suivant va porter sur la présentation des différents matériaux utilisés pour l'étude et sur les différentes techniques et méthodes expérimentales appliquées pour atteindre les objectifs de recherches.

CHAPITRE II

MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Introduction

Malgré un consensus général selon lequel la coloration et la carie du bois dans les tiges d'érable à sucre sont associées à des traumatismes tels que des blessures et la mort de branches (Ohman, 1968), les relations entre l'étendue du bois coloré ou carié et les propriétés physiques et chimiques des arbres reste un sujet ouvert.

Les hypothèses suivantes ont été testées pour atteindre les objectifs de recherche :

1. La proportion de la coloration augmente avec l'âge.
2. La masse volumique du bois d'érable à sucre diminue avec l'apparition de la carie.
3. L'incidence de la coloration et la carie dans le bois influe sur sa composition chimique.
4. La carie qui attaque le bois est de type carie blanche.
5. La spectroscopie infrarouge proche peut être un outil puissant pour la caractérisation des propriétés chimiques du bois.

Dans une perspective de mettre en évidence les différentes caractéristiques physiques et chimiques et afin de prédire la proportion du bois coloré dans un arbre en utilisant une méthode de caractérisation non destructive, les objectifs de l'étude sont les suivants :

- Estimer les proportions de la coloration et de la carie sur des rondelles de bois d'érable à sucre ;
- Mesurer les propriétés chimiques du bois de l'érable à sucre par les méthodes conventionnelles et par spectroscopie infrarouge proche ;
- Évaluer l'impact de la présence de la carie et de la coloration sur la composition chimique et sur la masse volumique du bois de l'érable à sucre ;
- Développer des modèles de prédictions de la compositions chimiques du bois de l'érable à sucre à partir de la spectroscopie infrarouge proche.

2.2 Matériels

2.2.1 Choix et localisation des sites expérimentaux

Dans le cadre de ce projet, dix sites écologiques où l'érable à sucre est suffisamment abondant en Québec ont été sélectionnés (Figure 2.1). Le choix des sites a été réalisé de manière aléatoire et en se fiant aux placettes temporaires de la DRF (Direction de la recherche forestière), selon la quantité de sites potentiels dans un secteur donné, tout en s'assurant que le sud de la province était bien couvert spatialement. 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 et de l'érablière à tilleul. De plus, ces sites ont été placés afin d'obtenir une bonne répartition spatiale de ceux-ci dans les domaines bioclimatiques du sud de la province. Ainsi, ce sont tous des sites avec une bonne composante en érable à sucre (+ de 50% de la surface terrière) et aucune perturbation répertoriée.

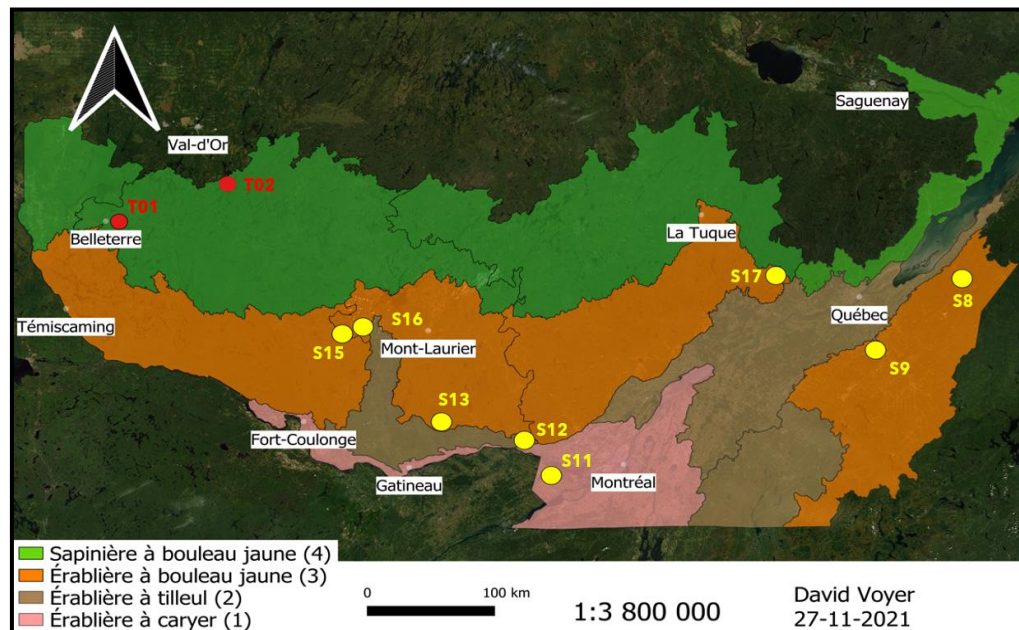


Figure 2.1 : Localisation des sites expérimentaux (Saucier et al., 2009)

2.2.2 Échantillonnage

Les arbres d'érable à sucre ont été sélectionnés de façon aléatoire pour chacun des dix sites. Pour mener ce projet, deux types d'échantillonnage ont été réalisés (Figure 2.2) :

- Un échantillonnage destructif dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune à raison de 9 arbres par site prélevés de 2 sites.
- Un échantillonnage non destructif dans la plupart sont dans les domaines bioclimatiques des érablières à bouleau jaune (240 carottes prélevées sur 8 sites). Pour chaque arbre, on a prélevé une carotte de sondage de 3,5 mm d'épaisseur et de longueur variable selon le diamètre à hauteur de poitrine (DHP =1,3 m).



Figure 2.2 : Échantillons de bois : à gauche une rondelle (2 sites, 18 arbres) et à droite une carotte (8 sites, 240 carottes)

2.2.3 Méthodologie

Sur les rondelles et les carottes échantillonnées, des tests de densitométrie (densitomètre à rayons X, disponible à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue) et la composition chimique (méthodes conventionnelles et FT-NIR, disponibles à l'UQAT) sont réalisés.

2.2.3.1 Caractérisation des propriétés physiques

Les propriétés physiques étudiées sont la masse volumique du bois et les proportions de l'aubier, du duramen, et de la carie du bois d'érable à sucre.

2.2.3.1.1 Largeur et masse volumique des cernes

a) Préparation et extraction des échantillons

Les échantillons de densitomètre sont préparés à partir des rondelles échantillonnées (Figure 2.3a). Ils permettent d'étudier la variation intra-arbre (variation radiale de la moelle à l'écorce et variation axiale ou longitudinale le long de la tige de l'arbre) de ces propriétés. Les échantillons prélevés à partir des rondelles au DHP servent également à caractériser et à évaluer l'impact de la pourriture sur la masse volumique du bois.

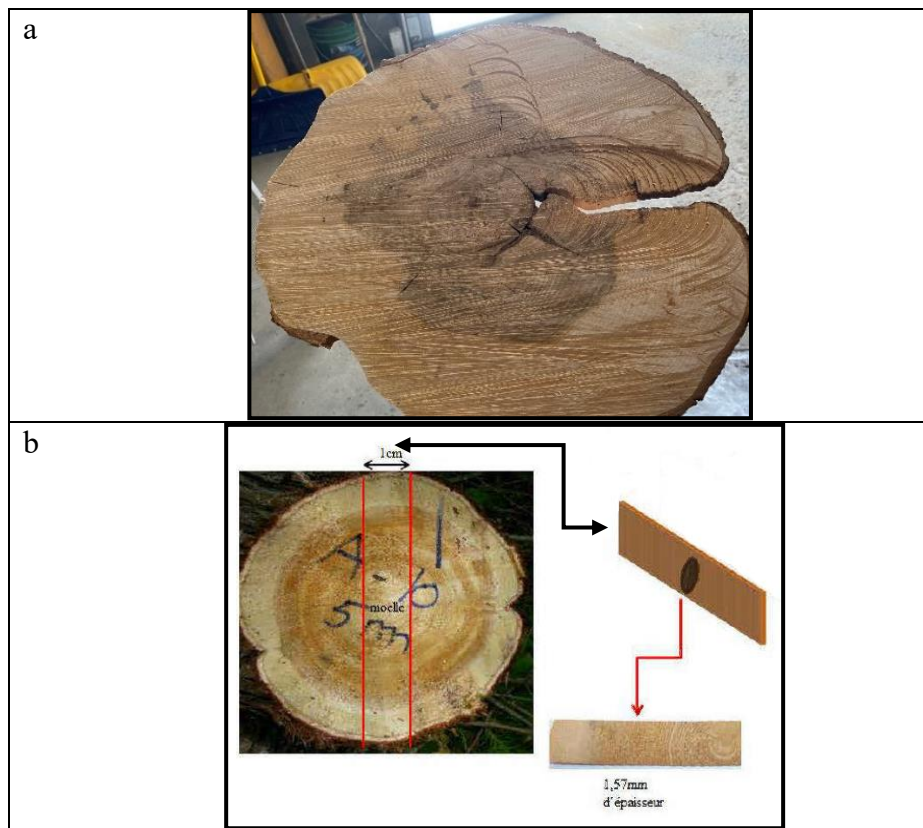


Figure 2.3 : a) Rondelle échantillonnée du bois d'érable à sucre, b) Préparations des échantillons pour le densitomètre à rayon X

Des bandes de 1 cm de largeur et de 1,57 mm d'épaisseur sont prélevées par sciage à la scie à ruban dans le centre de chaque rondelle pour les mesures densitométriques (Figure 2.3b).

Pour éliminer les extractibles et les polysaccharides hydrosolubles, toutes les bandes de 1,57 mm d'épaisseur sont extraites dans un soxhlet (Figure 2.4) pendant 24 heures dans une solution 2:1(v/v) de cyclohexane et d'éthanol, suivies de 24 heures de traitement supplémentaire dans de l'eau distillée (Grabner et al. 2005). L'extraction est le processus consistant à retirer les extractibles des échantillons afin de contrôler leur impact sur la masse volumique du bois (Grabner et al. 2005). Pour éviter toute déformation, les bandes sont lavées et séchées à l'air ambiant pendant une semaine sous un chargement. Après cela, ils sont conditionnés pour atteindre la teneur en humidité d'équilibre de la pièce (8%).

La mesure de masse volumique étant réalisée en mesurant l'absorption des rayons X qui dépend de l'épaisseur de l'échantillon traversé par le faisceau. Une épaisseur homogène des échantillons est une condition fondamentale pour la qualité des résultats. Les échantillons sont mesurés au pied à coulisse puis sablés pour conserver une épaisseur constante de 1,57 mm de la moelle à l'écorce.

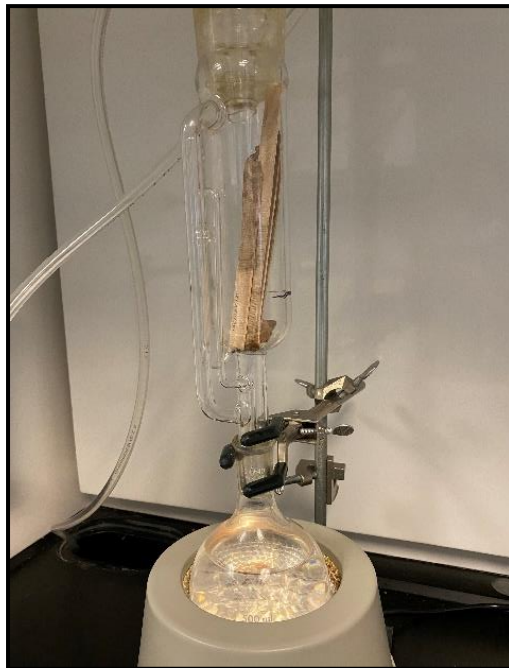


Figure 2.4 : Extraction des substances extractibles à l'aide d'un soxhlet

- b) Mesure de la largeur et de la masse volumique des cernes par le densitomètre à rayons X

La croissance annuelle et la masse volumique du bois sont mesurées par le densitomètre à rayons X (QTRS-OJX Tree Analyzer de Quintek Measurement System, Inc. (QMS), Knoxville, Tennessee), muni du logiciel Tree Ring System. Chaque échantillon est placé dans le densitomètre équipé d'une caméra vidéo et les cernes sont scannés de la moelle à l'écorce (Figure 2.5a). Le principe de l'appareil est basé sur l'atténuation des rayons X traversant l'échantillon avec une résolution linéaire de 0,02 mm. À partir des profils intracernes établis par le densitomètre à rayons X (Figure 2.6a), le nombre et la largeur des cernes du bois initial et du bois final, le pourcentage de bois final, la masse volumique des cernes du bois initial et

du bois final pour chacun des cerne annuels de la moelle à l'écorce ont été mesurés. La démarcation entre le bois initial et le bois final a été déterminée pour chaque cerne annuel par la méthode de la dérivée maximale en utilisant un polynôme à six degrés (Koubaa et al. 2002). La masse volumique au point de démarcation (ou point d'inflexion) sur la courbe polynomiale a été définie comme la masse volumique de transition (Figure 2.5b). Pendant la mesure, des précautions ont été prises pour éliminer les faux cerne ou ceux qui sont incomplets. Le densitomètre à rayons X a également permis de déterminer l'âge cambial des arbres.

