



# 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.



Étude des variations des propriétés physiques et  
chimiques du bois du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.)

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR  
SOFIEN ELLEUCH

JUIN 2024

## Remerciements

La présente étude a été réalisée au laboratoire de Biomatériaux et Génétique et Physiologie de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers mon directeur de recherche, Monsieur Mebarek Lamara, pour son soutien, ses encouragements et sa précieuse aide.

J'exprime mes remerciements à mes co-directrices, Madame Annie DesRochers et Madame Souhir Zghal pour leurs efforts et leur apport durant la réalisation de mon projet.

Je tiens également à remercier mon co-directeur Monsieur Ahmed Koubaa de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et de mettre à ma disposition les équipements et les moyens techniques nécessaires pour mes analyses.

Un merci spécial à :

Mes collègues Melek Ben Halima, Bilel Bouaziz et Youssef Ben Slim pour leur aide dans les travaux du terrain et du laboratoire.

MITACS et notre organisme partenaire *MRC Abitibi* pour le soutien financier.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur encouragement et motivation durant mes études.

## RÉSUMÉ

Le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) fait partie des espèces les plus dominantes de la forêt méditerranéenne et il est connu pour sa croissance rapide et sa capacité d'adaptation à divers sites écologiques. Dans le cadre de ce projet, 19 familles de pin sylvestre et une famille de pin gris plantées sur deux sites en 2007 dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue ont été échantillonnées pour étudier les variations des propriétés du bois. Un échantillonnage non destructif a été réalisé sur les arbres sous forme de carottes de 5 mm de diamètre prélevées à hauteur de poitrine (HP =1,30 m) pour un total de 600 carottes afin d'étudier des attributs de la qualité du bois et d'estimer les paramètres génétiques (héritabilité, corrélations génétiques et phénotypiques) de ces attributs. Un échantillonnage destructif a été réalisé sur 14 arbres sous forme de rondelles pour déterminer les propriétés chimiques du bois (cellulose, hémicellulose, lignine et extractibles) par les méthodes conventionnelles et la spectroscopie infrarouge proche. La variation de la densité et la largeur des cernes dans les deux types de bois (initial et final) ont été mesurées de la moelle à l'écorce par la densitométrie à rayon X. La densité moyenne des cernes pour les deux sites était de 461 kg/m<sup>3</sup>. L'âge cambial a eu un effet significatif sur toutes les propriétés du bois à l'exception de la largeur du bois final. Les estimations de l'héritabilité pour la croissance ont indiqué que la largeur du cerne était sous contrôle génétique modéré ( $h^2 = 0,46$ ). Les teneurs en cellulose, hémicellulose, lignine et extractibles par la méthode conventionnelle était 48%, 24%, 27% et 12%, respectivement. Les résultats de cette étude permettront d'acquérir des connaissances sur la qualité du bois du pin sylvestre et permettent d'envisager des stratégies d'amélioration génétique pour une meilleure valorisation de cette espèce.

**Mots clés :** Pin sylvestre, qualité du bois, densité, largeur des cernes, génétique quantitative, propriétés chimiques.

## Abstract

The Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is one of the most dominant species in the Mediterranean region, known for its rapid growth and adaptability to various ecological sites. In the context of this project, 19 families of Scots pine and one family of Jack pine planted at two sites in 2007 in the Abitibi-Temiscamingue region were sampled to study variations in wood properties. Non-destructive sampling was conducted on trees in the form of 5 mm diameter cores taken at breast height (BH = 1.30 m), totalling 600 cores to study wood quality properties and to estimate genetic parameters (heritability, genetic, and phenotypic correlations) of these traits. Destructive sampling was carried out on 14 trees in the form of discs to determine wood chemical properties (cellulose, hemicellulose, lignin, and extractive) through conventional methods and near-infrared spectroscopy. The variation in density and ring width in both types of wood (earlywood and latewood) was measured from pith to bark using X-ray densitometry. The average ring density was 461 kg/m<sup>3</sup>. Cambial age had a significant effect on all wood properties except for the final wood width. Heritability estimates for growth indicated that ring width is under moderate genetic control ( $h^2 = 0.46$ ). The concentrations of cellulose, hemicellulose, lignin, and extractive by conventional methods were 48%, 24%, 27%, and 12%, respectively. The results of this study will contribute to understanding the wood quality of Scots pine and will inform strategies for genetic improvement to enhance utilization of this species.

**Keywords:** Scots pine, wood quality, density, ring width, quantitative genetics, chemical properties.

## TABLE DES MATIÈRES

Remerciements .....	i
RÉSUMÉ .....	ii
Abstract .....	
TABLE DES MATIÈRES .....	i
LISTE DES FIGURES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES.....	ix
Introduction générale .....	1
CHAPITE I : Revue de la littérature .....	3
1.1    Introduction.....	3
1.2    Le pin sylvestre .....	3
1.2.1    Origine et répartition géographique du pin sylvestre.....	4
1.2.2    Description botanique .....	4
1.2.3    Importance économique .....	4
1.3    Qualité du bois : Propriétés et variation.....	5
1.3.1    Propriétés physiques .....	5
1.3.2    Composition chimique .....	13
1.3.3    Propriétés mécaniques.....	16
1.4    Paramètres de génétique quantitative.....	18
1.4.1    Héritabilité.....	18
1.4.2    Corrélation génétique et phénotypique .....	20
1.5    Objectifs et hypothèses .....	22

CHAPITRE II : Matériel et méthodes.....	24
2.1 Matériel .....	24
2.1.1 Localisation et description des sites.....	24
2.1.2 Échantillonnage.....	25
2.2 Méthodologie .....	26
2.2.1 Caractérisation des propriétés physiques .....	26
2.2.2 Caractérisation des propriétés chimiques.....	29
2.2.3 Analyses statistiques .....	34
CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	37
3.1 Densité et largeur moyenne des cernes .....	37
3.1.1 Pin sylvestre .....	38
3.1.2 Pin gris .....	38
3.2 Effet de site sur les propriétés du pin sylvestre et du pin gris.....	39
3.3 Variations radiales de la densité et de la largeur des cernes du bois du pin sylvestre.....	42
3.3.1 Variation radiale de la densité.....	42
3.3.2 Variation radiale de la croissance annuelle .....	44
3.4 Analyse de génétique quantitative .....	49
3.4.1 Corrélations phénotypiques entre les propriétés du bois.....	49
3.4.2 Corrélations génétiques entre les propriétés du bois.....	51
3.4.3 Valeurs de l'héritabilité.....	52
3.5 Caractérisations des propriétés chimiques .....	55
3.5.1 Méthodes conventionnelles.....	55

3.5.2	Spectroscopie par l'infrarouge proche (NIRS) .....	58
3.5.3	Corrélations des résultats chimiques avec les spectres infrarouges	60
3.5.4	Construction des modèles de calibration.....	60
3.5.5	Application des modèles de calibration sur les carottes.....	62
Conclusion et implications pratiques .....		65
4.1	Conclusions .....	65
4.2	Implications pratiques .....	66
Références bibliographiques .....		67
Annexes.....		76

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> Répartition géographique naturelle du genre <i>Pinus</i> dans le monde (d'après Farjon et Filer, 2013).....	3
<b>Figure 1.2</b> Représentation schématique des plans de référence du bois en fonction de ses directions (Trouy, 2015).....	6
<b>Figure 1.3</b> Types de variation radial de la densité moyenne du bois (Adapté de Jozsa et Middleton 1994).....	9
<b>Figure 1.4</b> Représentation de la variation de la densité du bois du pin gris avec l'âge cambial (Ferrer, 2019).....	10
<b>Figure 1.5</b> Densité du bois final en fonction de l'âge à partir de la moelle. Le point de transition entre le bois juvénile et le bois mature est présenté par ligne verticale (Tirée de Mutz et al., 2004). .....	11
<b>Figure 1.6</b> Densités moyennes pour le bois initial (DBI) et le bois final (DBF), et du cerne (DC) pour le pin sylvestre (Fries et Ericsson, 2009). .....	12
<b>Figure 1.7</b> Largeur des cernes annuels de croissance du bois initial (LBI) et du bois final (LBF) pour le pin sylvestre (Fries et Ericsson, 2009).....	12
<b>Figure 1.8</b> Structure macromoléculaire de la cellulose (Sjostrom, 1993).....	15
<b>Figure 1.9</b> Structure générale de la lignine (Mounguengui, 2008). .....	16
<b>Figure 2.1</b> Localisation des deux sites de l'étude. ....	24
<b>Figure 2.2</b> Les deux types d'échantillonnage réalisés dans le cadre de cette étude. (A) une carotte de sondage et (B) une rondelle de bois.....	26
<b>Figure 2.3</b> Scieuse à disque. ....	27
<b>Figure 2.4</b> Montage d'extraction Soxhlet pour les carottes. ....	27
<b>Figure 2.5</b> Mesure de la teneur en humidité.....	28

<b>Figure 2.6</b> Densitomètre QTRS-OJX Tree Analyser de Quintek Measurement System, Inc.....	29
<b>Figure 2.7</b> Exemple d'un profil de densité d'un échantillon scanné par le densitomètre. ....	29
<b>Figure 2.8</b> Étapes de la préparation des échantillons : a) Séchage des échantillons dans un four à 50 °C, b) Broyeur à couteaux <i>Retsch</i> .....	30
<b>Figure 2.9</b> Montage d'extraction Soxhlet pour la poudre du bois.....	31
<b>Figure 2.10</b> Spectroscopie infrarouge proche NIRS (SHIMADZU, <i>IR tracer 100 avec ATR Quest</i> ). ....	33
<b>Figure 2.11</b> Exemple d'un spectre infrarouge.....	33
<b>Figure 3.1</b> Densité moyenne pour les familles du pin sylvestre et la famille du pin gris dans les deux sites d'étude. ....	41
<b>Figure 3.2</b> Croissance moyenne au HP pour les familles du pin sylvestre et la famille du pin gris dans les deux sites d'étude. ....	41
<b>Figure 3.3</b> Profils de variation radiale avec l'écart type de : a) la densité annuelle des cernes, b) la densité du bois initial, c) la densité du bois final, et d) la densité de transition en fonction de l'âge cambial pour le bois du pin sylvestre.....	43
<b>Figure 3.4</b> Profils de variation radiale avec l'écart type pour a) la largeur annuelle des cernes, b) la largeur du bois initial, c) la largeur du bois final et d) la proportion de bois final en fonction de l'âge cambial pour le bois du pin sylvestre.....	45
<b>Figure 3.5</b> Valeurs moyennes d'extractibles, lignine, cellulose et hémicellulose par la méthode conventionnelle. ....	57
<b>Figure 3.6</b> Spectres NIRS enregistrés pour les 14 échantillons analysés chimiquement après traitements statistiques (normalisation, smoothing). ....	58

<b>Figure 3.7</b> Bande d'absorbance pour le bois du pin sylvestre : A) Spectre infrarouge proche (ligne bleue) et spectre de la dérivée seconde (ligne rouge). B) un spectre infrarouge enregistré pour un échantillon. ....	59
<b>Figure 3.8</b> Modèles de calibration obtenus après traitement statistique des résultats de dosage des lignines (A), hémicellulose (B), la cellulose (C), et des extractibles (D) des 10 échantillons et de leurs spectres infrarouges. ....	61
<b>Figure 3.9</b> Valeurs moyennes réelles (méthode conventionnelle) et prédites (méthode par spectroscopie infrarouge proche) des teneurs de la composition chimique du bois du pin sylvestre. ....	63
<b>Figure A1:</b> Distribution des valeurs de la densité moyenne pour tous les échantillons. ....	76
<b>Figure A2 :</b> Distribution des valeurs de la largeur moyenne des cernes pour tous les échantillons. ....	76
<b>Figure A3:</b> Distribution des valeurs de la largeur du bois final pour tous les échantillons. ....	77
<b>Figure A4 :</b> Distribution des valeurs de la largeur du bois initial pour tous les échantillons. ....	77

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1</b> Valeurs moyennes des coefficients de retrait pour le bois du pin sylvestre (Mazet et al., 1990). .....	6
<b>Tableau 1.2</b> Valeurs de la densité moyenne pour différentes espèces de l'Est du Canada et pour le pin sylvestre étudié dans le nord de la Suède.....	8
<b>Tableau 1.3</b> Proportions des composants du bois chez les résineux (Gullichsen et al., 2000). .....	14
<b>Tableau 1.4</b> Composition chimique du bois du pin sylvestre (Benyoucef et al., 2015) et certains résineux de l'Est du Canada (Zhang et Koubaa, 2009). .....	15
<b>Tableau 1.5</b> Caractéristiques mécaniques du bois de pin sylvestre et des résineux de l'Est du Canada (Mazet et al., 1990 ; Zhang et Koubaa, 2009). .....	17
<b>Tableau 1.6</b> Valeurs d'héritabilité au sens large du bois du pin sylvestre. ....	19
<b>Tableau 1.7</b> Valeurs d'héritabilité au sens étroit pour la densité et la croissance du bois dans différentes espèces. ....	20
<b>Tableau 1.8</b> Valeurs des corrélations génétiques (au-dessus de la diagonale) et phénotypiques (au-dessous de la diagonale) du bois du pin sylvestre (Fries et Ericsson, 2006). .....	22
<b>Tableau 2.1</b> Localisation et caractéristiques climatiques des sites d'étude. ( <a href="https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/">https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/</a> ) .....	25
<b>Tableau 3.1</b> Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses, en %) de la densité et de la largeur des cernes dans les deux sites pour les 19 familles du pin sylvestre et une famille de pin gris.....	37
<b>Tableau 3.2</b> Résultats de l'analyse de variance des effets fixes, des effets aléatoires et des interactions sur la largeur et la densité du cerne dans le bois initial et final. ....	47

<b>Tableau 3.3</b> Coefficients de corrélation phénotypique (erreurs standard entre parenthèses) entre les différents caractères (en dessus de la diagonale), coefficients de corrélation génétique (erreurs standard entre parenthèses) entre les différents caractères (en dessous de la diagonale), valeurs d'héritabilité au sens étroit en diagonale (avec les erreurs standard entre parenthèses). .....	54
<b>Tableau 3.4</b> Valeurs de l'héritabilité au sens étroit pour les cernes 2, 3 et 7 avec l'erreur standard entre parenthèses.....	55
<b>Tableau 3.5</b> Variation de la composition chimique en extractible, cellulose, hémicellulose et lignine du bois du pin sylvestre.....	56
<b>Tableau 3.6</b> Attribution des bandes d'absorption représentatives. ....	60
<b>Tableau 3.7</b> Caractéristiques des modèles de calibration obtenues par spectroscopie infrarouge proche sur 10 échantillons de pin sylvestre. ....	61
<b>Tableau 3.8</b> Estimation des compositions chimiques des carottes par les modèles de calibration.....	63
<b>Tableau A1.</b> Information détaillée sur les échantillons dans les deux sites. ....	78
<b>Tableau A2.</b> Résultats de l'analyse de variance sur les propriétés chimiques. ....	79

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

<b>Abréviations</b>	<b>Caractères</b>
ANOVA	Analyse de variance
ATIPPT	Association technique de l'industrie de la pâte à papier, du papier et de la transformation.
CV	Coefficient de variation
DBF	Densité du bois final
DBI	Densité du bois initial
DC	Densité du cerne
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
ES	Erreur standard entre les valeurs estimées et les valeurs réelles conventionnelles.
LBF	Largeur du bois final
LBI	Largeur du bois initial
LC	Largeur du cerne
MOE	Module d'élasticité
NIRS	Spectroscopie par l'infrarouge proche
PBF	Proportion du bois final
PLS	Méthode de régression des moindres carrés partiels
RMSEC	Erreur quadratique moyenne de calibration

## Introduction générale

Le bois est un matériau écologique et renouvelable, offrant une ressource économique pour les pays producteurs de bois. Le Canada est un important exportateur de produits forestiers. Les exportations de bois d'œuvre, de pâte à papier et d'autres produits dérivés contribuent de manière significative aux revenus nationaux. Ces exportations sont souvent destinées à des marchés internationaux, renforçant ainsi la position économique du Canada sur la scène mondiale (Katila et al., 2010). De plus, l'industrie forestière canadienne génère un nombre important d'emplois à travers tout le pays avec plus de 177 000 employés dans ce secteur en 2021, selon les données de Ressources naturelles Canada (2024). Au Québec, les ressources forestières sont parmi les plus importants dans la balance commerciale de la province. Le bois est largement utilisé dans diverses applications comme la construction, les pâtes et papiers, les biocomposites et la production d'énergie (Durrant et al., 2016). L'utilisation du bois peut être déterminée en se basant sur ses propriétés et ses caractéristiques. En effet, chaque espèce possède des propriétés et des caractéristiques qui dépendent de plusieurs facteurs et conditions comme l'environnement et le patrimoine génétique.

Le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) est l'un des conifères les plus répandus de la forêt méditerranéenne, et il est classé comme la plus importante espèce en termes de qualité du bois recherchée par l'industrie du bois d'œuvre dans les pays européens (Ruotsalainen et Persson, 2013). Son bois est utilisé dans une large gamme d'applications grâce à sa bonne résistance par rapport à son poids. À l'échelle microscopique, le bois de cette espèce est très hétérogène (Fries et Ericsson, 2009). En effet, la structure cellulaire du bois initial et du bois final est très différente, ce qui affecte la densité du bois et influence sa qualité. Dans cette étude, plusieurs méthodes seront utilisées (densitomètre à rayon X et la spectroscopie proche infrarouge (NIRS)) pour déterminer les propriétés physiques (densité) et chimiques (cellulose, hémicellulose, lignine et extractibles) de 19

familles du pin sylvestre. Les programmes d'amélioration génétique des arbres forestiers profitent bien des résultats des études de la qualité du bois pour les intégrer comme critères de sélection. Au Canada, les informations disponibles sur les propriétés et les variations des caractéristiques du bois du pin sylvestre sont limitées, principalement en raison de son faible taux de culture. Dans ce contexte, l'évaluation de la croissance du pin sylvestre par rapport aux espèces locales revêt une importance particulière pour déterminer si le pin sylvestre pourrait être utilisé dans la gestion forestière. De plus, des recherches approfondies sur les variations génétiques et les adaptations du pin sylvestre pourraient ouvrir la voie à des programmes de sélection et d'amélioration génétique visant à développer des arbres plus performants et plus résilients. Cela pourrait contribuer à renforcer la durabilité et la diversité des forêts canadiennes tout en répondant aux défis environnementaux et économiques actuels.

L'importance d'étudier les corrélations génétiques sur de jeunes arbres, c'est que le bois juvénile sera probablement de plus en plus utilisé dans le futur. Donc, il est essentiel que des recherches soient conduites sur la variation génétique de ses propriétés ainsi que leur corrélation avec la croissance de l'arbre et leur impact sur les produits du bois.

L'objectif général de ce mémoire est d'étudier les différents caractères de la qualité du bois du pin sylvestre et de leurs variations. Plus précisément, nous allons évaluer la croissance, la densité des cernes et les caractéristiques chimiques de cette essence.

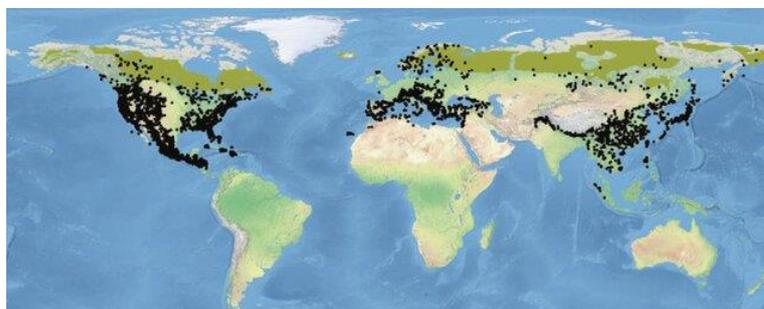
## CHAPITE I : Revue de la littérature

### 1.1 Introduction

Le bois est un matériau naturel, renouvelable et largement utilisé par l'humanité depuis plusieurs siècles dans divers domaines industriels et commerciaux. Il possède une gamme de caractéristiques précieuses comme la dureté et la durabilité qui le rendent adapté à de nombreuses applications, comme la construction, l'ameublement et la production d'énergie. Les arbres sont la principale source de bois, et il existe de nombreuses espèces d'arbres qui fournissent une variété de bois, chacune avec des caractéristiques distinctes en termes de couleur, de texture, de durabilité et de résistance.

### 1.2 Le pin sylvestre

Le pin (*Pinus*) est un arbre appartenant au genre des conifères, qui comprend plus de 100 espèces largement dispersées dans le monde (Figure 1.1) (Schreiner et al., 2018). Le pin sylvestre est l'une des plus importantes espèces des résineux appartenant au genre *Pinus*, de la famille des Pinacées et se caractérise par une gamme très large et la plus étendue de toutes les espèces du genre *Pinus* (Giertych, 2017).



**Figure 1.1** Répartition géographique naturelle du genre *Pinus* dans le monde (d'après Farjon et Filer, 2013).

### 1.2.1 Origine et répartition géographique du pin sylvestre

Le pin sylvestre est une espèce d'origine européenne, il est planté en Europe centrale depuis plusieurs années. Cette espèce a la plus grande répartition géographique parmi les espèces de pins et est l'un des conifères les plus répandus sur terre, distribuée de la Méditerranée à l'Arctique (Carlisle, 1968). En Amérique du Nord, elle est plantée principalement dans le sud du Canada et le nord des États-Unis (Giertych, 2017).

Au Québec, le pin sylvestre est une espèce nouvellement introduite. Les plus anciennes plantations pour cette espèce situées à Berthier, Grandes-Piles et Sainte Philomène près de Grand-Mère dans la vallée du Saint-Maurice d'origine géographique exacte inconnue (Beaudoin, 2004).

### 1.2.2 Description botanique

Le pin sylvestre est une espèce d'arbres de forme pyramidale en début de croissance et prend par la suite une forme arrondie large et irrégulière (Dumont, 2005). Les feuilles sont de couleur verte plus au moins bleutée, odorantes, sous forme des aiguilles mesurent entre 5 et 6 cm. Aussi, l'arbre a une longue durée de vie entre 100 et 200 ans, mais exceptionnellement il peut vivre jusqu'à 400 ans ou plus. Cet arbre peut atteindre une hauteur moyenne entre 23 et 27 mètres et une hauteur maximale de 40 m (Durrant et al., 2016).

### 1.2.3 Importance économique

Les forêts représentent une source importante de richesse pour le Canada et les pays producteurs du bois. Elles offrent une vaste gamme d'avantages économiques, sociaux et environnementaux.