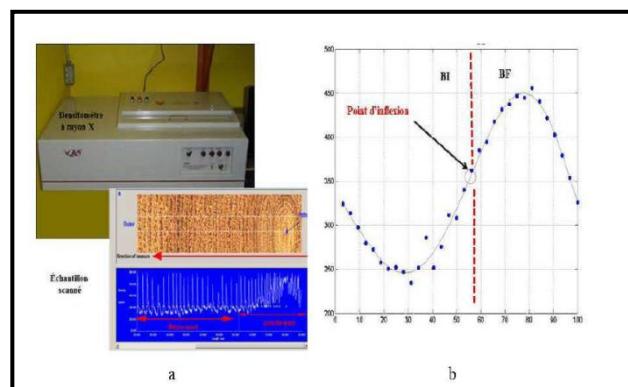


Figure 2.5 : a) Dispositif expérimental du densitomètre à rayons X, et exemple d'un échantillon scanné par le densitomètre; b) Détermination de la transition du bois initial (BI) au bois final (BF) par la méthode de point d'inflexion (Bouslimi, 2014).

2.2.3.1.2 Mesure des proportions de l'aubier, de duramen et de la carie

Les proportions d'aubier, de duramen et carie sont mesurées sur les rondelles en utilisant le logiciel ImageJ (Figure 2.6) développé à l'Institut National de Santé des États-Unis (Kimura et al., 1999). Dans ce programme, une image doit être transformée en une image binaire par seuillage (Thresholding) avant analyse, ce qui est nécessaire pour les autres étapes d'analyses d'images telles que la fixation de l'échelle et la délimitation des surfaces. Enfin, le logiciel peut mesurer la surface de l'aubier, du duramen et de la carie. Les proportions seront déduites par la suite.

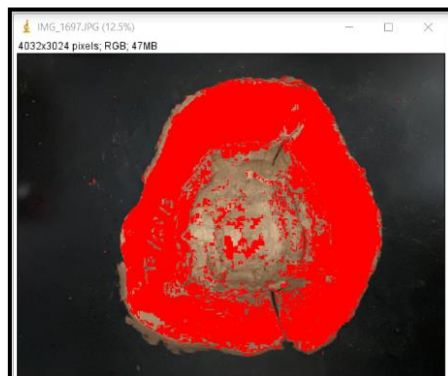


Figure 2.6 : Image d'un échantillon de bois d'érable à sucre traité par imageJ. La portion rouge correspond à l'aubier

La limite entre l'aubier translucide et le duramen opaque est bien distinctive par ce logiciel (Figure 2.6). Ainsi, les proportions du duramen et de l'aubier sont déterminées par une simple mesure du contour recherché. Pour chaque disque, la surface totale (ST) à l'intérieur de l'écorce et celle du duramen (SD) sont bien délimitées. Par conséquent, la surface de l'aubier (SA) est la surface totale moins la surface du duramen. Si la carie est présente dans le disque échantillonné, la surface de la carie est également mesurée de la même façon. Par conséquent, les proportions des trois composantes seront déduites.

2.2.3.2 Caractérisation des propriétés chimiques

Deux techniques sont utilisées pour caractériser la composition chimique du bois de l'érable à sucre. Des analyses conventionnelles réalisées suivant les méthodes normalisées de TAPPI (1989) et la spectroscopie par l'infrarouge proche (FT-NIR) couplée à la technique de réflectance diffuse.

Les analyses conventionnelles permettent de déterminer la composition chimique de divers éléments du bois, tels que la teneur en cellulose, hémicelluloses, lignine insoluble en acide (Lignine Klason) et les extractibles dans le bois de cœur et l'aubier sain. Ces études permettent de distinguer ces composantes entre les deux

types de bois. Le duramen pourri est soumis aux mêmes tests pour découvrir comment l'ajout de carie altère sa composition chimique. En détectant les vibrations qui indiquent une liaison chimique, la technique FT-NIR a été utilisée pour identifier les différents groupes chimiques présents à la surface des fibres de l'aubier, du duramen sain et pourri. Ainsi, des données qualitatives et quantitatives sont tirées du spectre d'absorption NIR caractéristique des trois types de bois, ce qui permet de quantifier l'effet de la présence de la carie. Des longueurs d'onde présentées dans la littérature permettent d'attribuer l'absorption aux divers groupes chimiques présents dans les fibres de bois.

2.2.3.2.1 Préparation des échantillons

Des tronçons de bois de dimension $2,5 \times 2,5 \times 1 \text{ cm}^3$ sont découpés à partir des disques au DHP pour chacune des trois classes de bois [bois d'aubier sain (pas de pourriture), bois de duramen coloré et bois pourri stade avancé]. Les échantillons sont séchés pendant 72 heures dans une étuve à 50°C (Figure 2.7a), puis réduits en poudre avec un broyeur à couteaux avec un filtre à mailles (Figure 2.7b) comme indiqué dans la norme T264 (1989).



Figure 2.7 : a) Séchage des échantillons dans un four à 50°C b) Broyeur à couteaux disponible au laboratoire biomatériaux à la Sarre

La poudre est tamisée et la fraction de la maille 60-80 est conservée (Figure 2.8) pour la détermination de sa composition chimique (T264 1989). Au total, 44 échantillons ont été analysés dont 18 échantillons de bois d'aubier, 18 échantillons de duramen sain, 8 échantillons de bois de cœur pourri.



Figure 2.8 : Tamiseuse agitatrice de laboratoire

2.2.3.2.2 Analyses chimiques conventionnelles

a) Proportion des extractibles

La granulométrie des échantillons de bois broyés a été prise conformément à la norme TAPPI T264 (1989) (inférieure à 0,40 mm). La cartouche d'extraction est placée avec 5g l'échantillon dans un appareil d'extraction Soxhlet propre et sec. Le dispositif est monté verticalement dans un ballon à un col de 500 ml rempli avec 100 ml d'éthanol et 200 ml de cyclohexane. En utilisant un agitateur chauffant (Figure 2.9), une première extraction est faite à une température ajustée afin de fournir un taux d'ébullition qui cyclera les échantillons pendant au moins 24 extractions sur une période de 4 à 5 heures. Ensuite, l'échantillon est filtré et lavé avec 200 ml d'eau distillée chaude. Puis, il est transféré dans le même dispositif tout en ajoutant 300 ml d'eau distillée chaude. L'échantillon a subi une deuxième extraction pendant 6 h à une température de 100°C. Par la suite, il est filtré et lavé avec 200 ml d'eau distillée. Après les deux étapes d'extraction, le reste de l'échantillon (sous forme des résidus) constitue les proportions d'hémicellulose, de cellulose et de la lignine. Après chaque extraction, le résidu est séché, puis pesé. Le pourcentage des extractibles pour chaque fraction est déduit par rapport à la masse initiale de l'échantillon selon l'équation 2.1:

$$E (\%) = (m_1 - m_2) / m_1 \quad (2.1)$$

Avec m_1 la masse de la poudre de bois avant extraction et m_2 la masse après extraction.

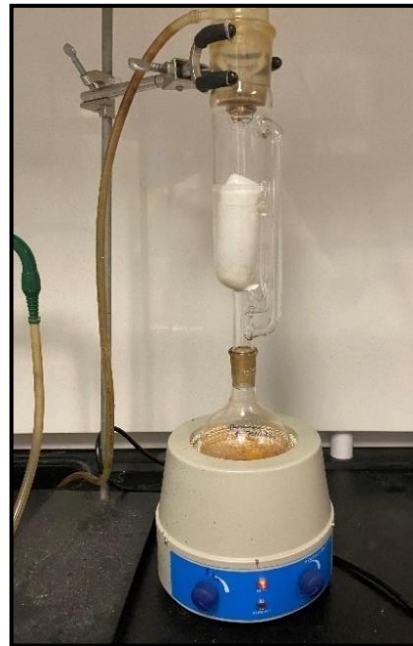


Figure : 2.9 : Montage d'extraction Soxhlet

b) Proportion de la lignine Klason

Le taux de lignine Klason est calculé selon la méthode TAPPI T222 normalisée (1989). Pour ce faire, 250 mg de poudre de bois sont mélangés à 3 ml d'acide sulfurique (72 %) dans une éprouvette puis chauffés dans un bain-marie à 30 degrés Celsius pendant 1 heure. Le contenu de l'éprouvette est ensuite transféré dans un erlenmeyer de 500 ml en utilisant 84 ml d'eau déminéralisée. En conséquence, la concentration de la solution est de 3 %. L'erlenmeyer est ensuite placé dans l'autoclave pendant 1 heure à 125°C. Après refroidissement, le vrac non soluble est lavé à l'eau déminéralisée, puis séché à 103°C jusqu'à ce qu'il soit stable et enfin pesé. La masse finale obtenue est la masse de lignine Klason. Ainsi, le pourcentage de lignine Klason est déterminé à l'aide de l'équation 2.2 :

$$\text{Lignine klason (\%)} = \frac{\text{Masse de lignine klason}}{\text{Masse initiale de l'échantillon}} \times 100 \quad (2.2)$$

c) Proportion de la cellulose

La teneur en cellulose est calculée selon la méthode de Kurschner-Hoffner (Browning 1967). Il s'agit d'attaquer un échantillon avec un mélange d'acide nitrique (HN03) et d'éthanol (CH₃-CH₂-OH). En conséquence, la lignine est transformée en produits nitrophénoliques solubles dans l'alcool. Les hémicelluloses sont majoritairement dégradées et passent en solution par hydrolyse, tandis que la cellulose est censée rester intacte. Pour ce faire, 2 g de poudre de bois ont été traités avec 125 ml d'une solution 1:4 (v/v) d'acide nitrique (65 %) et d'éthanol (96 %) sous reflux à 90 °C pendant une heure, en répétant le traitement quatre fois. A la fin du quatrième cycle, la solution est filtrée sous vide et la masse de cellulose est lavée, d'abord à l'éthanol, puis à l'eau froide, et enfin à l'eau chaude. Elle est ensuite séchée à 103°C et pesée à 0,01 mg près. La teneur en cellulose est calculée en utilisant la même formule que la teneur en lignine Klason.

d) Proportion d'holocellulose

Pour déterminer les compositions en hollocellulose de chaque échantillon précédemment extrait, environ 2 g de poudre est placé dans un ballon de 250 ml. La poudre extraite a été chauffée à 70°C pendant une heure dans 100 ml de solution d'acide peracétique et d'acétate de sodium (CH₃COONa) (5 g). La solution pâteuse formée commence à se décolorer, ce qui est cohérent avec la dégradation de la lignine. Après un léger filtrage sous vide à travers un filtre à creuset, cette solution est ensuite rincée avec 300 à 500 ml d'eau distillée jusqu'à ce que la couleur complète soit éliminée des galettes cellulosiques. Les creusets sont ensuite séchés au cours d'une nuit à 105°C puis pesés pour obtenir la teneur en hollocellulose présent dans la poudre de bois extraite. La teneur en hémicellulose est déterminée par la différence entre la teneur en hollocellulose et la teneur en cellulose (Migeon, 2013).

2.2.3.2.3 Spectroscopie par l'infrarouge proche (FT-NIR)

Un spectromètre NIR à transformée de Fourier (modèle SHIMADZU IRTracer-100) a été utilisé pour collecter les spectres NIR. Cet appareil (Figure 2.10) a été

équipé d'une sphère d'intégration et enregistre la réflectance NIR diffuse des échantillons de bois sur la plage $8000\text{-}3800\text{ cm}^{-1}$ ($1000\text{-}2500\text{ nm}^{-1}$) à une résolution spectrale de 8 cm^{-1} . La sphère d'intégration recueille la lumière sous tous les angles, minimisant ainsi les effets de la texture du bois et d'autres non-homogénéités. Chaque spectre a été obtenu avec 64 balayages, puis les moyennes ont été calculées et comparées à l'étalon de réflexion spéculaire afin d'obtenir le spectre de réflectance [converti en spectres d'absorbance en utilisant $\log(1/R)$] de chaque acquisition NIR (Hein et al., 2017).

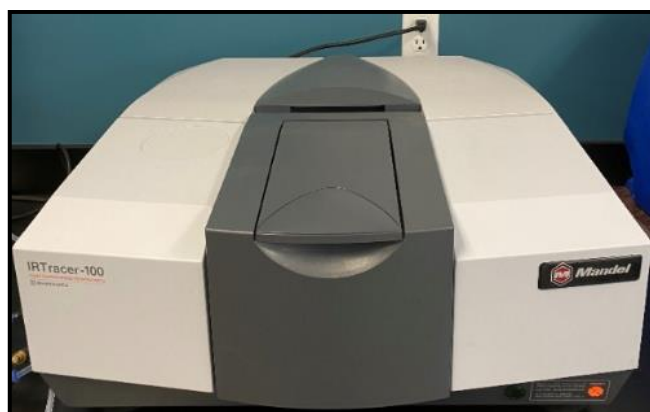


Figure 2.10 : Spectrophotomètre NIR

Les modèles d'étalonnage NIR peuvent être une approche peu coûteuse et à haut débit pour une estimation précise des caractéristiques chimiques du bois une fois qu'elles sont définies. Cependant, leur développement initial implique un certain nombre de processus, dont la collecte et traitement de données spectrales, le choix et l'analyse d'échantillons de référence, l'utilisation d'une approche d'étalonnage multivarié, le choix de modèles et leur validation (Sandak et al., 2017).