Le pin sylvestre est classé parmi les espèces les plus importantes commercialement surtout dans les pays nordiques. Son bois est caractérisé par une résistance très importante par rapport à son poids, c'est pourquoi il est largement utilisé en

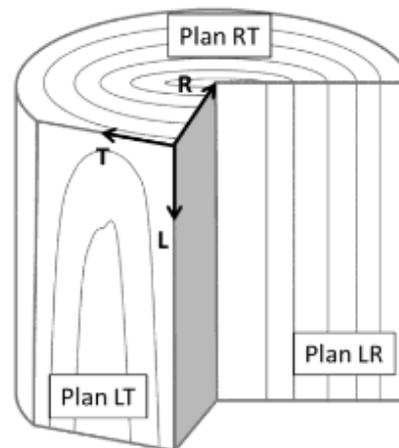
construction, aussi pour l'ameublement et dans le domaine de papeteries (Durrant, et al., 2016). En Suède, les forêts commerciales de pin sylvestre occupent 12 millions d'hectares de terres forestières productives (environ 50%), la valeur des exportations des produits forestiers en 2007 a totalisé 127 000 millions de SEK (environ 18 milliards de dollars US), le pin sylvestre représente environ 30 à 40% de ces chiffres. Aussi, plus de 100 000 personnes sont employées dans le secteur forestier (2,2% de tous les travailleurs) (Mullin et al., 2011).

### 1.3 Qualité du bois : Propriétés et variation

La « qualité du bois », une notion subjective, difficile à définir de manière précise. D'après Jozsa et Middleton (1994), la qualité du bois est définie par sa capacité à être utilisée dans un certain usage. C'est-à-dire que chaque propriété du bois contribue à sa qualité en fonction de l'usage auquel il pourrait être appliqué. Plusieurs facteurs et propriétés affectent la qualité du bois, qui sont généralement liés aux propriétés physiques, chimiques et mécaniques du bois (Bouslimi, 2014).

#### 1.3.1 Propriétés physiques

Le bois est un matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il est capable d'absorber ou d'adsorber l'eau ce qui lui donne un gonflement ou un retrait. Aussi, il est un matériau anisotrope, c'est-à-dire qu'il ne possède pas les mêmes propriétés physiques, mécaniques et diffusions de l'eau dans les trois directions (longitudinale, radiale et tangentielle) (Panshin et Zeuw, 1981).



**Figure 1.2** Représentation schématique des plans de référence du bois en fonction de ses directions (Trouy, 2015).

#### 1.3.1.1 Le retrait spécifique

Le retrait spécifique permet d'étudier le changement dimensionnel, soit radial ou tangentiel, du bois. Pour le pin sylvestre, Mazel et al. (1990) (Tableau 1.1). Ces valeurs montrent que la variation du coefficient de retrait radial est plus importante que la variation du coefficient de retrait tangentiel. Ces résultats sont essentiels pour comprendre le comportement physique du matériau et fournissent des informations précieuses pour orienter l'utilisation de ce bois dans divers contextes industriels.

**Tableau 1.1** Valeurs moyennes des coefficients de retrait pour le bois du pin sylvestre (Mazel et al., 1990).

Valeur de coefficients de retrait (%)	
<b>Radial</b>	24
<b>Tangentiel</b>	14
<b>Volumétrique</b>	14
<b>Anisotropie</b>	25

### 1.3.1.2 La densité

La densité du bois est une notion physique qui permet de comparer le poids de différents matériaux d'un même volume, c'est la propriété la plus recherchée dans l'industrie forestière. Elle est exprimée en kilogrammes par mètre cube ( $\text{kg/m}^3$ ) (Giroud et al., 2019).

La densité du bois ou la masse volumique est un critère important pour évaluer sa qualité. Un bois dense a tendance à être plus résistant aux insectes et à la pourriture, ce qui en fait un choix idéal pour des applications extérieures ou dans des environnements humides. Sauter et al. (1999) rapportent que le bois du pin sylvestre est dense avec une masse volumique de  $550 \text{ kg/m}^3$  à une teneur en humidité de 12%. Par exemple, la densité du bois du pin sylvestre a été mesurée sur 1400 carottes d'arbres de 30 ans dans le nord de la Suède et des valeurs comprises entre  $416 \text{ kg/m}^3$  et  $476 \text{ kg/m}^3$  ont été trouvées (Fries et Ericsson, 2006). Selon une autre étude réalisée sur 245 arbres en France, la densité du bois du pin sylvestre avait une valeur moyenne de l'ordre de  $557 \text{ kg/m}^3$  pour une teneur d'humidité de 12% (Joyet, (2001). La densité est un paramètre déterminant de la qualité du bois (Koubaa et al., 2002), elle est considérée parmi les propriétés les plus importantes du bois parce qu'elle est fortement reliée aux autres propriétés comme sa résistance mécanique et son rendement en fibres (Caceres Cuadros, 2016). Dans l'industrie de pâtes et papiers, le bois qui présente une faible densité combinée à des fibres longues donne des fibres pliables et faciles à lier qui présentent une faible porosité et une résistance élevée ce qui donne une meilleure qualité de papier. Cependant, dans le bois de construction et pour avoir des produits de haute qualité c'est mieux d'utiliser du bois avec une haute densité (Jozsa et Middleton, 1994). Il est intéressant de noter que la densité du bois peut varier d'une espèce à l'autre, ainsi que selon le type du bois (juvénile ou mature). Cette variation souligne l'importance de comprendre ces différences pour des meilleures valorisations et applications de ces essences. Le Tableau 1.2 présente différentes valeurs de la densité du bois pour certaines espèces de l'Est du Canada et pour le pin sylvestre étudié dans le nord de la Suède.

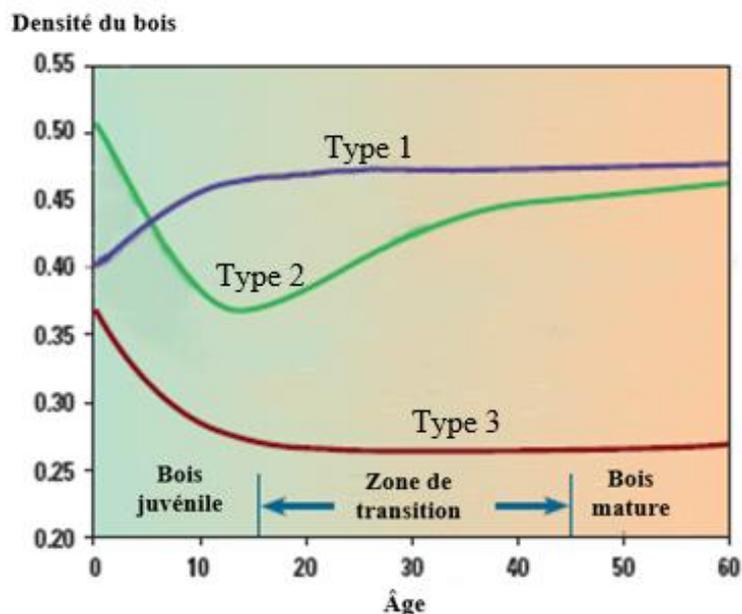
**Tableau 1.2** Valeurs de la densité moyenne pour différentes espèces de l'Est du Canada et pour le pin sylvestre étudié dans le nord de la Suède.

Espèces	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Références
Pin sylvestre <i>(Pinus sylvestris L.)</i>	476 (30 ans)	Fries et Ericsson (2006)
Pin gris <i>(Pinus banksiana)</i>	398 (bois juvénile) 447 (bois mature)	Koubaa et Zhang (2009)
Pin blanc <i>(Pinus strobus)</i>	368 (bois mature)	
Pin rouge <i>(Pinus resinosa)</i>	340 (bois juvénile) 450 (bois mature)	
Pin maritime <i>(Pinus pinaster)</i>	474 (17 ans)	Gaspar et al. (2008)

### 1.3.1.3 Variation de la densité

#### 1.3.1.3.1 Bois juvénile et bois mature

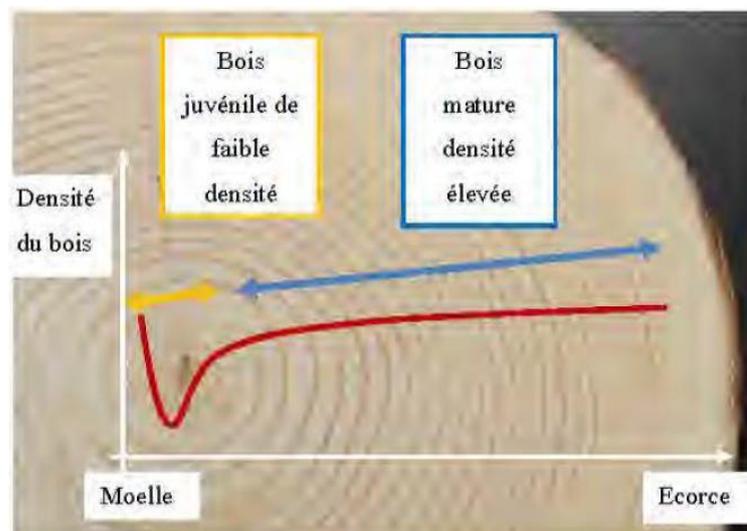
La variation radiale à l'intérieur de l'arbre permet de distinguer deux types de bois, le bois juvénile et le bois mature. Le bois juvénile est défini comme étant les cernes annuels les plus proches de la moelle alors que le bois mature est situé près de l'écorce (Hart, 2010). Les évolutions du processus de formation du bois induisent des changements au sein de l'arbre, se traduisant par des variations de ses propriétés physiques (la densité) et anatomiques. Panshin et Zeuw (1981) ont décrit trois types pour la variation de la densité moyenne de la moelle à l'écorce. Ces classifications visent principalement à décrire les profils et les schémas de variation observés chez différentes espèces d'arbres. La Figure 1.4 présente les caractéristiques des trois types de variation.



**Figure 1.3** Types de variation radial de la densité moyenne du bois (Adapté de Jozsa et Middleton 1994).

Le premier type se caractérise par une densité minimale près de la moelle, suivie d'une augmentation en allant vers l'écorce. Le deuxième type se caractérise par une diminution de la densité à partir de la moelle dans le bois juvénile, puis une augmentation vers l'écorce. Enfin, le troisième type se caractérise par une densité plus élevée au niveau de la moelle qu'au niveau de l'écorce. Ce profil présente une diminution pendant la phase juvénile et tend à se stabiliser dans le bois mature. La différence entre les profils de variation chez les arbres s'explique par les caractéristiques anatomiques du bois, qui diffèrent entre les espèces et leur environnement de croissance.

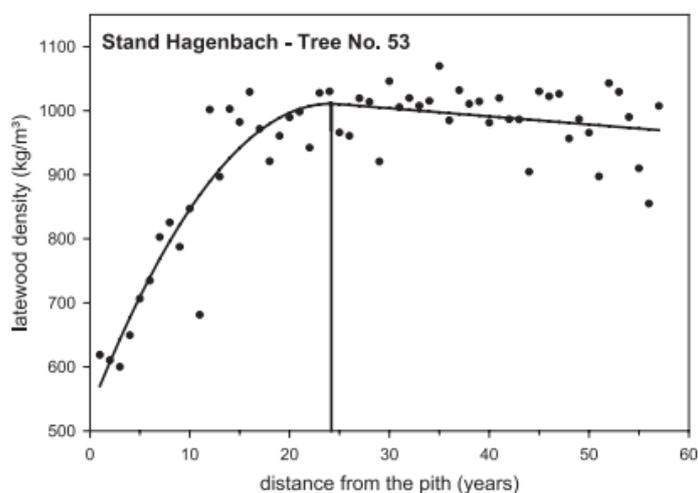
La Figure 1.5 présente la variation radiale de la densité moyenne du bois du pin gris en fonction de l'âge cambial. Les zones de bois juvénile et de bois mature sont délimitées respectivement par les doubles flèches jaunes et bleues. Ce profil de variation suit le deuxième type de variation décrit par Panshin et de Zeeuw (1981).



**Figure 1.4** Représentation de la variation de la densité du bois du pin gris avec l'âge cambial (Ferrer, 2019).

Chez les pins, le bois juvénile se caractérise par des trachéides plus courtes avec des parois minces et donc moins dense que le bois mature, de plus il possède des angles de microfibrilles élevés par rapport à l'axe long de la cellule) (Fries et Ericsson, 2009).

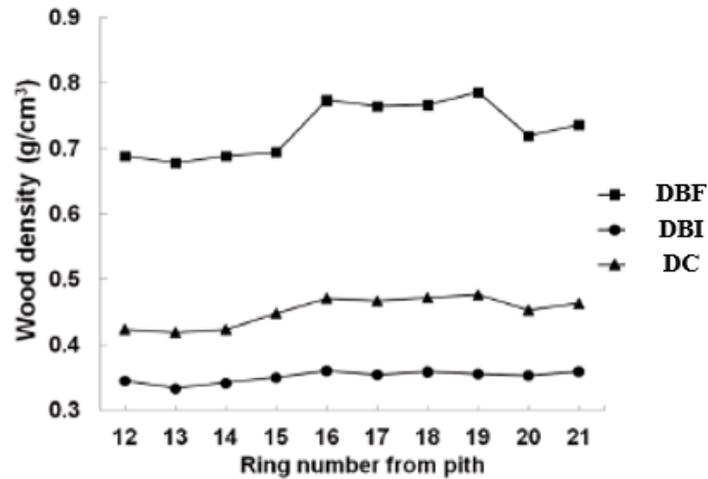
L'âge est l'une des sources les plus importantes de variation du bois entre les arbres et à l'intérieur des arbres, en particulier chez les conifères. Le bois juvénile est généralement de moins bonne qualité que le bois mature (Wang et Stewart, 2012), principalement en raison de sa densité plus faible, ce qui le rend moins résistant et moins durable. En raison des impacts des caractéristiques du bois juvénile sur les produits finis, il est nécessaire d'avoir une estimation précise de sa proportion. Par conséquent, le moment où se produit la transition entre le bois juvénile et le bois mature est une question centrale qui affecte la qualité du bois et la valeur du produit (Mutz et al., 2004). Le passage du bois juvénile au bois mature se produit généralement à environ 15 cernes annuels à partir de la moelle dans les pins et les l'épinette de Norvège (Burdon et al., 2004).



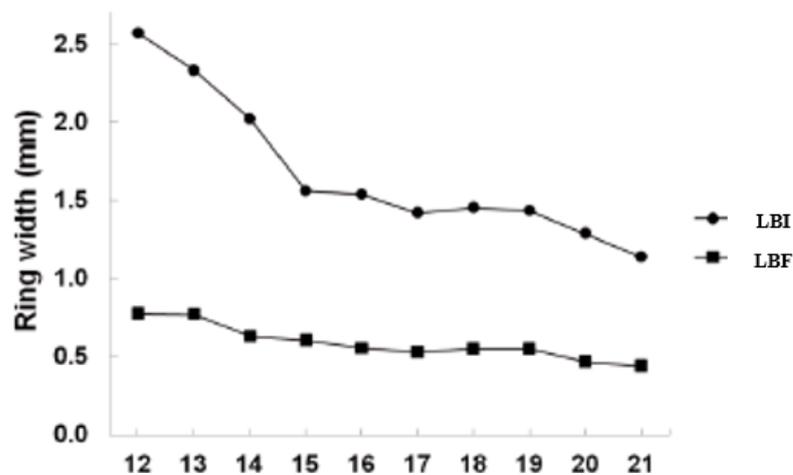
**Figure 1.5** Densité du bois final en fonction de l'âge à partir de la moelle. Le point de transition entre le bois juvénile et le bois mature est présenté par ligne verticale (Tirée de Mutz et al., 2004).

#### 1.3.1.3.2 Variation intra-arbre

La croissance est un paramètre étudié à l'intérieur de l'arbre au niveau du tronc. En effet, Zobel et Van Buijtenen (1989) ont défini trois types de variations pour la croissance, ces variations sont directement liées aux différentes propriétés qui sont utilisées pour la détermination de la qualité du bois comme la densité. La première est la variation intra-cerne, au niveau du bois initial et du bois final (Figure 1.6). La seconde est la variation radiale de la moelle vers l'écorce, et la troisième est la variation longitudinale, liée aux différentes hauteurs de l'arbre (Figure 1.7).



**Figure 1.6** Densités moyennes pour le bois initial (DBI) et le bois final (DBF), et du cerne (DC) pour le pin sylvestre (Fries et Ericsson, 2009).



**Figure 1.7** Largeur des cernes annuels de croissance du bois initial (LBI) et du bois final (LBF) pour le pin sylvestre (Fries et Ericsson, 2009).

L'étude de la variation intra-arbre nous permet d'obtenir diverses informations sur les caractéristiques du bois telles que sa croissance et sa densité pour chaque année. L'influence de la croissance sur la qualité du bois a fait l'objet d'un vif intérêt, et de nombreuses études ont examiné la corrélation entre le taux de croissance et la

densité du bois dans différentes espèces commerciales. Des corrélations négatives entre la densité et la largeur du cerne ont été trouvées avec des valeurs plus élevées pour le bois juvénile que pour le bois mature selon les résultats de l'étude de Park et al. (2009) sur le pin gris et l'étude de Jyske et al. (2008) sur l'épinette de Norvège. De plus, plusieurs chercheurs ont étudié la variation radiale de la densité et de la croissance chez les conifères. Par exemple, Koubaa et al. (2000) ont constaté que les cernes les plus larges présentaient une proportion plus élevée de bois initial, ce qui se traduit par une densité du cerne et du bois initial plus faible.

#### 1.3.1.4 Relations entre la densité du bois et la croissance de l'arbre

La relation entre la variation radiale de la densité et le taux de croissance, exprimée en termes de largeur et de nombre de cernes de croissance, joue un rôle important dans l'évaluation de la qualité du bois ainsi que dans la formulation de stratégies de sélection. Par conséquent, il est essentiel de prendre en considération la variation intra-arbre pour étudier ces relations. Il existe une forte relation entre le taux de croissance et la densité du bois. Cette relation a fait l'objet de nombreuses recherches. Par exemple, chez l'épinette noire, on a observé une corrélation négative entre la densité et la largeur des cernes dans le bois juvénile, tandis qu'une corrélation positive a été constatée entre la densité et la proportion de bois final (Koubaa et al., 2000). Dans le cas du pin sylvestre, Hannrup et al. (2000) ont rapporté des corrélations négatives entre la densité du bois et la croissance chez les arbres âgés de 8 à 11 ans. Cependant, il a été observé que le taux de croissance était positivement corrélé à la densité du bois, notamment en ce qui concerne les cernes de croissance plus larges, qui sont associés à des densités plus élevées du bois (Zobel et van Buijtenen, 1989), mais cette relation dépend toujours de l'espèce étudiée.

#### 1.3.2 Composition chimique

La composition chimique est l'une des principales caractéristiques qui déterminent la qualité du bois (Benyoucef et al., 2015). Le bois est composé principalement de quatre composants majeurs, communs à tous les matériaux bois : 1) la cellulose (35-

50%), 2) la lignine (18-25%), 3) les hémicelluloses (20-35%), et 4) les extractibles (0-10%) (Rowell, 2005). Ces proportions varient entre et au sein des espèces d'arbres et dépendent également de l'âge et de l'arbre, de l'emplacement géographique et des conditions du sol (Petterse, 1984). À l'intérieur de l'arbre, même au sein de sa structure interne, il se produit une variation des valeurs de la composition chimique entre le bois juvénile et le bois mature (Funda et al., 2020). Cette variation est due aux processus de croissance et de maturation de l'arbre au fil du temps. Le Tableau 1.3 présente les différentes proportions des composants du bois dans les deux types d'arbres (résineux et feuillus) (Gullichsen et al., 2000).

**Tableau 1.3** Proportions des composants du bois chez les résineux (Gullichsen et al., 2000).

<b>Composant</b>	<b>Bois résineux</b>
<b>Cellulose (%)</b>	41-46
<b>Hémicellulose (%)</b>	25-32
<b>Lignine (%)</b>	26-31
<b>Extractibles (%)</b>	1- 2,5

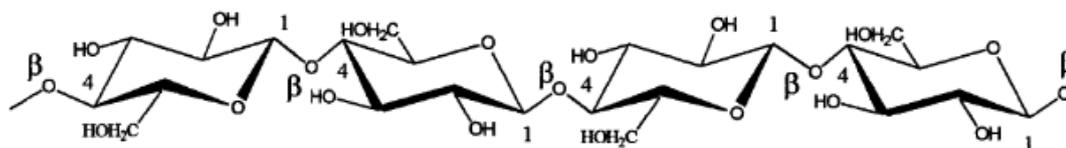
Selon l'étude de Sable et al. (2012), réalisée sur 93 échantillons sous forme de poudre de bois de pin sylvestre planté en Lettonie, des proportions de lignine, cellulose et d'hémicellulose ont été trouvées et variaient de 27,1%, 49% et 21% respectivement, et un pourcentage d'extractible de 2,9%. Le Tableau 1.4 regroupe les résultats de la composition chimique d'une autre étude menée par Benyoucef et al. (2015) sur la même essence originaire de Finlande, mais portant sur des sciures de bois selon la norme TAPPI "Technical Association of the Pulp and Paper Industry" (TAPPI, 1985, 1988a, 1988b, 1989), ainsi que les compositions chimiques de certaines espèces étudiées dans l'Est du Canada.

**Tableau 1.4** Composition chimique du bois du pin sylvestre (Benyoucef et al., 2015) et certains résineux de l'Est du Canada (Zhang et Koubaa, 2009).

Composant	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Extractibles	Cendres
<b>Pin sylvestre</b>	39,7 % (± 0,01)	26,9% (±0,03)	25,4% (± 0,01)	4,32%	4,92 %
<b>Pin gris</b>	45%	27%	28%	2,4%	0,2%
<b>Pin blanc</b>	48%	14%	27,5%	6	0,2%
<b>Pin rouge</b>	46%	15%	23,4% – 27,1%	3,5%	0,2%

### 1.3.2.1 Cellulose

La cellulose est la composante majeure dans le bois, elle est formée par une chaîne linéaire composée de plusieurs monomères de glucose liés entre elles par des liaisons  $\beta$ -1,4. L'interaction physico-chimique entre les groupes hydroxyles d'une ou plusieurs molécules de cellulose donne au bois sa rigidité (Sjostrom, 1993).



**Figure 1.8** Structure macromoléculaire de la cellulose (Sjostrom, 1993).

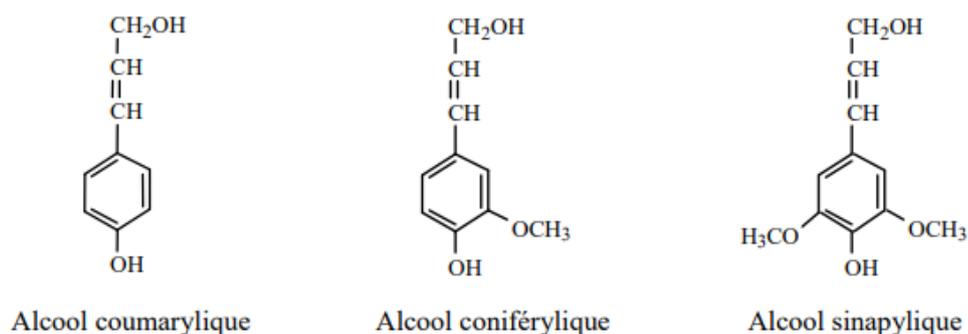
### 1.3.2.2 Hémicellulose

Les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides présents dans les parois cellulaires, ces chaînes présentent un degré de polymérisation plus faible par rapport à la cellulose avec une structure amorphe et ramifiée (Sjostrom, 1993). Les

hémicelluloses sont composées de différents sucres incluant des hexoses tels que le glucose, le galactose et le mannose, ainsi que des pentoses tels que le xylose et l'arabinose et des acides uroniques.