2.2.4 Analyses statistiques

2.2.4.1 Les résultats de la masse volumique

Les composantes de la masse volumique du bois ont été soumises à des analyses de variance (ANOVA) en utilisant une approche de modèle mixte, avec l'âge cambial

comme mesure répétée. Tous les facteurs ont été considérés comme des effets fixes (classe de décomposition, site, âge cambial), sauf l'arbre car il a été considéré comme un effet aléatoire. Les modèles étaient généralement formulés selon l'équation 2.3 :

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\gamma\beta)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \delta + \varepsilon \quad (2.3)$$

où Y est la variable dépendante, μ est la moyenne générale, α_i est l'effet fixe de l'âge cambial (AC), β_j est l'effet fixe de la classe de la carie (CC), γ_k est l'effet fixe de la site, $(\alpha\beta)_{ij}$ est l'interaction entre l'âge cambial et la classe de la carie (CC), $(\alpha\gamma)_{ik}$ est l'interaction entre l'âge cambial et le site, $(\gamma\beta)_{jk}$ est l'interaction entre le site et la classe de la carie (CC), $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ est l'interaction entre l'âge cambial, la classe de la carie (CC) et le site, δ_i est l'effet aléatoire de l'arbre, et ε est le terme d'erreur. Les analyses statistiques ont été effectuées sur le logiciel statistique R à l'aide de l'interface utilisateur graphique R Studio. En utilisant la fonction Lmer du package lme4. La moyenne et l'écart type pour chaque propriété du bois ont été calculés pour chaque cerne annuel, puis tracés en fonction de l'âge cambial (de la moelle à l'écorce). La signification statistique des effets fixes a été déterminée à l'aide de tests F à $p < 0,05$.

2.2.4.2 Les résultats de l'infrarouge proche

Les spectres obtenus montrent des variations indépendantes de la variabilité des échantillons liées à l'appareillage et à l'environnement (température et humidité de l'air, homogénéité de la taille des particules, tassement de la poudre, etc.), Il est donc nécessaire de les traiter mathématiquement afin d'éliminer l'impact de ces changements extérieurs. Ils subissent une normalisation permettant d'uniformiser les variations. Les données sont ensuite soumises à deux calculs séquentiels de dérivations qui permettent l'interprétation, la comparaison et l'amplification des différences spectrales (Migeon, 2013). Ainsi, des combinaisons de traitements différents sont utilisées pour construire les modèles, et seuls les ensembles de combinaisons qui produisent les meilleures qualités de modèle sont conservés.

Grâce à la méthode de régression des moindres carrés partiels (PLS = Partial Least Squares), les spectres traités sont corrélés avec les résultats chimiques (obtenus par les dosages conventionnelles) et les résultats de la masse volumique pour produire des modèles de prédiction (Migeon, 2013). La recherche de « outliers », ou valeurs anormales, ou aberrantes permet d'améliorer les modèles.

Les statistiques basées uniquement sur l'ensemble de calibrage peuvent donner une représentation inexacte de la capacité prédictive du modèle pour des échantillons inconnus car il est possible de "sur ajuster" le modèle à l'ensemble de calibrage, en particulier si un grand nombre de facteurs PLS sont utilisés. Les statistiques de validation croisée donnent une meilleure idée de la robustesse d'un modèle mais, idéalement, une validation indépendante (un ensemble de tests) devrait être utilisée (Seppälä, 2015). Lors de la présentation de nos résultats statistiques de régression, sauf les valeurs de l'ensemble de test de validation croisés ont été utilisés à cause du faible nombre d'échantillons disponibles.

La qualité des modèles est déterminée grâce à plusieurs paramètres statistiques. Le premier paramètre à déterminer est le coefficient de régression en validation croisée R^2_{CV} (validation croisée simple) qui doit être proche de 1 avec un nombre de composantes (ou nombre de facteurs) du modèle de régression utilisées qui doit être le plus faible possible. Le nombre de facteurs optimale choisi pour un modèle de calibration a un impact significatif sur sa capacité de prédiction. Lorsque le nombre de facteurs est trop faible, le modèle ne reflète pas entièrement les caractéristiques de l'échantillons, ce qui entraîne une faible précision de prédiction. Un nombre de facteurs élevés conduisent à un ajustement excessif de prédiction. Cependant, lorsque le modèle est appliqué à des échantillons inconnus, l'effet de prédiction est faible car le modèle n'est pas robuste (Yan et al., 2019).

De plus, lors de la validation, diverses statistiques peuvent être estimées pour évaluer la qualité du modèle choisi, notamment l'erreur moyenne de prédiction en validation croisée (RMSECV) qui mesure la précision moyenne (c'est-à-dire la différence entre la valeur de composition réelle et estimée) de la prédiction. Cette

valeur d'erreur est présentée en pourcentage (Seppälä, 2015). Le critère RPD (ceci est égal au SEP divisé par l'écart type des valeurs actuelles déterminées par les méthodes conventionnelles) des échantillons dans l'ensemble de test. C'est un paramètre statistique sans dimension, permettant de comparer différents modèles, et dont les valeurs plus élevées indiquent une augmentation de la précision (Seppälä, 2015). Toutes ces statistiques ont été utilisées dans cette étude pour évaluer l'efficacité et la précision de la prédiction.

2.3 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, les matériels utilisés, échantillons de bois et appareillage, ont été décrits ainsi que le mode opératoire pour chaque méthode de caractérisation. En outre, le processus pour établir les modèles de prédiction chimiques basé sur la spectroscopie infrarouge proche NIR a été détaillé. Les méthodes de caractérisation, correspondant principalement à des essais de densitométrie à rayons X et des essais de caractérisation chimiques conventionnelles ont été décrites. Les résultats des propriétés physiques et chimiques du bois ainsi que les modèles de prédictions seront décrits dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de décrire et discuter les résultats obtenus à partir de la caractérisation des échantillons de bois d'érable à sucre. Les résultats incluent le traitement d'image par le logiciel ImageJ et la densitométrie à rayons X afin de déterminer les proportions du bois (aubier, duramen et carie) et la masse volumique du bois. Enfin, ce chapitre se termine par l'explication de la détermination de la composition chimique du bois par des méthodes conventionnelles et l'utilisation de la méthode de spectroscopie infrarouge proche NIR afin de réaliser des modèles de prédictions des propriétés et des qualités de bois d'érable à sucre.

3.2 Propriétés physiques

3.2.1 Proportions du duramen, de l'aubier et de la carie

Les valeurs des proportions par arbre entier sont résumées à l'annexe. Les statistiques descriptives des proportions d'aubier, de duramen et de carie sont présentées au tableau 3.1.

La proportion moyenne surfacique du duramen variait de 0 à 49%, tandis que la proportion d'aubier variait de 37 à 63 %. La surface de carie variait de 3 à 63 %. Le coefficient de variation pour la surface d'aubier et de duramen était de 15,1% et 70,8%, respectivement. Cependant, les proportions de carie ont montré une

variation significative entre les arbres (96,24 %). Lorsque présente, la proportion moyenne de carie est de 22,2 % et peut atteindre 63 % du surface total des rondelles.

Tableau 3.1 : Statistiques descriptives des proportions en surface d'aubier, de duramen et de carie (%) par arbre entier (n=8 arbres cariés)

Constituant	moyenne (écart-type)	étendue	CV*
Aubier	53,6 (8,1)	36,6 – 63,2	15,1
Duramen	24,2 (17,1)	0 – 48,8	70,8
Carie	22,2 (21,4)	2,9 – 63,4	96,2

Noter. *Coefficient de variation=moyenne/écart-type

La variabilité est importante à l'intérieur des sites, c'est-à-dire entre les arbres. Nous pouvons supposer que les proportions d'aubier, de duramen et de carie varient principalement selon les caractéristiques individuelles des arbres échantillonnés.

Les coefficients de corrélation de Pearson des proportions de bois versus les caractéristiques de l'arbre sont présentés au tableau 3.2. Les proportions d'aubier et de duramen par arbre entier sont fortement corrélée à la proportion de carie et l'âge de l'arbre. Il est intéressant de noter aussi que l'effet de l'âge sur la proportion de la carie n'est pas significatif. De plus, le DHP est fortement corrélé avec l'âge de l'arbre.

En général, l'âge augmente avec l'augmentation de diamètre (DHP) dans toutes les essences du bois, tout comme la variabilité de l'âge des arbres. Le DHP était significativement lié à l'âge ($P < 0,01$). Kenefic et Nyland (1999) ont également trouvé une relation significative entre le DHP (arbres de 27 po de DHP) et l'âge (arbres de 120 ans) chez les érables à sucre. Il s'agit d'une relation importante car le DHP est souvent utilisé comme substitut pour la gestion des peuplements de structure irrégulière. La relation DHP-âge fournit également un lien étroit entre les processus sensibles au temps tels que la croissance en diamètre, la production de bois et le développement de pourriture qui peut être traduit en attributs d'arbres

facilement mesurables qui sont utiles dans la gestion des forêts. De plus, la qualité et le volume des arbres et des grumes sont déterminés, en grande partie, par le diamètre des arbres et la croissance en diamètre. (Dey Daniel et al, 2017). Par conséquent, une forte relation DHP-âge facilite les estimations de la qualité et de la valeur actuelles et futures des arbres.

Tableau 3.2 : Coefficients de corrélation de Pearson entre les proportions d'aubier, de duramen, de carie l'âge et le DHP.

Variable	Age	Aubier	Duramen	Carie
Proportion d'aubier	-0,70*			
Proportion de duramen	0,58*	-0,18		
Proportion de carie	0,20	-0,73**	0,55*	
DHP	0,78**	-0,45	0,42	0,09

Noter. PA, PD et PC représentent respectivement les proportions de l'aubier, de duramen et de la carie. * indique $p < 0,05$. ** indique $p < 0,01$

3.2.2 Mesure de la masse volumique

Le tableau 3.3 présente la moyenne et le coefficient de variation de la masse volumique du bois, entre le bois de l'aubier, duramen et le bois attaqué par la carie dans un stade primaire coloré et un stade avancé. La masse volumique moyenne du bois de l'érable à sucre était de 663 kg/m^3 , et 695 kg/m^3 pour l'aubier et le duramen coloré respectivement. Ces résultats concordent quelque peu avec ce qui a été rapporté précédemment dans le chapitre I dans la partie masse volumique. La masse volumique du bois de cœur était légèrement supérieure à celle de l'aubier, ce qui est probablement dû à la différence de structure et la composition chimique entre le bois de duramen et le bois de l'aubier. Le bois carié coloré possède une masse volumique proche de celle de bois d'aubier et de duramen (665 kg/m^3), toutefois la différence de masse volumique entre les trois zones de bois de l'érable à sucre est négligeable et sa masse volumique de bois pourrait être considérée comme uniforme (Koubaa et al., 2002). Cependant, la masse volumique du bois carié dans un stade avancé était beaucoup plus faible que les autres parties du bois (472 kg/m^3).

Tableau 3.3 : Moyennes et coefficients de variation de la masse volumique des cernes pour l'aubier, le duramen et la carie (coloré et stade avancé) prélevé à hauteur de poitrine des 18 rondelles de bois d'érable à sucre.

Masse volumique	Moyenne (kg/m ³)	CV (%)	D _{min} (kg/m ³)	D _{max} (kg/m ³)
Aubier	663	6	615	752
Duramen coloré	695	7	600	761
Carie coloré	665	5,9	591	778
Carie stade avancé	472	24	172	590

La masse volumique du bois a montré une faible variation entre les arbres vue les faibles valeurs de coefficient de variation (Tableau 3.3). Cependant, le bois carié stade avancé a montré une grande variation entre les arbres, ce qui est due à la présence d'arbres fortement attaqués par la carie. Par exemple, la figure 3.1 montre un échantillon carié dans un stade avancé dans laquelle la masse volumique a diminué de 600 kg/m³ jusqu'à 300 kg/m³.

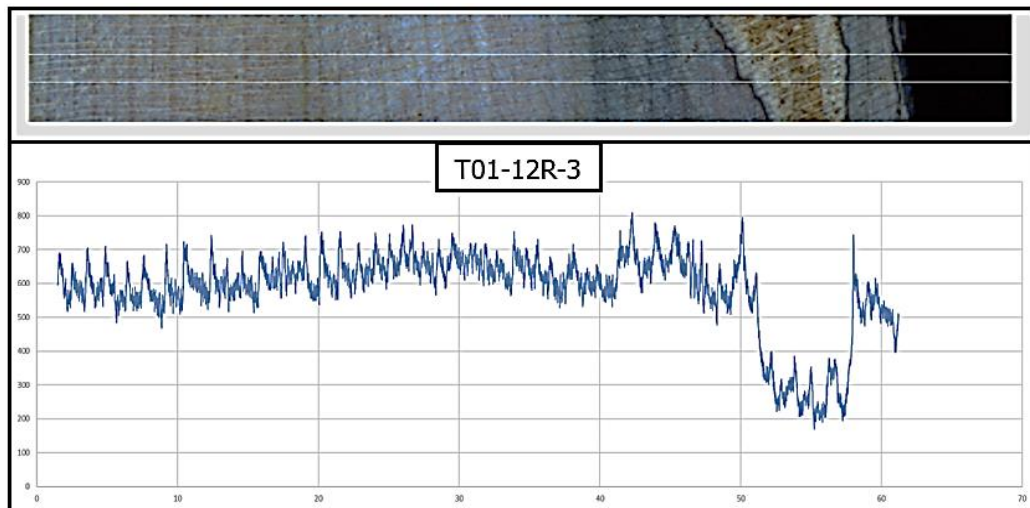


Figure 3.1 : Exemple d'un échantillon carié de bois d'érable à sucre scanné par densitomètre à rayons X (échantillon T01-12R-3)

Les schémas de variation radiale de la masse volumique du bois, du bois initial et du bois final étaient très similaires (Figure 3.2). De plus, la valeur de la masse

volumique était pratiquement la même entre ces trois types de bois. Cette constatation prouve davantage que le bois de cette essence est uniforme, ce qui est considéré comme un atout dans l'industrie du bois.

Il n'y a pas eu de changement notable dans la masse volumique du bois pour le bois sain (C0), le bois coloré (C1) et le bois pourri (C2). Cependant, au cours des années qui suit, nous constatons une légère diminution de la masse volumique des cernes, du bois initial et du bois final.

La masse volumique du bois initial au début dans les trois classes de carie (C0, C1, C2) était similaire les unes aux autres. Comme il a été montré dans l'analyse de la variance (Tableau 3.4), la classe de décomposition n'avait presque aucun effet significatif sur la masse volumique du bois, ni le bois initial ni le bois final. Les allures de la variation de la masse volumique du bois final pour le bois sain (C0) et la classe de décomposition initiale (C1) sont typiques de ceux de la variation radiale et ils n'ont montré aucune différence par rapport à la masse volumique du bois (Figure 3.2). En effet, le bois de l'érable à sucre est considéré comme uniforme car il présente de petites différences de masse volumique entre le bois initial et le bois final (Koubaa et al., 2002) qui est similaire à d'autres essences de bois comme le peuplier et le bouleau (Pliura et al., 2007).

Une analyse de variance utilisant un effet de modèle mixte sur la composante de masse volumique du bois a été effectuée et les résultats sont présentés dans le tableau 3.4.

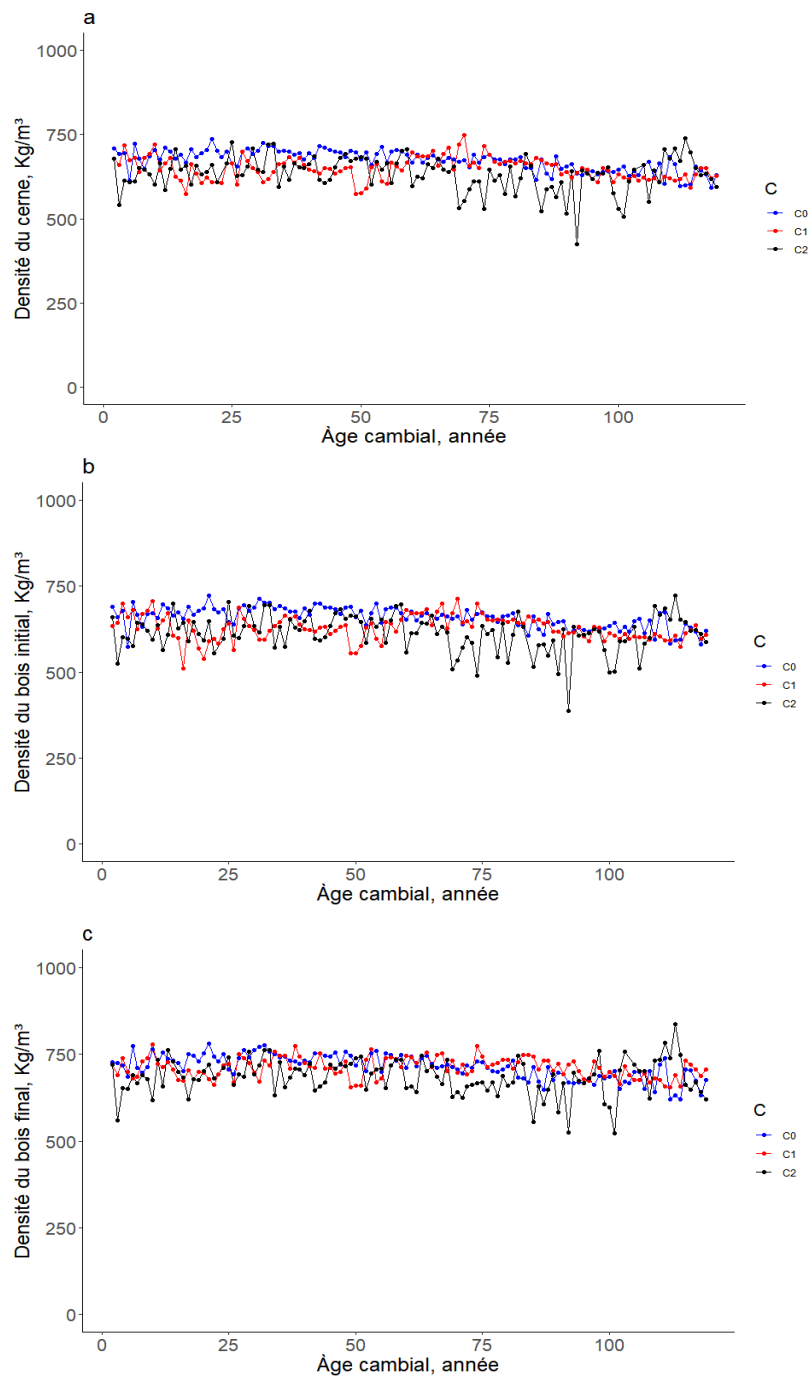


Figure 3.2 : Variation de la masse volumique moyenne des cernes (a), de la masse volumique du bois initial (b) et de la masse volumique du bois final (c) en fonction de la classe du carie (C0, C1 et C2) et du bois (aubier, duramen et bois carier) chez l'érable à sucre. Classe de la carie : C0= bois sain ; C1= stade initial de décomposition et C2 = stade avancé de décomposition

Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse de variance des effets fixes valeurs de F et de P, les masses volumiques du cerne, du bois initial et du bois final pour l'*Acer saccharum*.

	Dl ^d	Masse volumique du cerne		Masse volumique du bois initial		Masse volumique du bois final	
		F	P	F	P	F	P
Age cambial (AC)	62	24.11	<0,0001	16.2	<0,0001	11.73	0,0006
Classe de la carie (CC)	2	4.74	0,02	4.69	0,02	4.35	0,02
Site	1	0.85	0.37	0.95	0,34	0.02	0,86
AC * CC ^a	124	6.34	0,001	5.92	0.002	4.81	0,008
AC * Site ^b	62	0.48	0,48	0.25	0.61	0.018	0,89
CC * Site ^c	2	1.59	0,24	1.45	0.27	2.48	0,12
Arbre	8		<0,0001		<0,0001		<0,0001

AC : âge cambial, CC : classe de la carie, ^a interaction entre âge cambial et la classe de la carie, ^b interaction entre âge cambial et le site, ^c interaction entre la classe de la carie et le site, ^d degré de liberté.

L'âge cambial était la principale source de variation et avait un effet significatif sur toutes les composantes de la masse volumique du bois. Ces résultats sont prouvés par de nombreuses autres études, qui ont noté l'effet important de l'âge cambial sur les propriétés du bois en général et sur la masse volumique en particulier.

La classe de bois (C0, C1, C2) a eu un léger effet significatif sur la composante de masse volumique du bois ($p=0,02$). Ce qui est logique, comme nous l'avons observé plus tôt dans la figure 3.2, la composante de masse volumique du bois différait légèrement selon la classe de bois.

En ce qui concerne les interactions, la plupart d'entre eux n'étaient pas significatifs à l'exception de l'interaction entre l'âge cambial et la classe de bois, qui s'explique probablement par l'effet significatif de l'âge cambial et de la classe de bois.

3.3 Caractérisations des propriétés chimiques

3.3.1 Méthodes conventionnelles

L'annexe 2 fournit un résumé de la composition chimique des rondelles de bois d'érable à sucre utilisées dans cette étude. Les 18 érable à sucre analysés avaient des teneurs différentes, notamment pour la cellulose avec une valeur moyenne des trois parties (aubier, duramen et carie) de 46,6%, l'hémicellulose 30,5%, la lignine 22,9% et les extractibles avec 5,2 %. Pour le duramen sain, la teneur moyenne en extractible était de 5,3%. Les teneurs moyennes en lignine et en cellulose étaient de 22,4% et 47,5%, respectivement. La teneur moyenne en hémicelluloses était de 30,1%. La teneur moyenne en extractibles pour l'aubier (Tableau 3.5) était systématiquement inférieur (4,1%) à celui du duramen (5,3%). Cependant, la teneur moyenne en lignine était plus élevée (25,9 %) dans l'aubier que dans le duramen (22,4%).

La figure 3.3 représente la variation de la composition chimique moyenne en extractible, cellulose, hémicellulose et lignine entre l'aubier, le duramen et la carie du bois d'érable à sucre.

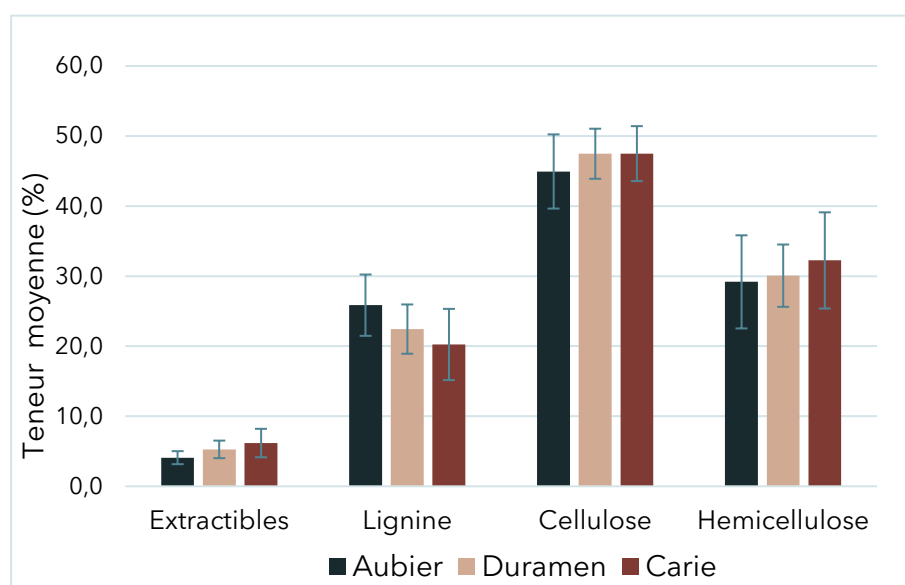


Figure 3.3 : Variation de la composition chimique moyenne en extractible, cellulose, hémicellulose et lignine entre l'aubier, le duramen et la carie du bois d'érable à sucre

La présence de la carie a été associée à des changements substantiels dans la composition chimique, notamment dans une baisse de la lignine. La teneur en extractibles a légèrement augmenté avec la décomposition passant de 4,1% dans le bois d'aubier à 6,2% dans le bois de cœur carié. La présence de la coloration et de la pourriture était associée à une légère augmentation des teneurs en extractibles. Cela suggère que les champignons de la pourriture blanche avaient du mal à attaquer ces composés phénoliques. Cependant, les champignons de décomposition peuvent dégrader ces composés sous certaines combinaisons de conditions environnementales, telles que la présence d'oxygène et d'humidité (Boddy et Rayner, 1983). Il est à souligner aussi que les extractibles sont des composés à faible poids moléculaire contribuant significativement à conférer au bois certaines propriétés comme la durabilité et la coloration du bois ce qui correspond avec les données de Stevanovic et Perrin, (2009) et de Mounquengui, (2008).

Schultz et Nicholas, (2000) ont rapporté que les extractibles peuvent protéger le bois contre la colonisation fongique et la dégradation subséquente par un double mécanisme : les extractibles ont une certaine activité fongicide et sont également des antioxydants radicalaires, qui réduisent rapidement les radicaux hydroxyles et pourraient protéger les fibres de cellulose. Ce mécanisme de la double défense est basé sur le fait que les champignons pourraient utiliser certains types d'espèces de radicaux libres pour perturber initialement les parois cellulaires en augmentant la taille des pores, ce qui faciliterait ensuite la diffusion des enzymes fongiques dans les parois cellulaires. Cependant, les extraits phénoliques du bois de cœur sont d'excellents antioxydants et contribuent donc probablement aux mécanismes de défense chimique de l'arbre qui exercent une grande influence sur la coloration des surfaces du bois (Willför et al, 2003). La structure du bois associé aux blessures a également été étudiée chez le hêtre (Vek et al., 2013) et les résultats ont révélé que des quantités plus élevées de phénols totaux étaient caractéristiques de la zone de réaction, et en particulier du bois blessé.

Les résultats ont également révélé que la teneur en cellulose et en hémicellulose augmentait légèrement avec la décomposition, tandis que la teneur en lignine

diminuait (Figure 3.3). Lors de la désintégration du bois par la carie, les teneurs en cellulose et hémicellulose ont augmenté de 5,67 % et 10,52 % respectivement, tandis que la teneur en lignine a subi une diminution importante de 21,7 %. L'augmentation apparente de la teneur en hollocellulose est due en partie à l'élimination continue de la lignine quand elle se dégrade. Cette augmentation est attribuable à l'incapacité des champignons à attaquer les polysaccharides par rapport à la lignine. Ainsi, ce résultat s'explique par la diminution de la teneur en lignine.

Cowling et Kirk (1976) ont indiqué que le bouleau et l'épinette contenaient respectivement 77,6 et 70,7 % d'hollocellulose et 19,3 et 26,3 % de lignine. Nos données sur l'hollocellulose et la lignine de l'érable à sucre sont compatibles avec d'autres signalées pour les arbres feuillus et suivent une tendance vers des valeurs de lignine plus faibles et des valeurs d'hollocellulose plus élevées dans les bois feuillus par rapport au bois résineux (Panshin et Zeeuw, 1970).

Une analyse de variance ANOVA à un seul facteur a été réalisée sur les différentes propriétés chimiques du bois (cellulose, hémicellulose, lignine et extractible). L'objectif principal de cette analyse est de voir l'effet de la partie du bois (aubier, duramen et bois carié) sur les propriétés chimiques du bois d'érable à sucre.