### 1.3.2.3 La lignine

La lignine est le polymère le plus complexe dans le bois, elle a une structure amorphe et différente de la cellulose et l'hémicellulose. C'est un polymère tridimensionnel synthétisé au niveau de la paroi cellulaire, résultant de la polymérisation oxydative de trois unités monomériques (Figure 1.9) : les alcools coumarylique, coniférylique et sinapylique.



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

### 1.3.2.4 Les extractibles

Les matières extractibles sont des composés de faible poids solubles dans l'eau et/ou les solvants organiques. Leur quantité varie d'une espèce à l'autre et de la partie de l'arbre échantillonnée. Ils sont présents dans les parties poreuses du bois et sont responsables de nombreuses propriétés du bois telles que sa durabilité, son odeur ou sa couleur (Mounguengui, 2008).

### 1.3.3 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont essentiellement des propriétés de résistance. Par exemple, la rigidité du bois fait référence à sa résistance à la déformation. En effet, plus le bois est rigide, moins il se déforme. Le module d'élasticité (MOE) est une

autre propriété et s'exprime en méga ou en gigapascals (MPa ou GPa) (Giroud et al., 2019). Selon l'étude de Joyet (2001) sur les propriétés mécaniques du bois, le pin sylvestre a un module d'élasticité de 12 GPa à 12% d'humidité et une contrainte de rupture moyenne (MOR) de l'ordre 44 MPa. Le Tableau 1.5 montre les valeurs des différentes propriétés mécaniques pour le pin sylvestre et certains résineux de l'Est du Canada.

**Tableau 1.5** Caractéristiques mécaniques du bois de pin sylvestre et des résineux de l'Est du Canada (Mazet et al., 1990 ; Zhang et Koubaa, 2009).

<b>Propriétés mécaniques du bois en [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pin gris</b>	<b>Pin blanc</b>	<b>Pin rouge</b>	<b>Pin sylvestre</b>
Module d'élasticité en flexion	13600	13200	13400	10800 -13000
Résistance à la compression	39 - 40,5	33,1 - 36,2	37,9 – 41,9	45-55
Résistance à la flexion	73,5	80,7	75,5	79 - 100
Résistance au cisaillement	8,23	6,1	7,5	7,2 -11,2
Références	Zhang et Koubaa (2009)			Mazet et al. (1990)

L'étude de la variation des propriétés du bois, qu'elles soient mécaniques, chimiques ou physiques, revêt une importance capitale dans le cadre des programmes de sélection et d'amélioration génétiques. En effet, comprendre ces variations permet d'acquérir des informations cruciales sur la structure, la qualité et les performances du bois, ce qui peut orienter les décisions relatives à la sélection des espèces et à leur amélioration génétique.

## 1.4 Paramètres de génétique quantitative

L'étude de la génétique quantitative du bois est basée sur deux notions : le phénotype, qui présente l'ensemble des caractéristiques qui peuvent être mesurées (caractère physique) et le génotype, qui présente les constitutions héréditaires. L'étude de la variabilité de ces deux concepts montre que les populations peuvent se comporter différemment. Ceci est lié à des influences environnementales différentes et à une interaction différente entre les génotypes d'arbres et l'environnement dans différents endroits. Pour bien maîtriser l'effet de cette variation, il est utile d'acquérir une bonne compréhension du contrôle environnemental et génétique du bois (Fundová, 2020 ; Huda et al., 2018).

### 1.4.1 Héritabilité

L'héritabilité est la proportion de la variation phénotypique dans une population qui est due aux effets des gènes. Elle est utilisée pour aider les chercheurs à déterminer des stratégies d'amélioration, et à prédire la réponse à la sélection (Huda et al., 2018). Il existe deux types d'héritabilité utilisés dans les programmes d'amélioration des arbres. La première est l'héritabilité au sens large ( $H^2$ ), définie comme le rapport entre la variation génétique totale d'une population et la variation phénotypique (Équation 1-1). La deuxième est l'héritabilité au sens strict ( $h^2$ ), définie comme le rapport entre la variance génétique additive et la variance phénotypique totale (Équation 1-2) (Hong et al., 2015).

$$H^2 = \frac{\sigma_G^2}{\sigma_P^2} \quad (1-1)$$

$$h^2 = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_P^2} \quad (1-2)$$

Où  $\sigma_A^2$  est la variance génétique additive,  $\sigma_P^2$  est la variance phénotypique et  $\sigma_G^2$  est la variance générale de la capacité de combinaison.

Chez le pin sylvestre, plusieurs études de génétique quantitative ont été réalisées. Le Tableau 1.6 présente les résultats de l'héritabilité au sens large pour certaines propriétés du bois du pin sylvestre.

**Tableau 1.6** Valeurs d'héritabilité au sens large du bois du pin sylvestre.

<b>Propriétés</b>	<b>Héritabilité</b>	<b>Références</b>
<b>Largeur des cernes</b>	0,2	Hong et al. (2015)
<b>Densité du bois</b>	0,4	Hong et al. (2015)
	0,333 ± 0,075	Fries et Ericsson (2006)
<b>Module d'élasticité</b>	0,3	Hong et al. (2015)
<b>Diamètre</b>	0,12 ± 0,038	Fries et Ericsson (2006)
<b>Hauteur</b>	0,304 ± 0,066	Fries et Ericsson (2006)

L'héritabilité des propriétés du bois a été déterminée et estimée pour plusieurs autres espèces. Le Tableau 1.7 présente des valeurs d'héritabilité des composantes de la densité et la croissance pour différentes essences de bois. On observe que les niveaux d'héritabilité des caractéristiques de densité et de la croissance des arbres peuvent varier en fonction de l'espèce et l'âge des arbres, en raison des différences dans les mécanismes génétiques et de l'interaction entre les facteurs génétiques et environnementaux.

**Tableau 1.7** Valeurs d'héritabilité au sens étroit pour la densité et la croissance du bois dans différentes espèces.

Espèces	Âge	Valeurs de l'héritabilité		Référence
		Densité	Croissance	
Épinette blanche ( <i>Picea glauca</i> )	15	0,32 (DC)	0,23 (LC)	Lenz et al. (2013)
		0,41 (DBI)	0,22 (LBI)	
		0,14 (DBF)	0,16 (LBF)	
		0,04 (PBF)		
Pin maritime ( <i>Pinus pinaster</i> )	17	0,63 (DC)	0,1 (LC)	Gaspar et al. (2008).
		0,6 (DBI)	0,32 (LBI)	
		0,26 (DBF)	0,31 (LBF)	
Pin d'Elliott ( <i>Pinus elliottii</i> )	13	0,11-0,28 (DC)	0,22 (LC)	Hodge et Purnell, (1993).
		0,09-0,19	0,12 (LBF)	
		(DBF)	0,1 (LBI)	
Pin gris ( <i>Pinus banksiana</i> )	16	0,45 (DC)	0,13 (LC)	Zhang et Chui (1996).

DC : densité moyenne du cerne; DBI : densité du bois initial; DBF : densité du bois final; LC : largeur du cerne; LBI : largeur du bois initial; LBF : largeur du bois final; PBF : proportion du bois final.

#### 1.4.2 Corrélation génétique et phénotypique

Les programmes d'amélioration des arbres sont généralement désignés pour améliorer plusieurs traits en même temps. Par conséquent, les relations entre les traits doivent être prises en compte. La connaissance des corrélations génétiques entre les traits est très importante en amélioration génétique des arbres forestiers, car la sélection pour un trait peut influencer d'autres traits. La corrélation génétique (Équation 1-3) mesure à quel point deux caractéristiques (X et Y) sont

génétiqnement corrélées. Elle est définie comme le rapport de la covariance génétique au produit des deux écarts types génétiques. Ces corrélations seront calculées de la manière suivante :

$$rG_{xy} = \frac{COV(xy)}{\sqrt{VAR(x) \times VAR(y)}} \quad (1-3)$$

Où cov(xy) est la covariance génétique entre le caractère x et y, et var(x), var(y) sont les composantes de la variance génétique pour le caractère x et y, respectivement.

La corrélation phénotypique mesure la relation entre les caractéristiques mesurées (Équation 1-4). Ces caractéristiques peuvent inclure des traits physiques, physiologiques, anatomiques, morphologiques, etc. Ces corrélations peuvent être influencées par les facteurs génétiques et environnementaux. Cette mesure se définit comme le quotient de la covariance phénotypique entre les traits X et Y sur leurs variances respectives. Les calculs de ces corrélations seront effectués de la manière suivante :

$$rP_{xy} = \frac{COV(xy)}{\sqrt{VAR(x) \times VAR(y)}} \quad (1-4)$$

Pour le pin sylvestre, la longueur des trachéides présente une corrélation positive avec la densité de bois ( $r = 0,26$  à  $0,37$ ) et une corrélation négative ( $r = -0,27$ ) avec les caractères de croissance (Fries, 2012). Le Tableau 1.8 présente les corrélations génétiques et phénotypiques observées au cours des cinq dernières années (1995-1999) pour le pin sylvestre, tel que rapporté dans une étude menée par Fries et Ericson en 2006 sur des arbres en Suède.

**Tableau 1.8** Valeurs des corrélations génétiques (au-dessus de la diagonale) et phénotypiques (au-dessous de la diagonale) du bois du pin sylvestre (Fries et Ericsson, 2006).

Caractère	Densité	Hauteur	Diamètre	$\sigma_p^2$ *
Densité	-	-0,425±0,11	-0,511±0,16	2183±129,5
Hauteur	0	-	0,477±0,15	137,2±6,9
Diamètre	-0,23	0,691±0,02	-	1072,5±43,2

\*  $\sigma_p^2$  : variance phénotypique

## 1.5 Objectifs et hypothèses

L'objectif général de ce projet est d'étudier la variation de la qualité du bois de 19 familles du pin sylvestre dans deux sites différents.

Les objectifs spécifiques sont :

- ✓ Étudier les variations intra-cerne, intra-arbre et inter-sites de la largeur des cernes et la densité du bois du pin sylvestre.
- ✓ Déterminer la relation entre la croissance et les caractéristiques de la qualité du bois.
- ✓ Estimer les paramètres génétiques (héritabilité, corrélations phénotypiques et génétiques).
- ✓ Analyser la chimie de surface du bois du pin sylvestre par la spectroscopie infrarouge proche et développer des modèles de prédiction des composantes chimiques.

Hypothèses de recherche :

Les hypothèses que nous avons proposées sont les suivantes :

- ✓ La croissance et la densité radiale du bois varient en fonction de l'âge cambial de l'arbre, et l'utilisation du densitomètre à rayons X permet d'analyser ces variations.
- ✓ Le pin sylvestre planté en Abitibi-Témiscamingue possède des propriétés satisfaisantes telles qu'une croissance et une densité élevée qui favorisent une utilisation polyvalente dans les industries du bois.
- ✓ La spectroscopie infrarouge proche représente une alternative prometteuse pour l'évaluation à grande échelle des caractéristiques de la composition chimique du bois.

## CHAPITRE II : Matériel et méthodes

Afin d'atteindre nos objectifs, le travail a été divisé en deux parties : la première partie est consacrée à l'étude des variations des propriétés physiques en relation avec la qualité du bois de cette essence suivie d'une estimation des paramètres de génétique quantitative. La deuxième partie est consacrée à la caractérisation des propriétés chimiques par les méthodes conventionnelles et par la spectroscopie infrarouge proche (NIRS).

### 2.1 Matériel

#### 2.1.1 Localisation et description des sites

Dans le cadre de ce projet, deux sites ont été sélectionnés dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue pour faire l'échantillonnage (Figure 2.1).

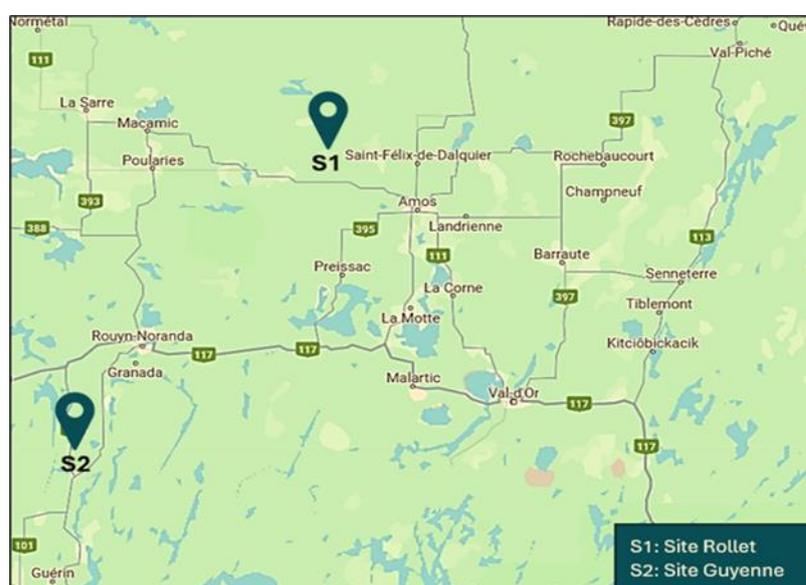


Figure 2.1 Localisation des deux sites de l'étude.

### 2.1.1.1 Dispositif expérimental

Dans les deux sites, 19 familles de pin sylvestre provenant de Bulgarie et une famille de pin gris local de la région de l’Abitibi-Témiscamingue ont été plantées en 2007.

Le dispositif expérimental de l’étude est un dispositif en blocs aléatoires complets de 3 rangées pour chaque bloc, comprenant 19 familles de pin sylvestre et une famille de pin gris. Chaque famille est représentée par 12 arbres espacés de 3 x 3 mètres, répétés 5 fois selon un plan en blocs dans le site de Rollet, et d’un espacement de 2,5 x 2,5 mètres, répétés 6 fois dans le site de Guyenne.

### 2.1.1.2 Caractéristiques du climat

Le Tableau (2.1) présente les caractéristiques climatiques, notamment la température et les précipitations, au cours des cinq dernières années pour chaque site d’étude. Ces données permettent d’analyser les variations et les tendances climatiques spécifiques à chaque site.

**Tableau 2.1** Localisation et caractéristiques climatiques des sites d’étude.

(<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>)

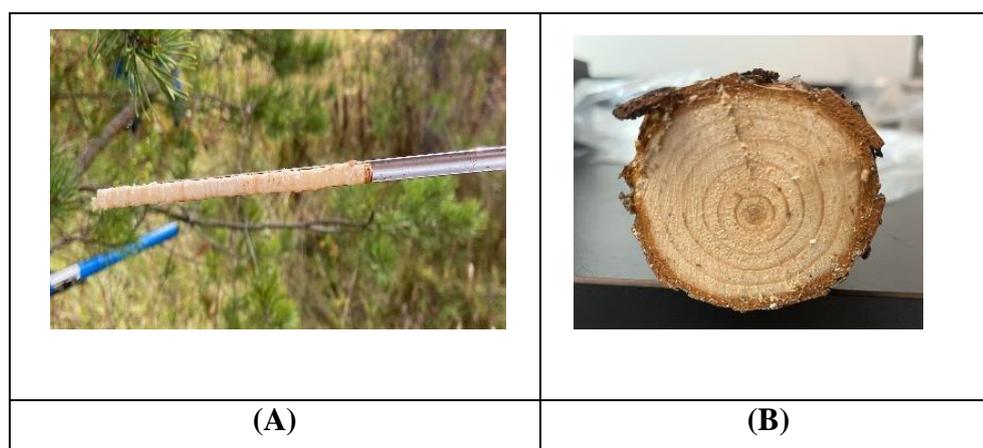
Site	Altitude (m)	Latitude N (°)	Longitude W (°)	TAM (°C)	TA max (°C)	TA min (°C)	PA (mm)
<b>Guyenne</b>	315,98	48,46	-78,28	1,42	12,5	-9,8	997
<b>Rollet</b>	269,55	47,54	- 79,14	3,6	12,7	-8,1	654,8

TAM : Température annuelle moyenne; PA : Précipitation annuelle; TA min : Température annuelle minimale; TA max : Température annuelle maximale.

### 2.1.2 Échantillonnage

Pour mener ce projet, deux types d’échantillonnage ont été réalisés sur les arbres dans les deux sites :

- Un échantillonnage non destructif a été réalisé sur les arbres sous forme de carottes de sondage de 5 mm de diamètre à hauteur de poitrine (HP =1,30 m) (Figure 2.2A) en octobre 2021. Au total, 19 familles de pin sylvestre et une famille du pin gris ont été sélectionnées pour chaque bloc dans les deux sites. Pour chaque famille, on prélève 3 carottes de 3 arbres différents (une carotte par arbre). Au total, 600 carottes ont été prélevées sur les deux sites (soit 300 échantillons par site). Les carottes ont été utilisées pour étudier les variations des propriétés physiques du bois et pour calculer les paramètres génétiques (corrélations génétiques, phénotypiques et héritabilité).
- Un échantillonnage destructif a été effectué sous forme des rondelles au niveau de la HP pour un total de 14 échantillons prélevés de différentes familles du site Rollet (Figure 2.2B). Ces échantillons ont été utilisés pour faire la caractérisation chimique du bois du pin sylvestre.



**Figure 2.2** Les deux types d'échantillonnage réalisés dans le cadre de cette étude.

(A) une carotte de sondage et (B) une rondelle de bois.

## 2.2 Méthodologie

### 2.2.1 Caractérisation des propriétés physiques

Sur les carottes, des essais et des tests ont été réalisés sur le densimètre à rayon X au laboratoire des biomatériaux à l'UQAT pour la caractérisation des propriétés physiques du bois du pin sylvestre. Les propriétés étudiées étaient la largeur des

cernes et la densité du bois dans les deux types de bois (initial et final) en fonction de l'âge cambial.

#### 2.2.1.1 Préparation des échantillons pour la mesure de densité

Pour analyser la densité du bois, les carottes ont été sciées de l'écorce vers la moelle pour avoir une surface plane d'épaisseur entre 1,5 mm et 2 mm à l'aide d'une scieuse à disque (Figure 2.3).



**Figure 2.3** Scieuse à disque.

Tous les échantillons sont par la suite extraits dans une solution de cyclohexane et d'éthanol pendant 24 heures, puis dans de l'eau distillée pendant un autre 24 heures pour enlever les substances résineuses et les polysaccharides solubles dans l'eau (Bouslimi, 2014).



**Figure 2.4** Montage d'extraction Soxhlet pour les carottes.

Après extraction (Figure 2.4), les échantillons ont été séchés à l'air ambiant pendant une semaine sous une charge pour éviter leur déformation jusqu'à l'obtention d'une teneur en humidité de 8% (Figure 2.5).



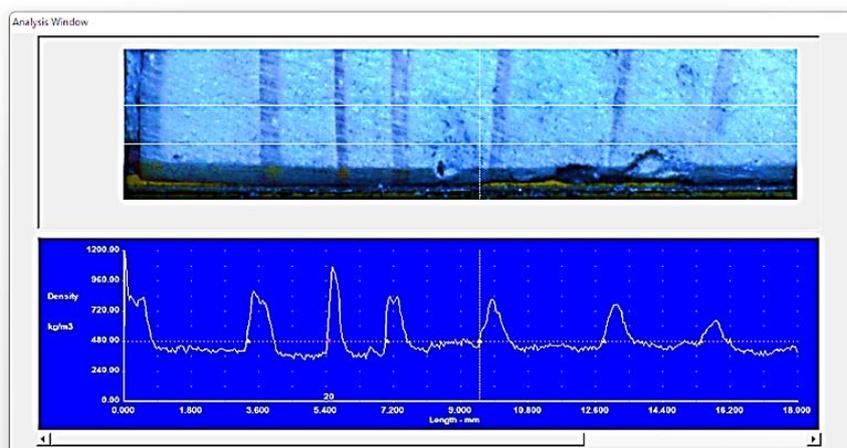
**Figure 2.5** Mesure de la teneur en humidité.

#### 2.2.1.2 Densitomètre à rayon X

À l'aide de la densitométrie à rayon X modèle QTRS-01X (*Tree Analyser de Quintek Measurement System, INC*) (QMS) (Figure 2.6), nous avons mesuré la croissance annuelle et la densité du bois. Le principe de fonctionnement de cette machine est basé sur la diffraction des rayons X sur la matière avec une résolution linéaire de 0,02 mm. L'appareil est supervisé par un programme informatique dénommé *Tree Ring Analyser* qui permet de connaître l'âge de l'arbre à travers le calcul du nombre de cernes de l'échantillon de la moelle vers l'écorce. À partir des mesures établies par le densitomètre à rayons X, on a mesuré le nombre et la largeur des cernes du bois initial et du bois final, le pourcentage de bois final, la densité des cernes du bois initial et du bois final pour chacun des cernes annuels de la moelle à l'écorce. La transition du bois initial au bois final est déterminée par la méthode de point d'inflexion décrite par Koubaa et al. (2002). La détermination du point de transition permet de calculer les largeurs et la densité du BI et de BF pour chaque cerne.



**Figure 2.6** Densitomètre QTRS-OJX Tree Analyser de Quintek Measurement System, Inc.



**Figure 2.7** Exemple d'un profil de densité d'un échantillon scanné par le densitomètre.

### 2.2.2 Caractérisation des propriétés chimiques

Pour caractériser la composition chimique du bois du pin sylvestre, deux techniques distinctes ont été utilisées : 1) des analyses conventionnelles réalisées selon les méthodes normalisées de TAPPI (1985, 1988a, 1988b, 1989), et 2) la spectroscopie infrarouge proche (NIRS). L'objectif de cette approche était d'obtenir une compréhension détaillée des constituants chimiques présents dans le bois de cette espèce.

### 2.2.2.1 Préparation des échantillons

Des morceaux de bois de dimension  $2,5 \times 2,5 \times 1$  cm<sup>3</sup> ont été découpés à partir des rondelles pour chaque échantillon, puis séchés pendant 72 heures dans une étuve à 50 °C et enfin réduites en poudre avec un broyeur à couteaux avec un filtre à mailles suivant la norme T264 (1989) pour avoir une matière en poudre de bois.



**Figure 2.8** Étapes de la préparation des échantillons : a) Séchage des échantillons dans un four à 50 °C, b) Broyeur à couteaux *Retsch*.

### 2.2.2.2 Analyses chimiques conventionnelles

Les analyses conventionnelles ont permis de déterminer la composition chimique des différents éléments du bois, à savoir la teneur en cellulose, hémicelluloses, lignine soluble dans l'acide, et lignine insoluble dans l'acide ainsi que la teneur en matières extractibles.

#### 2.2.2.2.1 Teneur en extractibles

La teneur en extractibles est déterminée selon la norme TAPPI T204 (Tappi, 1988a, 1988b). Pour cela, une masse de 5g de poudre de bois est placée dans un montage d'extraction Soxhlet (Figure 2.8). Une première extraction dans une solution de 100 ml d'éthanol et 200 ml de cyclohexane pendant 24 cycles, ensuite l'échantillon est

filtré et lavé avec 200 ml d'eau distillée chaude. Une deuxième extraction a été réalisée avec 300 ml d'eau distillée chaude pendant 24 cycles supplémentaires à une température de 100 °C. Après les deux extractions, le reste de l'échantillon sous forme de résidu est séché puis pesé. Le pourcentage des extractibles est déduit par rapport à la masse initiale de l'échantillon.

$$E (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2-1)$$

Où  $m_1$  est la masse initiale de la poudre du bois et  $m_2$  est la masse après extraction.