Tableau 3.5 : Résultats de l'analyse de variance ANOVA de la composition chimique du bois d'érable à sucre.

	Effet fixe	
	Partie de bois	
	Valeur F	Valeur P
Cellulose	17,94	<0,0001***
Hémicellulose	11,88	<0,0001***
Lignine	28,66	<0,0001***
Extractible	9,54	0,0003***

Sur la base du résultat présenté dans le tableau 3.5, toutes les propriétés chimiques variaient considérablement avec les différentes parties du bois. Ces résultats sont normaux, car ils ont été prouvés pour d'autres essences de bois. Par exemple, ces variations radiales des propriétés chimiques sont dues à de nombreux facteurs tels que l'effet de la croissance de l'arbre, fournir un support mécanique et une résistance aux maladies. Par exemple, le teneur d'extractible trouvé dans le bois de cœur est généralement bien supérieur à celui de l'aubier, qui protège l'arbre contre les maladies.

Même si l'effet de la partie du bois était significatif sur toutes les propriétés chimiques, en comparant les valeurs F, nous pouvons voir que la lignine avait la variation la plus élevée. Ce qui est probablement due à l'attaque de la pourriture dans le bois de cœur. Ce qui signifie que la lignine est la composante chimique ciblé par la pourriture.

Les résultats trouvés confirment la nature de la carie qui est de type pourriture blanche sélective (Schwarze et al., 2000). Elle débute par dégrader la lignine en particulier, mais aussi l'hémicellulose dans un stade plus avancé. Comme il ne reste pratiquement que la cellulose blanchâtre, le bois s'allège et se décolore (Eaton et Hale, 1993). La structure fibreuse et molle du bois, dans le sens de la longueur, est également typique. En phase terminale, le bois est spongieux (Figure 3.4). Il garde largement sa structure, contrairement au bois atteint de pourriture brune (Schwarze et al., 2000).



Figure 3.4 : Structure spongieuse du bois d'érable à sucre en phase terminale

3.3.2 Spectroscopie par l'infrarouge proche (NIRS)

Les résultats donnés par l'appareil spectromètre NIR à transformé de Fourier se présentent sous forme de spectres NIR sur lesquels on retrouve des bandes dites harmoniques et des bandes représentatives de la combinaison des vibrations fondamentales au niveau des liaisons (Figure 3.5).

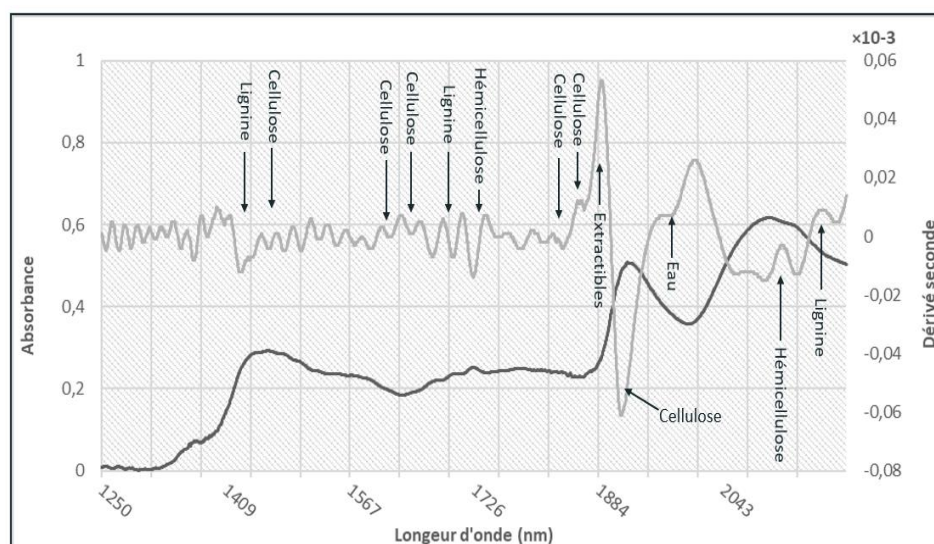


Figure 3.5 : Spectre infrarouge proche (ligne noire continue) et spectre de la dérivée seconde (ligne grise) du bois d'érable à sucre. Les deux spectres indiquent la moyenne de tous les échantillons (n=44)

Les attributions du spectre NIR à des composants spécifiques du bois ont été rapportées par un certain nombre d'auteurs (Fujimoto et al., 2007). La figure 3.5 montre les spectres NIR d'origine et la dérivée seconde du bois de l'érable à sucre. Les bandes d'absorption spécifique au bois sont étiquetées dans cette figure et leurs affectations sont résumées dans le tableau 3.7.

Le bois est un matériau composite composé de trois polymères majeurs, à savoir la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Les bandes d'absorption dans la région NIR sont associées avec ces trois polymères. Les composantes cellulosiques du bois sont classées en régions amorphes, semi-cristallines et cristallines. Les bandes d'absorption OH attribuées à la première harmonique du mode de vibration d'étirement OH fondamental sont identifiées par les pics 1403.6 et 1460.4 attribués à la lignine et à la cellulose. Les hémicelluloses sont des polysaccharides dont les degrés de polymérisation sont plutôt inférieurs à ceux de la cellulose. La bande d'absorption à 1711 nm est attribuée à la première harmonique de la vibration d'étirement CH fondamentale dû au furanose ou au pyranose (invariablement associé à l'hémicellulose). La lignine est un polymère amorphe tridimensionnel majoritairement composé de motifs phénylpropane liés par des liaisons éther. La paroi cellulaire et l'espace intercellulaire sont recouverts de lignine après la biosynthèse des polysaccharides. La bande d'absorption à 1687.2 nm est attribuée à la première harmonique du mode d'étirement aromatique CH dû aux groupes phényle de la lignine.

Il convient également de noter que la bande d'absorption à 1895.2 nm est attribuée à une combinaison de modes d'étirement et de déformation OH dans l'eau. Les molécules d'eau sont condensées en une ou plusieurs couches sur des sites de sorption dans la région amorphe du bois. Pour les autres bandes d'absorption des affectations concluantes ou provisoires faites à l'aide de références sont présentées dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Attribution des bandes d'absorption représentatives pour le bois d'érable à sucre

Longueurs d'onde	Groupes	Composé chimique	Références
1403,57	OH str	Lignine	(Shenk et al, 2001)
1460,35	OH str	Cellulose	(Fujimoto et al., 2007)
1687,15	CH str	Lignine	(Workman et Weyer, 2007)
1711,26	CH str	Hémicellulose	(Fujimoto et al., 2007)
1773,74	CH ₂ str	Cellulose	Workman et Weyer (2007)
1895,16	OH str +OH def	Eau	Workman et Weyer (2007)
2093,16	OH str + CH def	Cellulose	Workman et Weyer (2007)
2121,08	CH str + CC	Lignine	Shenk et al, (2001)
2223,53	CH + CO	Extractibles	Workman et Weyer (2007)

Il est difficile d'attribuer des caractéristiques moléculaires aux spectres NIR en raison de l'étendue du chevauchement des vibrations moléculaires dans la gamme NIR. Des études complémentaires sur l'attribution des bandes d'absorption NIR pour les échantillons de bois sont donc nécessaires pour mieux comprendre la contribution vibrationnelle NIR des différents constituants.

3.3.3 Corrélations des résultats chimiques avec les spectres infrarouges

3.3.3.1 Construction des modèles de calibration

Après traitement mathématique et analyse statistique, quatre prétraitements ont permis l'établissement des modèles de calibration y compris le raffinement (smoothing), la normalisation, la dérivée seconde et le MSC (Multiplicative Scatter Correction) à partir des spectres bruts obtenus de 8000 à 4000 cm⁻¹. Les spectres ainsi traités sont mis en corrélation avec les résultats chimiques grâce à la méthode de régression des moindres carrés partiels PLS pour obtenir des modèles de prédiction (Dou et al., 2016).

Les modèles ont été obtenus à partir des spectres des 44 échantillons (18 échantillons d'aubier, 18 échantillons de duramen et 8 échantillons de carie) pour les dosages des extractibles, de lignine insoluble « Klason », pour la cellulose, l'hémicellulose et la masse volumique. Les résultats sont présentés à la fois visuellement sous forme de graphiques et sous forme de tableau en valeurs numériques.

La validation croisée a été appliquée aux modèles de calibration avec le plus petit nombre optimal de facteurs. Pour l'extractible, la lignine, la cellulose et l'hémicellulose, le nombre optimal des facteurs sont 7, 12, 12 et 11, respectivement. Dans la figure 3.6, les graphiques des RMSEC et RMSECV par rapport au nombre de facteurs sont indiqués pour les différentes composantes chimiques du bois. Ces valeurs ont été calculées et tracées par le logiciel de calcul statistique R. Les erreurs marquent le choix final du nombre optimal de facteurs pour le paramètre individuel

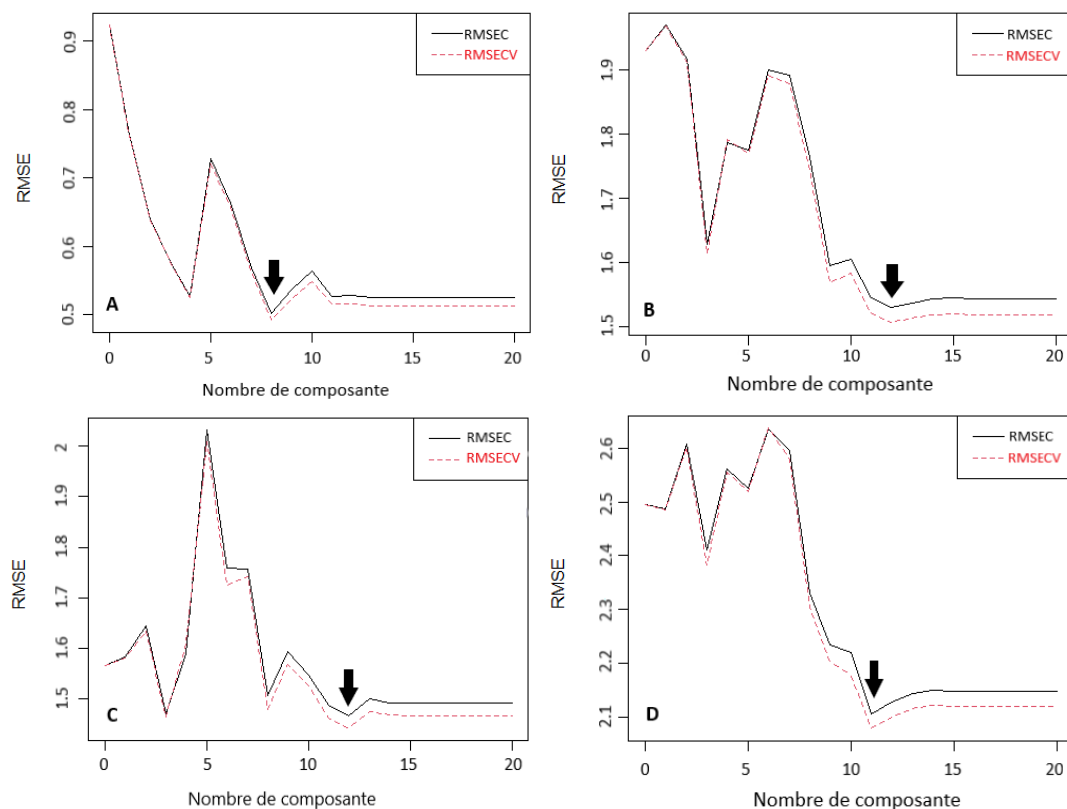


Figure 3.6 : Effet du nombre de facteurs sur le RMSEC et le RMSECV pour les extractibles (A), la lignine (B), la cellulose (C) et l'hémicellulose (D)

Les résultats statistiques des modèles de prédictions sont présentés dans le tableau 3.7. Étant donné que la calibration peut être étroite en se basant juste sur les échantillons utilisés dans la calibration, on obtient rarement une démonstration réaliste des performances futures. Ainsi, les résultats d'une validation ont été considérés comme essentiels. Cependant, on peut noter que les modèles de calibration individuelles pour la prédiction des propriétés chimiques ont donné des bonnes valeurs de R^2 allant de 0,86 à 0,92 et des erreurs RMSECV faibles inférieure à 3%. Cependant, la valeur de R^2 pour la prédiction de la masse volumique égale à 0,73 avec un RMSECV de 22,75%. Ces deux paramètres reflètent la satisfaction de la performance des modèles en utilisant l'approche de validation croisée.

Tableau 3.7 : Caractéristiques des modèles de calibration obtenues en NIR

	Transformation	Nombre de composantes	R^2_{CV}	RMSECV	RPD	Nombre d'outliers
Extractible	Normalisation, dérivée seconde	7	0,89	0,5	4,1	5
Lignine	Normalisation, dérivée seconde	12	0,91	1,49	19	3
Cellulose	Normalisation, dérivée seconde	12	0,92	1,24	25	3
Hémicellulose	Normalisation, dérivée seconde	11	0,86	2,08	4,5	2
Masse volumique	Normalisation, dérivée seconde	8	0,73	22,75	2,4	6

Certaines directives générales pour évaluer les performances du modèle sur la base des résultats statistiques sont présentées dans le tableau 3.8. R^2 est adapté par Ward et al (2011) et RPD par Li-Chan et al (2011).

Tableau 3.8 : Valeurs indicatives générales pour estimer les performances d'un modèle, les applications appropriées mentionnées entre parenthèses.

Degré de réussite de calibration	R ²	RPD
Excellent (contrôle de processus/quantification)	>0,95	>6,5
Réussi (contrôle de qualité)	0,9-0,95	5-6,5
Modérément réussi (investigation)	0,8-0,9	3-5
Modérément utile (investigation plus rigoureux)	0,7-0,8	2-3

Les diagrammes de dispersion des valeurs mesurés par rapport aux valeurs prédits pour la composition chimique des 44 échantillons de bois d'érable à sucre sont illustrés dans la figure 3.7.

Pour la lignine et la cellulose, la meilleure calibration est construite avec 41 spectres (3 outliers) et 12 composantes principales. Les valeurs R² pour la validation croisée sont de 0,91 et 0,92, respectivement, et les RMSECV correspondants sont de 1,49% et 1,24%, suggérant ainsi une bonne performance de calibration avec des modèles réussis. De plus, les valeurs RPD (19 pour la lignine et 25 pour la cellulose) sont cohérentes avec les résultats trouvés par d'autres travaux. Plus le résultat est élevé, plus le modèle est précis.

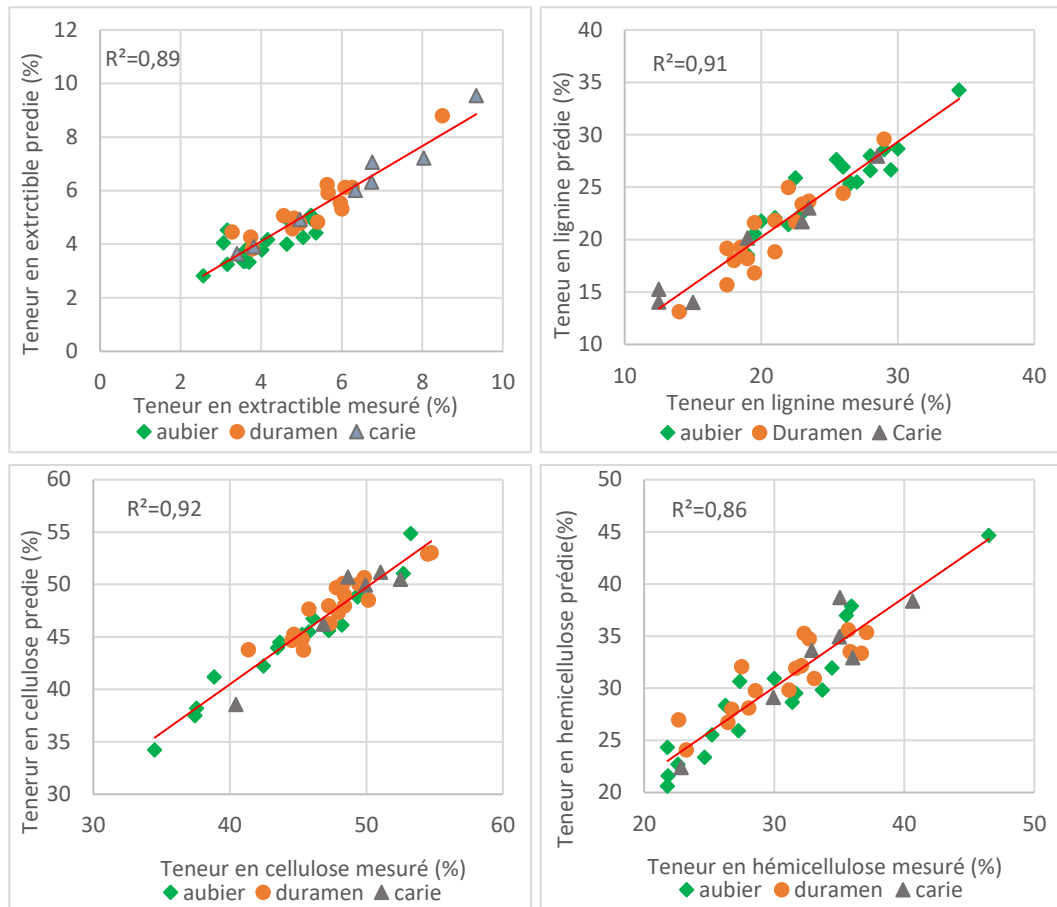


Figure 3.7 : Modèles de calibration obtenu après traitement statistique des résultats de dosage des extractibles (A), la lignine (B), la cellulose (C) et l'hémicellulose (D) des 44 échantillons et de leurs spectres NIR

Pour l'extractible et l'hémicellulose les modèles ont été construites avec 7 et 11 composantes principales, respectivement, et par suppression de 5 et 2 outliers. Les valeurs R^2 pour la validation croisée sont de 0,89 et 0,86, respectivement, et les RMSECV correspondants sont de 0,5% et 2,08%. Par conséquent, la calibration donne des résultats de précision inférieures à celle de lignine et de cellulose.

La suppression de 5 données spectrales pour certains échantillons de l'étalonnage des extractibles pourrait détruire les données pertinentes qui seraient importantes pour la calibration. Par conséquent, la précision du modèle peut diminuer. L'erreur dans le modèle de prédiction de la teneur en extractibles est plus faible que celle de la lignine qui est un polymère de structure très complexe, il est donc

difficile de déterminer sa quantité exacte dans le bois. L'erreur dans un modèle construit pourrait être due aussi à des erreurs de détermination de la composition chimique en laboratoire ainsi qu'à des erreurs de scan des échantillons (poudre ou carotte) par NIR. Selon le tableau 3.8, les valeurs d'RPD d'extractible (4,1) et d'hémicellulose (4,5) sont entre 3 et 5. Alors, les résultats pourraient être considérés comme modérément réussis.

Une autre méthode simple de vérification de l'efficacité des modèles est d'essayer de comparer les valeurs de la littérature par leurs valeurs prédites par les modèles de calibration (Tableau 3.9). On peut remarquer que les valeurs prédites sont très proches des valeurs de la littérature (Sjostrom 1993). En effet, l'erreur relative est inférieure à 2%.

Tableau 3.9 : Comparaison entre les valeurs de la littérature avec leurs valeurs prédites par les modèles de calibration du bois d'érable à sucre.

	Modèle	Valeur de la littérature (%) Sjostrom (1993)	Valeur prédite (%)	Erreur relative (%)
Extractibles	$Y=0,8887X+0,5523$	5,5	5,4	1,8
Lignine	$Y=0,9094X+2,0408$	25,5	25,3	0,78
Cellulose	$Y=0,9236X+3,5611$	40,7	41,1	0,98
Hémicelluloses	$Y=0,861X+4,2607$	30,8	30,78	0,06

Les modèles de calibration des valeurs mesurées par rapport aux valeurs prédites pour la proportion du bois et la masse volumique des 44 échantillons de bois d'érable à sucre sont illustrés dans la figure 3.8.

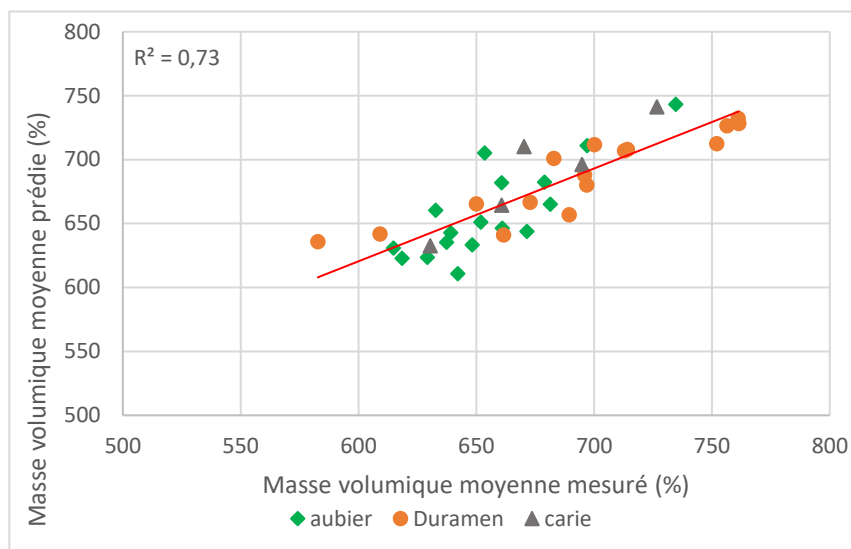


Figure 3.8 : Modèle de calibration obtenu après traitement statistique des résultats de la masse volumique des 44 échantillons et de leurs spectres NIR

Pour la masse volumique, le modèle a été construit avec 8 composantes principales, et par suppression 6 valeurs aberrantes. La valeur de R^2 pour la validation croisée est de 0,73, et l'erreur standard moyenne RMSECV est 22,75%. Par conséquent, la calibration donne des résultats de précision inférieurs à celle des résultats de la prédiction des propriétés chimiques. De plus, la valeur de RPD est notamment faible, ce qui confirme que le modèle est modérément utile (investigation plus rigoureuse nécessaire).

3.3.3.2 Application pratique des modèles

Afin d'essayer nos modèles, développés par les 44 échantillons provenant des 18 arbres, comme une application pratique, les 240 carottes prélevées sur 8 sites ont été scannés par le NIR. Les spectres obtenus sont prétraités par raffinage (smoothing), normalisation, dérivée seconde et par MSC (Multiplicative Scatter Correction). Les résultats de prédictions des carottes sont résumés dans la figure 3.9.

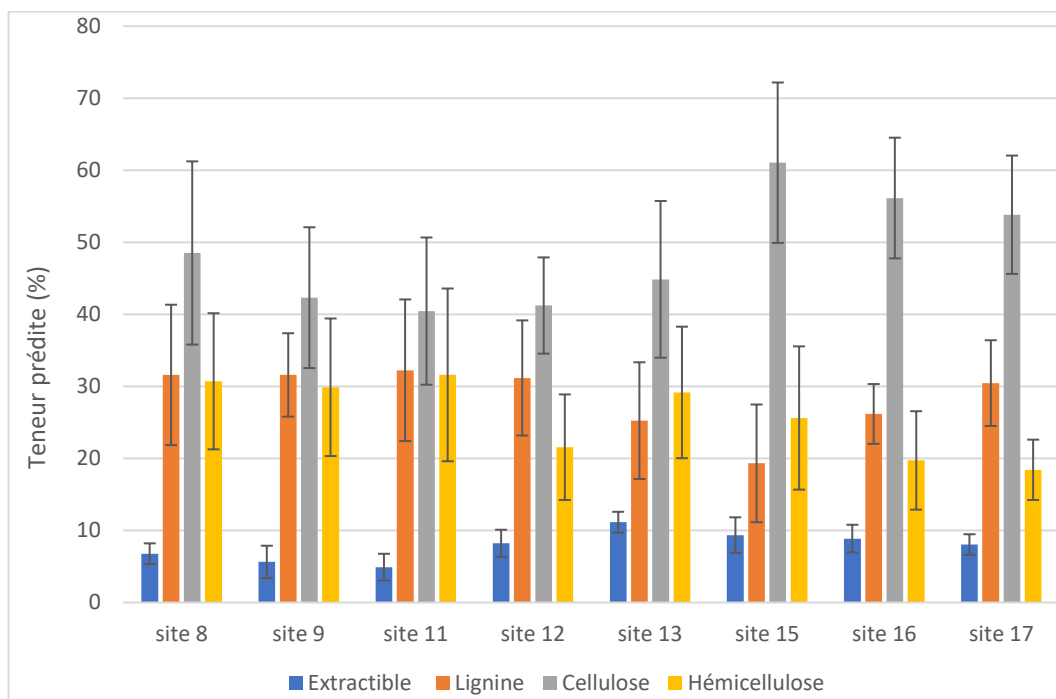


Figure 3.9 : Variation des différentes teneurs prédites de la composition chimique des carottes de bois d'érable à sucre en fonction des sites

Les teneurs moyennes prédites en extractible, lignine, cellulose et hémicellulose des carottes sont comparables avec les valeurs trouvées par les méthodes conventionnelles et dans la littérature avec une variance assez élevée.

La figure 3.9 montre une variation importante de la composition chimique entre les différents sites. En effet, la teneur moyenne en extractible prédite est maximale dans le site 13 avec une valeur proche de 11% et minimale dans le site 11 avec une valeur de 5%. Pour la lignine, la teneur moyenne prédite est maximale dans le site 11 (32%) et minimale dans le site 15 (25%). Pour la cellulose et l'hémicellulose les teneurs moyennes prédites varient entre les différents sites allant de 40-61% et 18-32% respectivement. Ces résultats confirment que les modèles obtenus sont applicables pour prédire la composition chimique intra et intersites.

Les sites 15, 16 et 17 possèdent les valeurs les plus élevées en celluloses et les plus faibles en lignines. En effet, la majorité des arbres scannés pour ces trois sites sont cariés avec des proportions de caries variables. Par exemple, 36 arbres parmi 50

sont cariés dans le site 15. Tandis que la majorité des arbres scannés pour les autres sites sont sains ayant des teneurs en celluloses moins élevés allant de 40-48% et des teneurs en lignines plus élevés variant entre 25 et 32%. Alors, on peut déduire que les sites 15, 16 et 17 sont les plus attaqués par la carie blanche.

Les résultats de cette étude sur une population d'érables à sucre indiquent qu'il est possible de prédire les quantités de constituants structuraux chimiques présents dans la biomasse lignocellulosique de l'érable à sucre à l'aide de NIRS.