**Figure 2.9** Montage d'extraction Soxhlet pour la poudre du bois.

#### 2.2.2.2.2 Teneur en lignine Klason

La lignine Klason est la lignine insoluble à l'acide, sa teneur est déterminée selon la méthode normalisée TAPPI T222 (1988) (Schwanninger et Hinterstoisser, 2002). Pour ce faire, 250 mg de poudre de bois est mélangé avec 3 ml d'acide sulfurique (72%) dans une éprouvette et on laisse chauffer pendant une heure dans un bain-marie à 30 °C. Ensuite le mélange est transféré dans un erlenmeyer en ajoutant 84 ml de l'eau déminéralisée. Ensuite, l'erlenmeyer est placé dans un autoclave pendant une heure à une température de 125 °C. Après refroidissement, le reste de la matière est lavé à l'eau déminéralisée, puis séché à 103 °C, et enfin pesé. La masse finale présente la masse de la lignine Klason. Le pourcentage de la lignine Klason est calculé en utilisant la formule suivante (Équation 2-2) :

$$\text{Lignine Klason (\%)} = \frac{\text{Masse de lignine klason}}{\text{Masse initiale de l'échantillon}} \times 100 \quad (2-2)$$

#### 2.2.2.2.3 Teneur en cellulose

La teneur en cellulose est déterminée en utilisant l'approche *Kurschner-Hoffiner* (Browing, 1967). Elle consiste à attaquer un échantillon avec un mélange d'acide nitrique et d'éthanol. Pour ce faire, une masse de 5 g de poudre de bois est mélangée avec une solution de 125 ml 1:4 (v/v) d'acide nitrique (65%) et d'éthanol (96%), placés dans un bain-marie pendant une heure à 90 °C pour 4 cycles successifs. Après le quatrième cycle, la solution est filtrée sous vide, puis lavée à l'éthanol puis à l'eau froide et en fin à l'eau chaude. Ensuite, elle est séchée à 103 °C puis pesée. La masse finale présente la masse de la cellulose. Le pourcentage de la cellulose est calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{Cellulose (\%)} = \frac{\text{Masse cellulose}}{\text{Masse initiale de l'échantillon}} \times 100 \quad (2-3)$$

#### 2.2.2.3 Spectroscopie par l'infrarouge proche (NIRS)

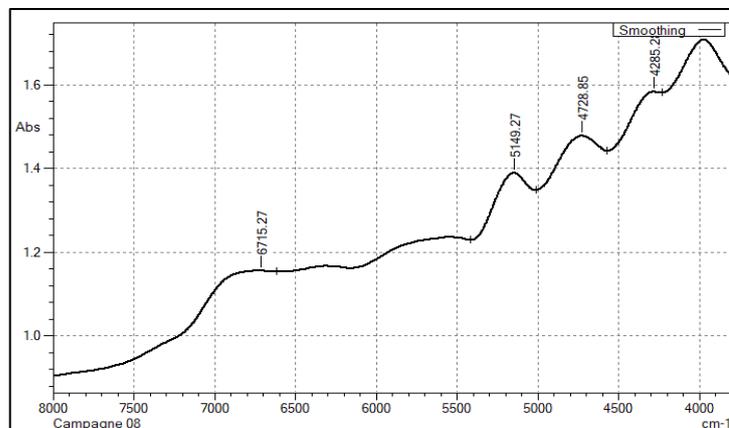
La spectroscopie infrarouge proche (NIRS) est un outil analytique puissant pour une caractérisation rapide et précise de la biomasse lignocellulosique (Dokken et al., 2005). Basée sur la présence de vibrations moléculaires, elle peut fournir des informations sur la composition chimique d'un échantillon, y compris les détails de la structure moléculaire. Aussi la NIRS a été utilisée pour étudier la chimie de surface en déterminant les différents groupements chimiques présents sur la surface et pour faire l'estimation non destructive de la substance chimique du bois (Schimleck et al., 2006).

Le principe de fonctionnement de cet appareil est basé sur l'absorption du rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Cette méthode permet de mesurer les vibrations moléculaires spécifiques présentes dans le bois, ce qui nous fournit des informations sur les types de liaisons chimiques et les groupes fonctionnels présents sur la surface. Les spectres NIR ont été mesurés en mode de réflexion

diffuse à partir d'échantillons maintenus dans une porte-échantillon sur la plage de  $8000\text{-}3800\text{ cm}^{-1}$  ( $1000\text{-}2500\text{ nm}^{-1}$ ) avec une résolution spectrale de  $8\text{ cm}^{-1}$ .



**Figure 2.10** Spectroscopie infrarouge proche NIRS (SHIMADZU, *IR tracer 100 avec ATR Quest*).



**Figure 2.11** Exemple d'un spectre infrarouge.

À partir de la poudre obtenue, chaque échantillon est analysé sur la spectroscopie infrarouge pour étudier la chimie de surface. Les pics qui sont présentés dans chaque spectre (Figure 2.9) ressemblent à des groupements (C-H; O-H; C-O) qui permet d'identifier la composition chimique du bois.

Les variations entre les spectres des échantillons peuvent être liées à l'environnement (température et humidité de l'air, tassement de la poudre, et l'homogénéité de la taille des particules) (Migeon, 2013). Par conséquent, il est nécessaire d'appliquer des méthodes mathématiques pour éliminer l'influence de ces variations externes. Cela s'accomplit en normalisant les données pour rendre les variations uniformes. Ensuite, les données ont subi deux calculs de dérivées successives afin de rendre les spectres plus interprétables, comparables entre eux, et pour accentuer les différences entre les spectres. Après avoir effectué ces traitements, les spectres sont mis en corrélation avec les résultats chimiques (obtenus par les méthodes conventionnelles) grâce à la méthode de régression des moindres carrés partiels (PLS = *Partial Least Squares*) pour obtenir des modèles de corrélation et de calibration.

### 2.2.3 Analyses statistiques

#### 2.2.3.1 Traitement des données et test de normalité

L'analyse des données a été effectuée en utilisant le logiciel R (R Development Core, 2022). La première étape a été consacrée à la préparation des données liées aux variations radiales intra-arbre pour les 19 familles du bois du pin sylvestre pour les propriétés de la croissance et de la densité du bois. Cette préparation est basée sur l'observation des graphiques représentant les variations radiales de la moelle à l'écorce de ces différentes propriétés étudiées en fonction de l'âge cambial.

La deuxième étape consistait à vérifier, pour chaque variable, si les données suivent une distribution normale et pour assurer la normalité et l'homoscédasticité des résidus, nous avons utilisé le test de Jarque-Bera ainsi que des histogrammes qui représentent la distribution des données. Les résultats de notre analyse ont indiqué que la majorité des données suivaient une distribution normale, à l'exception de la largeur du bois final (LBF) et sa proportion (PBF). Afin de satisfaire aux hypothèses du modèle, nous avons procédé à une transformation de puissance en utilisant un exposant de 0,25 pour ces deux variables. Cette transformation a été réalisée dans

le but de rendre les données conformes à la distribution normale requise par le modèle.

### 2.2.3.2 Analyse de variance (ANOVA)

Une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour étudier les effets des sources de variations sur les caractéristiques de croissance et de la densité en utilisant des modèles linéaires mixtes. L'utilisation de ce type de modèle est utile pour traiter des données corrélées ou des valeurs provenant des mesures répétées. Les modèles mixtes, également connus sous le nom de modèles à effets mixtes ou modèles linéaires mixtes, sont des modèles statistiques qui combinent à la fois des effets fixes et des effets aléatoires. Tous les facteurs étudiés sont considérés fixes, à l'exception de l'arbre et le bloc qui ont été considérés comme aléatoire. Le niveau de signification a été fixé à  $P \leq 0,05$  pour tous les tests.

$$Y = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\beta\gamma)_{jk} + \delta_l + \Phi_m + \varepsilon \quad (2-4)$$

Où  $\mu$  est la moyenne générale de la propriété,  $\alpha$  est l'effet fixe de l'âge,  $\beta$  est l'effet fixe de la famille,  $\gamma$  est l'effet fixe du site,  $\beta\gamma$  est l'interaction entre la famille et le site,  $\delta$  est l'effet aléatoire du bloc,  $\Phi$  est l'effet aléatoire de l'arbre, et  $\varepsilon$  représente l'erreur.

### 2.2.3.3 Estimation des paramètres génétiques

#### 2.2.3.3.1 Héritabilité

Une analyse de génétique quantitative a été effectuée pour estimer les paramètres génétiques tels que l'héritabilité au sens étroit, les corrélations génétiques et phénotypiques entre la croissance et les composantes de la densité. Cette étude a été réalisée en utilisant une approche de modèle linéaire mixte. Le modèle associé aux données pour un caractère donné est représenté par l'équation suivante :

$$Y_{ijk} = \mu + F_i + B_j + S_k + (F \times S)_{ik} + (B \times S)_{jk} + \varepsilon \quad (2-5)$$

Où  $Y$  représente l'observation individuelle,  $\mu$  est la moyenne générale,  $F_i$  est l'effet de la famille  $i$  avec une variance  $\sigma_i^2$ ,  $B_j$  est l'effet du bloc  $j$  avec une variance  $\sigma_j^2$ ,

$S_k$  est l'effet du site avec une variance  $\sigma_k^2$ ,  $F \times S$  est l'effet de l'interaction entre la famille et le site avec une variance  $\sigma_{fs}^2$ ,  $B \times S$  est l'effet de l'interaction entre le bloc et le site avec une variance  $\sigma_{bs}^2$ , et  $\varepsilon$  est l'erreur résiduelle avec une variance  $\sigma_\varepsilon^2$ .

Par la suite, l'héritabilité au sens étroit ( $h^2$ ) a été calculée pour chaque trait mesuré:

$$h^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_p^2} \quad (2-6)$$

$$\sigma_a^2 = 4\sigma_f^2 \quad (2-7)$$

Où  $\sigma_a^2$  représente la variance génétique additive (2-7) et  $\sigma_p^2$  représente la variance phénotypique totale et  $\sigma_f^2$  représente la variance famille. Le choix du coefficient multiplicatif appliqué à la variance de la famille est basé sur plusieurs études antérieures portant sur le pin sylvestre et d'autres espèces (Fundova et al., 2019; Hong et al., 2015).

#### 2.2.3.3.2 Corrélations génétiques et phénotypiques

Les corrélations génétiques et phénotypiques entre la croissance et les composantes de la densité du bois ont été calculées à l'aide d'une extension multivariée du modèle selon les formules suivantes : Les corrélations génétiques;

$$r_{G_{xy}} = \frac{COV_{g(x,y)}}{\sqrt{\sigma_{gx}^2 \cdot \sigma_{gy}^2}} \quad (2-8)$$

Où  $COV_{g(x,y)}$  est la covariance génétique additive,  $\sigma_{gx}^2$  et  $\sigma_{gy}^2$  sont les composantes de variance pour les traits x et y respectivement.

Les corrélations phénotypiques;

$$r_{p_{xy}} = \frac{COV_{p(x,y)}}{\sqrt{\sigma_{px}^2 \cdot \sigma_{py}^2}} \quad (2-9)$$

Où  $COV_{p(x,y)}$  est la covariance phénotypique entre les traits x et y,  $\sigma_{px}^2$  et  $\sigma_{py}^2$  sont les variances phénotypiques. Les erreurs standard pour les corrélations génétiques, phénotypiques et l'héritabilité ont été estimées par la méthode Delta.