3.4 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, des résultats de caractérisation physiques et chimiques des échantillons de bois sont analysés. Les analyses chimiques conventionnelles sont en très bon accord avec la littérature. Les résultats évaluent la présence de la carie blanche qui attaque le bois d'érable à sucre. En effet, les teneurs en celluloses et hémicelluloses ont augmenté alors que la teneur en lignine a diminué. Ensuite, des caractérisations physiques du bois ont été étudiés sur la base de la densitométrie à rayons X et la détermination des proportions de bois (aubier, duramen et carie). La méthode NIR offre une alternative non destructive à faible coût pour la prédiction de la caractérisation et la quantification des propriétés chimiques du bois. En effet, des modèles de prédictions ont été développés pour quantifier les composants chimiques du bois, les proportions et la masse volumique moyenne du bois d'érable à sucre dans chaque partie. La prédiction de la composition chimique des feuillus forestiers peut contribuer à accroître les connaissances sur les différents processus à petite et à grande échelle en fournissant des techniques d'identification à distance.

CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS PRATIQUES

Conclusions :

Les objectifs de cette étude étaient d'étudier la variation intra-arbre des propriétés physiques et chimiques et d'évaluer l'impact de la présence de la carie sur ces propriétés. De plus, pour développer des modèles de prédictions de la composition chimique du bois d'érable à sucre à partir des méthodes conventionnelles et en utilisant une méthode de caractérisation non destructive (NIR).

Ce travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. Le bois de l'érable à sucre a montré une variation significative entre les arbres dans la proportion de l'aubier, de bois de cœur et de pourriture.
2. Le bois de l'érable à sucre est relativement uniforme, avec presque aucune différence entre les masses volumiques d'aubier et de bois de cœur. La masse volumique moyenne du cerne de son bois était de 662,5 kg/m³. Cependant, dans le bois pourri fortement attaqué par la carie, la masse volumique a considérablement diminué.
3. La composition chimique du bois de l'érable à sucre (extractible, lignine, cellulose, et hémicellulose) a été déterminée avec des méthodes conventionnelles. Les résultats des analyses conventionnelles ont montré que la composition chimique ne varie pas entre le duramen et l'aubier. De façon générale, le bois de l'érable à sucre est très riche en cellulose et en hémicellulose représentant près de 70% dans les trois zones (aubier, duramen, et carie). Cependant, dans la zone du bois carié, et dans le stade avancé, la teneur en lignine a diminué considérablement ce qui signifie que la carie qui attaque le bois de l'érable à sucre est de type carie blanche.
4. La majorité des modèles que nous avons générés avaient une valeur R² supérieur à 0,75, ce qui indique que ces modèles sont bien ajustés et qui expliquent la plupart des variations pour les différentes propriétés chimiques et physiques du bois. Cependant, un nombre plus élevé d'échantillons améliorerait les modèles.

Implications pratiques :

Les résultats obtenus au cours de cette étude sur une population de d'érable à sucre, confirme qu'il est possible de prédire les quantités des constituants chimiques structuraux contenus dans la biomasse lignocellulosique d'érable à l'aide de la NIR.

Ces résultats permettront aux industriels, qui utilisent le bois de l'érable à sucre, de sélectionner les arbres qui ne sont pas attaqués par la pourriture. En effet, avec un simple carottage et à l'aide des modèles développés, la variation de la composition chimique intra-arbre peut être déterminée par l'infrarouge proche. Ce qui renseigne sur le type de pourriture qui peut attaquer le bois.

Les modèles de prédiction pourraient être utilisés par les industries de bois en général, et l'industrie des pâtes et papiers plus spécifiquement. Puisque aucun produit chimique n'était nécessaire pour quantifier les propriétés chimiques du bois d'érable à sucre, ces modèles ont été créés rapidement et à un coût minime en ne produisant aucun déchet chimique et en gardant ainsi l'environnement propre.

RÉFÉRENCES

- Ammar, A. (2022). Caractérisation non destructive de la proportion de carie et du module d'élasticité du bois d'érable à sucre par tomographie acoustique. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada, 77p.
- Bakeev, K. A. (2010). Process analytical technology: Spectroscopic tools and implementation strategies for the chemical and pharmaceutical industries. 2nd ed.; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA. pp. 64-69.
- Bamber, R. K. (1976). Heartwood, its function and formation. *Wood Science and Technology*, 10(1), 1–8.
- Baral, S. K., Schneider, R., Berninger, F., and Pothier, D. (2016). Heartwood formation in sugar maple (*Acer saccharum Marshall*). Modélisation de la structure des arbres pour expliquer la qualité du bois d'érable à sucre (*acer saccharum marsh*), 49p.
- Barbour, R. J., Johnson, J., and Amundson, C. (1996). Modeling intraring x-ray density profiles. In proceedings, second workshop: Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, Berg-en-Dal, Kruger National Park, South Africa., pp. 123-130.
- Basham, J. T., and Morawski, Z. J. R. (1964). The defects and associated basidiomycete fungi in the heartwood of living trees in the forests of Ontario. *Cull Studies*, 1072p.
- Basham, J. T. (1991). Stem decay in living trees in Ontario's forests: a users compendium and guide. Information Report OX-Canadian Forestry Service, Great Lakes Forestry Centre, 36, 491–505

- Bédard, S., and Deblois, J. (2010). Effets de trouées sylvicoles sur l'établissement de la régénération d'une érablière à bouleau jaune après cinq ans. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière. n° 159, Québec, Canada, 28p
- Benito, M. T. J., Ojeda, C. B., and Rojas, F. S. (2008). Process analytical chemistry: Applications of near infrared spectrometry in environmental and food analysis: An overview. *Applied Spectroscopy Reviews*, 43(5), 452–484.
- Birkett, M. D., and Gambino, M. T. (1989). Estimation of pulp kappa number with near-infrared spectroscopy. *Tappi Journal*, 72(9), 193–197.
- Bishop, D. A., Beier, C. M., Pederson, N., Lawrence, G. B., Stella, J. C., Sullivan, T. J., Bishop, D. A., Beier, C. M., Pederson, N., Lawrence, G. B., Stella, J. C., Sullivan, T. J., and Forest, H. (2015). Regional growth decline of sugar maple (*Acer saccharum*) and its potential causes, 6(10), 1-14.
- Boddy, L., and Rayner, A. D. M. (1983). Origins of decay in living deciduous trees: the role of moisture content and a re-appraisal of the expanded concept of tree decay. *New Phytologist*, 94(4), 623–641.
- Boulet, B. (2003). Les champignons des arbres de l'est de l'Amérique du Nord. Les Publications Du Québec, Québec., pp. 356–357.
- Boulet, B. (2005). Défauts externes et indices de la carie des arbres. Guide d'interprétation. 2nd ed. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 308p.
- Bouslimi, B. (2014). Variation intra-arbre, intrasites et intrasites des attributs de la qualité du bois Thuya occidental (*Thuja occidentalis L.*). Thèse de doctorat, Université du Québec Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada, 395p.
- Browning, B. L. *Methods of Wood Chemistry* (1967). Wiley-Interscience Publishers. New York, 2, 395–396

- Cantin, M. (1967). Propriétés d'usinage de 16 essences de bois de l'Est du Canada. Publication n° 1111 S. Direction Générale Des Forêts, Publication, 31p.
- Chapman, J. W., and Gower, S. T. (1991). Aboveground production and canopy dynamics in sugar maple and red oak trees in southwestern Wisconsin. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(10), 1533-1543.
- Christophe, P., Grégoire, L., and Alexia, S. (2001). Wood formation in trees. *Plant Physiology*, 127, 1513-1423.
- Clermont, L. P. e. H. S. (1952). The chemical composition of Canadian woods II. Pulp and Paper Magazine of Canada, 53, 142–143.
- Cooper, P. A., Jeremic, D., Radivojevic, S., Ung, Y. T., and Leblon, B. (2011). Potential of near-infrared spectroscopy to characterize wood products. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(11), 2150–2157.
- Cope, J. A., Winch, F. E., and Cope, E. A. (2002). Know Your Trees, Cornell University Media and Technology Services Resource Center, Ithaca, NY, USA.
- Cowling EB, Kirk TK. (1976). Properties of cellulose and lignocellulosic materials as substrates for enzymatic conversion processes. In *Biotechnol Bioeng. Symp. United States*, 6, 95-123.
- Curnel, Y., Jacques, D., Gierlinger, N., and Pêques, L. E. (2008). Variation in the decay resistance of larch to fungi. *Annals of Forest Science*, 65(8), 1.
- Dey, Daniel C., John Dwyer, and Jan Wiedenbeck. (2017) "Relationship between tree value, diameter, and age in high-quality sugar maple (*Acer saccharum*) on the Menominee Reservation, Wisconsin." *Journal of Forestry* 115(5), 397-405.
- Dou, J., Galvis, L., Holopainen-Mantila, U., Reza, M., Tamminen, T., and Vuorinen, T. (2016). Morphology and overall chemical characterization of willow (*Salix sp.*) inner bark and wood: toward controlled deconstruction of willow biomass. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(7), 3871-3876

- Duchesne, I., Vincent, M., Wang, X. A., Ung, C. H., and Swift, D. E. (2016). Wood mechanical properties and discoloured heartwood proportion in sugar maple and yellow birch grown in New Brunswick. *BioResources*, 11(1), 2007–2019.
- Dujesiefken, D., and Liese, W. 2010. The CODIT principle: the defence reactions of trees after wounding. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, Special issue, 13p.
- Eaton, R. A., and Hale, M. D. (1993). *Wood: decay, pests and protection*. Chapman and Hall Ltd. London, UK.
- Enebak, S. A., and Blanchette, R. A. (1989). Canker formation and decay in sugar maple and paper birch infected by *Cerrena unicolor*. *Canadian Journal of Forest Research*, 19(2), 225-231.
- Elliott, G. K. (1970). Wood density in conifers. *Wood Density in Conifers.*, Commonwealth Forestry Bureau, Oxford, England 8, 1-3.
- Faubert, Élyse-Ann. (2007). La phylogéographie de l'érable à sucre en Amérique du Nord, inférée à partir de la systématique moléculaire et de la palynologie.
- Fengel, D., Wegener, G., 1984: *Wood - chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, Berlin, 613p.
- Fromm, J. (2013). Xylem Development in Trees: From Cambial Divisions to Mature Wood Cells. *Plant Cell Monographs*, 20, 3–39.
- Fujimoto, T., Yamamoto, H., and Tsuchikawa, S. (2007). Estimation of wood stiffness and strength properties of hybrid larch by near-infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 61(8), 882–888.
- Gagnon, D. (2004). *La forêt naturelle du Québec, un survol. Rapport présenté pour la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise*. Université du Québec, Montréal.
- Geoffroy, T. (2019). Valorisation de l'écorce d'érable rouge et d'érable à sucre : optimisation de la production d'extraits à l'eau chaude et caractérisation de leur

potentiel antioxydant.

- Gierlinger, N., Jacques, D., Grabner, M., Wimmer, R., Schwanninger, M., Rozenberg, P., and Pâques, L. E. (2004). Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. *Trees-Structure and Function*, 18(1), 102–108.
- Goldblum, D., and Rigg, L. S. (2010). The deciduous forest–boreal forest ecotone. *Geography Compass*, 4(7), 701-717.
- Good, H. M., Murray, P. M., and Dale, H. M. (2011). Studies on heartwood formation and staining in sugar maple, *acer saccharum marsh*. 33(1), 31–41.
- Grabner, M., Wimmer, R., Gierlinger, N., Evans, R., and Downes, G. (2005). Heartwood extractives in larch and effects on X-ray densitometry. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2781-2786.
- Green David, W. (1999). Mechanical properties of wood. In: *Wood handbook: wood as an engineering material*. Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA, 463p.
- Green III, F., and Highley, T. L. (1997). Mechanism of brown-rot decay: paradigm or paradox. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 39(2-3), 113-124.
- Gullichsen, J., Paulapuro, H., and Lehtinen, E. (2000). Pigment coating and surface sizing of paper, 11, 2–62.
- Hart, J. H. (1963). Development of wound heartwood in iowa hardwoods. *Phytopathol.* 63, 877.
- Havreljuk, F., Achim, A., and Pothier, D. (2013). Regional variation in the proportion of red heartwood in sugar maple and yellow birch. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(3), 278-287.
- Hein, P. R. G., Pakkanen, H. K., and Dos Santos, A. A. (2017). Challenges in the use of near infrared spectroscopy for improving wood quality: A review. *Forest Systems*, 26(3), 1-10.

- Hillis, W. E. (1968). Chemical aspects of heartwood formation. *Wood Science and Technology*, 2, 241–259.
- Hoffmeyer, P., and Pedersen, J. G. (1995). Evaluation of density and strength of Norway spruce wood by near infrared reflectance spectroscopy. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 53(3), 165–170.
- Houston, D. R., Allen, D. C., and Lachance, D. (1990). Aménagement de l'érablière : guide de protection de la santé des arbres. Rapport NE-129. Québec, 92, 59.
- Huang, H., Yu, H., Xu, H., and Ying, Y. (2008). Near infrared spectroscopy for on/in-line monitoring of quality in foods and beverages: A review. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 303–313.
- International Association of Wood Anatomists (1964). Committee on nomenclature multilingual glossary of terms used in wood anatomy. Verlagsanstalt Buchdruckerei Konkordia Winterthur. 10, 219–332.
- Isenberg, I.H. (1981). Pulpwoods of the United States and Canada. The Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin. 2(3), 122–124
- Jerrold E., W., Carol A., C., and Simon F., C. (2000). Predicting the effects of decay on wood properties and modeling residual service-life. 2nd annual conference on durability and disaster mitigation in wood-frame housing., pp. 261–263.
- Jessome, A. . (1977). Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada. Rapport Technique de Foresterie 21. Laboratoire Des Produits Forestiers de l'Est, 37p.
- Jozsa, L. A., and Middleton, G. R. (1994). A discussion of wood quality attributes and their practical implications. Canada, British Columbia, 42p.
- Kamei, I. (2020). Wood-rotting fungi for biofuel production. In *fungi in fuel biotechnology*. Springer, Cham., pp. 123–147.
- Karlinasari, L., Sabed, M., Wistara, I. N. J., and Purwanto, Y. A. (2014). Near infrared

- (NIR) spectroscopy for estimating the chemical composition of (*Acacia mangium* Willd.) wood. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 11, 162-167.
- Kenefic, L. S., and Nyland, R. D. (1999). Sugar maple height-diameter and age-diameter relationships in an uneven-aged northern hardwood stand. *Northern Journal of Applied Forestry*, 16(1), 43-47.
- Kimura, K., Kikuchi, S., and Yamasaki, S. I. (1999). Accurate root length measurement by image analysis. *Plant and Soil*, 216, 117-127.
- Kline, M. (2001). *A guide to useful woods of the world*. Forest Products Society, 618p.
- Koubaa, A., Tony Zhang, S. Y., and Makni, S. (2002). Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of Forest Science*, 59(5-6), 511-518.
- Li-Chan, E., Chalmers, J.M., Griffiths, P., (2010). *Applications of vibrational spectroscopy in food science*. John Wiley and Sons, Ltd, West Sussex, UK.
- 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.
- Martínez, Á. T., Speranza, M., Ruiz-Dueñas, F. J., Ferreira, P., Camarero, S., Guillén, F., Martínez, M. J., Gutiérrez, A., and Del Río, J. C. (2005). Biodegradation of lignocellulosics: Microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International Microbiology*, 8(3), 195-204.
- Migeon, M. (2013). *Etablissement de modèles de prédiction en spectrométrie proche infrarouge pour l'étude de la composition lignocellulosique du bois de peuplier noir*. (Doctoral dissertation, France. Institut Universitaire de Technologie de Tours (IUT de Tours), FRA).
- Mohamed, H. (2018). *Modeling and characterization of the thermo-mechanical behavior of natural fiber composites*.
- Monger, R., (1991). *Classification des tiges d'essences feuillues: normes techniques*.

- Gouvernement du Québec, Direction des inventaires forestiers, Québec, RN95-3017, 73p.
- Moungoungui, W. S. (2008). Caractérisation HPLC de marqueurs permettant de prévoir l'évolution de certaines propriétés macroscopiques du bois lors de différents processus de dégradation (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1), 33p.
- Moura, L. F. (2006). Étude de trois procédés de finition des surfaces du bois d'érable à sucre pour fins de vernissage, doctoral thesis, Laval University, Quebec, Canada, 177p.
- Ohman, J. H. (1968). Decay and discoloration of sugar maple. US Government Printing Office, 110p.
- Oliveira, L. S., Santana, A. L. B. D., Maranhão, C. A., de Miranda, R. D. C. M., Galvão de Lima, V. L. A., da Silva, S. I., Nascimento, M. S., and Bieber, L. (2010). Natural resistance of five woods to *Phanerochaete chrysosporium* degradation. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 64(8), 711–715.
- Panshin, A. 1., and De Zeeuw, C. (1980). Textbook of wood technology. McGrawHill Book Co, 772 p.
- Panshin, A. J., and Zeeuw, C. D. (1970). Structure, identification, uses, and properties of the commercial woods of the United States and Canada. In *Textbook of wood technology*, 1, 722-723
- Pasquini, C. (2003). Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 14(2), 198–219.
- Payette, S., and Rochefort, L. (2001). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses Université Laval. Québec, Canada., 621p.
- Pliura, A., Zhang, S. Y., MacKay, J., and Bousquet, J. (2007). Genotypic variation in wood density and growth traits of poplar hybrids at four clonal trials. *Forest Ecology and Management*, 238(1–3), 92–106.

- Poke, F. S., Wright, J. K., and Raymond, C. A. (2004). Predicting extractives and lignin contents in *Eucalyptus globulus* using near infrared reflectance analysis. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 24(1), 55–67.
- Pothier, D., Fortin, M., Auty, D., Delisle-Boulianne, S., Gagné, L. V., and Achim, A. (2013). Improving tree selection for partial cutting through joint probability modelling of tree vigor and quality. *Canadian journal of forest research*, 43(3), 288-298.
- Raymond, C. A., and Schimleck, L. R. (2002). Development of near infrared reflectance analysis calibrations for estimating genetic parameters for cellulose content in *Eucalyptus globulus*. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(1), 170-176.
- Ross, R. J. (2010). *Wood handbook: wood as an engineering material*. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR, 190(1), 509.
- Sandak, A., Sandak, J., Waliszewska, B., Zborowska, M., and Mleczek, M. (2017). Selection of optimal conversion path for willow biomass assisted by near infrared spectroscopy. *IForest*, 10(2), 506–514.
- Saucier, J. P., Gosselin, J., Morneau, C., and Grondin, P. (2010). Utilisation de la classification de la végétation dans l'aménagement forestier au Québec. *Revue forestière française*, 62(3-4), 428-438.
- Schultz, T. P., and Nicholas, D. D. (2000). Naturally durable heartwood: Evidence for a proposed dual defensive function of the extractives. *Phytochemistry*, 54(1), 47–52.
- Schwarze, F. W., Engels, J., and Mattheck, C. (2000). *Fungal strategies of wood decay in trees*. Springer, Berlin, 434p.
- Schwarze, F. W. M. R. (2007). Wood decay under the microscope. *Fungal Biology Reviews*, 21(4), 133–170.
- Seppälä, P. (2015). Comparison of near-infrared spectroscopy models utilized to predict lignocellulosic constituents in wood samples., pp. 42-54.

- Shenk, J. S., Workman, J. J., and Westerhaus, M. O. (2001). Application of NIR spectroscopy to agricultural products. *Practical Spectroscopy Series*, 27, 419–474.
- Shigo, A. L. (1967). Successions of organisms in discoloration and decay of wood, 2, 237–299.
- Shigo, A. L., and Marx, H. G. (1977). *Compartmentalization of decay in trees*. [CODIT] USDA, 405p.
- Shigo, A. L. (1979). *Tree decay: an expanded concept*. Department of Agriculture, Forest Service, 419p.
- Shigo, A. L. (1984). Compartmentalization: a conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. *Annual Review of Phytopathology*, 22: 189-214.
- Silva, C. A., Beatriz Bacellar Monteiro, M., Brazolin, S., Antonio Carballeira Lopez, G., Richter, A., and Braga, M. R. (2007). Biodeterioration of brazilwood *Caesalpinia echinata* (*Leguminosae-Caesalpinioideae*) by rot fungi and termites. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 60(4), 285–292.
- Sjostrom, E. (1993). *Wood chemistry: fundamentals and applications*. Gulf professional publishing. pp. 1-20.
- Skvaril, J., Kyprianidis, K. G., and Dahlquist, E. (2017). Applications of near-infrared spectroscopy (NIRS) in biomass energy conversion processes: A review. *Applied Spectroscopy Reviews*, 52(8), 675–728.
- Stevanovic, T., Perrin, D., (2009). *Les extractibles du bois (Wood extractives)*. *Chimie Du Bois (Wood Chemistry)*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse., pp. 209–212.
- Su, P. (2012). Sorption of metal ions to wood, pulp and bark materials. Lab. of analytical chemistry, Process chemistry centre, Dep. of chemical engineering, Abo akad. univ.
- Syafii, W., and Yoshimoto, T. (1991). Effect of lignin structure on decay resistance of

- some tropical woods. *Indonesian Journal of Tropical Agriculture*, 3(1), 32–37.
- Sykes, R., Li, B., Hodge, G., Goldfarb, B., Kadla, J., and Chang, H. M. (2005). Prediction of loblolly pine wood properties using transmittance near-infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(10), 2423-2431.
- Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI) (1989). Preparation of wood for chemical analysis (T264 om-88). In *TAPPI Test Method*; TAPPI Press: Atlanta, GA, USA; Volume 1.
- Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI) (1989). Acid insoluble lignin in wood and pulp (T-222 OM-88). In *TAPPI Test Method*; TAPPI Press: Atlanta, GA, USA; Volume 1.
- Thygesen, L. G. (1994). Determination of dry matter content and basic density of Norway spruce by near infrared reflectance and transmittance spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2(3), 127–135.
- Tsuchikawa, S. (2007). A review of recent near infrared research for wood and paper. *Applied Spectroscopy Reviews*, 42(1), 43–71.
- Tsuchikawa, Satoru, and Kobori, H. (2015a). A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science*, 61(3), 213–220.
- Tsuchikawa, Satoru, and Schwanninger, M. (2013). A review of recent near-infrared research for wood and paper (Part 2). *Applied Spectroscopy Reviews*, 48(7), 560–587.
- Turner, N. J., Ari, Y., Berkes, F., Davidson-Hunt, I., Ertug, Z. F., and Miller, A. (2009). Cultural management of living trees: an international perspective. *Journal of Ethnobiology*, 29(2), 237-270.
- Vek, V., Oven, P., and Humar, M. (2013). Phenolic extractives of wound-associated wood of beech and their fungicidal effect. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 77, 91–97.

- Ward, A., Nielsen, A. and Møller, H. (2011). Rapid assessment of mineral concentration in meadow grasses sensors by near infrared reflectance spectroscopy. *Sensors* (11) 4830-4839.
- White, J. H. (1968). *The forest trees of Ontario and the more commonly planted foreign trees: a guide to their identification with illustrations*, 4th ed. Toronto, Ontario.
- Wiedenhoeft, A. C., and Miller, R. B. (2005). Structure and function of wood. *Handbook of wood chemistry and wood composites.*, pp. 9-33.
- Willför, S., Hemming, J., Reunanen, M., and Holmbom, B. (2003). Phenolic and lipophilic extractives in Scots pine knots and stemwood., pp. 359–372.
- Workman Jr, J., Weyer, L (2007). Introduction to near-infrared spectra. In: *Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared spectroscopy*. CRC Press. USA. 326, 1–17.
- Xin T., Guo Z.-H., et Li D.-Z. (2002) Phylogeny of *Aceraceae* based on ITS and trnL-F data sets, *Acta Botanica Sinica*, 44 (6), 714–724
- Yan, H., Xu, Y. C., Siesler, H. W., Han, B. X., and Zhang, G. Z. (2019). Hand-held near-infrared spectroscopy for authentication of fengdous and quantitative analysis of mulberry fruits. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1548.
- Yanai, R. D., Germain, R. H., Anderson, N. M., Coates, T. A., and Mishler, A. K. (2009). Heart size of sugar maple sawlogs across six northern states. *Journal of Forestry*, 107(2), 95–100.
- Yeh, T. F., Chang, H. M., and Kadla, J. F. (2004). Rapid prediction of solid wood lignin content using transmittance near-infrared spectroscopy. *Journal of Agricultural and food chemistry*, 52(6), 1435-1439.
- Zhang, S. Y. (1997). Wood quality: its definition, impact, and implications for value-added timber management and end uses. In *proceedings of the CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop, Quebec City. Part I*. 17–39.

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques des 18 arbres échantillons d'érable à sucre

Site	Arbre	DHP	Age	Proportion aubier (%)	Proportion duramen (%)	Proportion carie (%)
1	12R/100	245	60	92,67	7,33	0
1	10R/14	345	96	80,90	19,09	0
1	12R/12	463	183	48,34	48,80	2,85
1	12R/2	322	138	63,16	28,86	7,98
1	10R/9	422	NS	70,06	29,94	0
1	12R/3	282	90	53,22	5,46	41,32
1	12R/4	312	153	70,71	29,29	0
1	10R/2	504	175	55,05	26,40	18,56
1	10R/18	345	77	90,80	9,20	0
2	11R/102	236	74	76,26	23,74	0
2	11R/10	362	133	36,58	0	63,42
2	11R/101	429	138	56,41	34,28	9,32
2	11R/100	421	142	76,33	23,67	0
2	11R/17	360	89	78,78	21,20	0
2	11R/15	326	144	56,77	38,89	4,34
2	11R/21	354	130	59,00	11,06	29,93
2	11R/5	282	66	79,33	20,67	0
2	11R/4	239	77	77,85	22,15	0

Annexe 2 : Composition chimique des échantillons du bois d'érable à sucre étudiés (en %). Max σ indique l'écart type maximal des résultats dans un essai donné

Arbre	Extractibles			Lignine			Cellulose			Hémicellulose		
	Aubier	Duramen	Carie	Aubier	Duramen	Carie	Aubier	Duramen	Carie	Aubier	Duramen	Carie
Min	2,56	3,28	0	19	17,5	0	34,5	41,35	0	21,7	22,65	0
Max	5,6	8,5	9,34	34,5	29	28,5	53,25	54,75	52,5	46,5	38,6	40,65
Moyenne	4,09	5,27	6,175	25,86	22,44	20,25	44,95	47,48	47,5	29,18	30,075	32,25
Max σ	$\pm 0,92$	$\pm 1,25$	$\pm 2,03$	$\pm 4,37$	$\pm 3,51$	$\pm 5,08$	$\pm 5,29$	3,57	3,92	6,64	4,44	6,86