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Densité et largeur moyenne des cernes

Le Tableau 3.1 donne un aperçu sur les moyennes et les coefficients de variation (CV) des caractéristiques pour toutes les familles du pin sylvestre et du pin gris dans les deux sites (Rollet et Guyenne) étudiés dans le cadre de ce projet.

**Tableau 3.1** Moyennes et coefficients de variation (entre parenthèses, en %) de la densité et de la largeur des cernes dans les deux sites pour les 19 familles du pin sylvestre et une famille de pin gris.

<b>Pin sylvestre</b>			
Densité (kg/m <sup>3</sup> )			
Sites	Cerne	Bois initial	Bois final
Guyenne	463 (9,8)	408 (10,9)	630 (10,3)
Rollet	459 (9,7)	402 (10,9)	660 (9,7)
Largeur (mm)			
Sites	Cerne	Bois initial	Bois final
Guyenne	3,57 (20,8)	2,67 (24)	0,9 (31,7)
Rollet	4,2 (21,6)	3,21 (24,5)	0,99 (29)
<b>Pin gris</b>			
Densité (kg/m <sup>3</sup> )			
Sites	Cerne	Bois initial	Bois final
Guyenne	463 (7,9)	413 (8,6)	677 (7,2)
Rollet	478 (7,1)	421 (8,4)	705 (8,5)
Largeur (mm)			
Sites	Cerne	Bois initial	Bois final
Guyenne	4,63 (15,3)	3,7 (15)	0,92 (21,4)
Rollet	5,64 (21,8)	4,46 (22,9)	1,18 (20,8)

### 3.1.1 Pin sylvestre

Pour le pin sylvestre, les coefficients de la variation de la densité moyenne, la densité du bois initial et la densité du bois final variaient entre 9,8% et 10,9 %, alors que ceux pour les largeurs des cernes variaient de 20% à 31%.

Les valeurs de la densité moyenne des cernes ainsi que la densité du bois initial étaient proches entre les deux sites, cependant la valeur moyenne de la densité du bois final était supérieure dans le site de Rollet.

La densité moyenne du bois du pin sylvestre était de 459 kg/m<sup>3</sup> dans le site de Rollet et de 463 kg/m<sup>3</sup> dans le site de Guyenne. Ces valeurs sont comparables à celles rapportées par Fries et Ericsson (2006) (466 kg/m<sup>3</sup>) pour leurs études réalisées sur 400 arbres de pin sylvestre âgés de 30 ans du nord de la Suède. Cependant, elles sont supérieures à celle de la densité du bois juvénile du pin rouge étudié dans l'Est du Canada (340 kg/m<sup>3</sup>), ainsi qu'à celle du bois mature du pin blanc (368 kg/m<sup>3</sup>) (Koubaa et Zhang, 2009).

Pour la largeur du cerne, une importante variation a été observée entre les sites, allant de 3,5 mm à 4,2 mm. Cette variation se situe principalement au niveau du bois initial qui varie de 2,67 mm à 3,21 mm alors qu'au niveau du bois final elle varie de 0,90 mm à 0,99 mm.

### 3.1.2 Pin gris

Pour le pin gris, les coefficients de la variation de la densité moyenne, la densité du bois initial et la densité du bois final varient entre 7% et 8,5%, alors que ceux pour les largeurs des cernes varient de 15% à 22,9%.

La densité moyenne pour le pin gris était de 463 kg/m<sup>3</sup> pour les échantillons du site Guyenne et de 478 kg/m<sup>3</sup> pour les échantillons du site Rollet. La valeur moyenne de la largeur des cernes était de 4,63 mm pour le site de Guyenne et de 5,64 mm pour le site de Rollet. Ces valeurs calculées seulement pour une famille du pin gris locale sont supérieures à celles du pin sylvestre dans les deux sites. Selon l'étude

de Park et al. (2009) réalisée sur 60 arbres de pin gris âgés de 50 ans dans 5 sites différents, les valeurs moyennes de la densité varient entre  $465 \text{ kg/m}^3$  et  $470 \text{ kg/m}^3$ . Pour les valeurs de la croissance radiale, elles varient entre 1,87 mm et 2,16 mm. De même, les valeurs trouvées dans cette étude pour le pin gris sont supérieures à celles rapportées par Zhang et Koubaa (2009) pour le bois juvénile du pin gris (âgé de 1 à 8 ans) que ce soit pour la densité moyenne ( $398 \text{ kg/m}^3$ ) ou pour la largeur du cerne (3,97 mm).

### 3.2 Effet de site sur les propriétés du pin sylvestre et du pin gris

Les données obtenues par les mesures du densitomètre à rayons X pour les 19 familles du pin sylvestre et la seule famille du pin gris dans les deux sites ont été utilisées pour faire une comparaison quantitative entre ces deux espèces pour les valeurs moyennes de la densité et de la croissance.

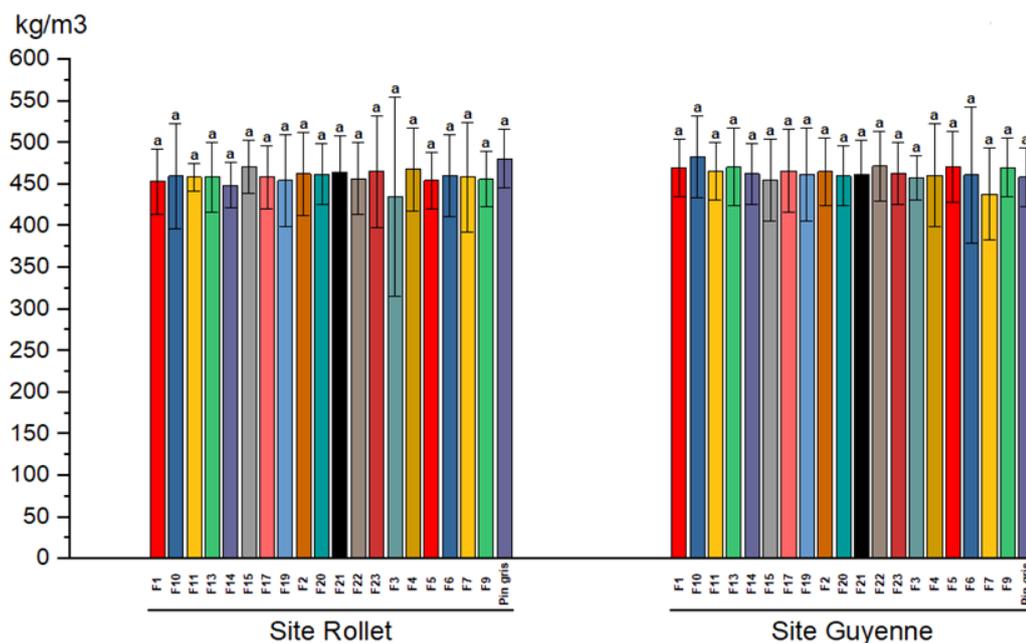
La Figure 3.1 montre qu'il n'y a pas de grande variation entre les deux espèces dans les deux sites étudiés en ce qui concerne les valeurs moyennes de la densité. Cependant, une variation significative est observée pour la largeur des cernes, que ce soit entre les deux espèces ou parmi les 19 familles de pin sylvestre. Il est important de noter que pour le site de Rollet, la valeur moyenne de la densité du pin gris est légèrement supérieure à celle de toutes les familles du pin sylvestre. Cependant, dans le site de Guyenne, la famille (F10) du pin sylvestre a une densité légèrement supérieure à toutes les autres familles, y compris la famille du pin gris (Figure 3.1).

Les valeurs moyennes de la largeur des cernes pour chaque famille dans les deux sites sont présentées dans la Figure 3.2. Une variation significative a été notée entre les sites concernant les valeurs de la largeur des cernes au sein de toutes les familles. La croissance du pin gris est plus élevée que celle des familles du pin sylvestre dans les deux sites. Les comparaisons des taux de croissance entre les sites ont montré que les arbres plantés dans le site de Guyenne ont une croissance plus faible que ceux de Rollet. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs comme les conditions de croissance de chaque plantation (l'effet du site sur la croissance

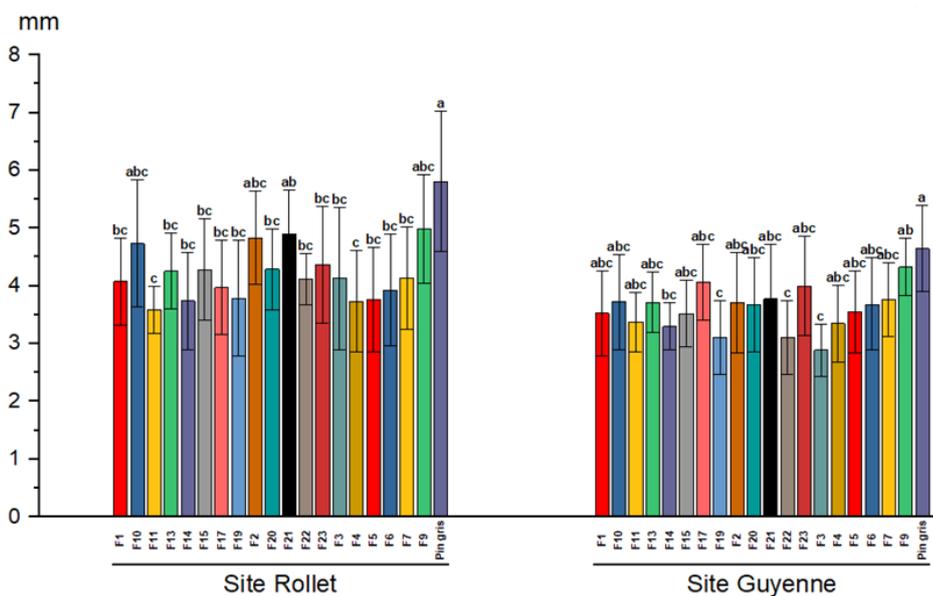
radiale de l'arbre). En effet, le site de Rollet est situé en pleine forêt, ce qui favorise davantage les interactions avec l'environnement forestier, sans intervention humaine. Cependant, le site de Guyenne est une plantation privée proche des terrains agricoles, où il est possible qu'il y ait eu des préparations et des traitements préalables sur le sol. De plus, les effets du site reflètent la réaction des arbres aux effets combinés des conditions climatiques locales (Pliura et al., 2007).

L'espace entre les arbres dans le site de Rollet est de 3 mètres, alors que pour le site de Guyenne est de 2,5 mètres. Cette différence d'espace peut avoir un impact significatif sur la croissance et le développement des arbres. Plusieurs études sur les conifères ont montré qu'un espace plus grand améliore la croissance des arbres sans diminuer de façon importante la densité du bois (Larson, 1973; Larocque et Marshall, 1995). Cette observation met en évidence l'importance de tenir compte de l'espace entre les arbres dans la gestion forestière.

Pour conclure, il n'y a pas une différence significative au niveau de la densité du bois entre la famille du pin gris et les 19 familles du pin sylvestre. Cependant, en ce qui concerne les largeurs moyennes des cernes, l'espèce locale (pin gris) a montré des taux de croissance supérieurs à ceux des familles du pin sylvestre dans les deux sites, quelles que soient leurs conditions. Cela suggère que le pin gris est mieux adapté aux conditions climatiques et environnementales locales que le pin sylvestre. En général, les espèces transplantées dans un nouvel environnement, comme dans notre cas, nécessitent une période d'adaptation plus longue que les espèces indigènes, en raison des défis associés à l'adaptation à un nouvel environnement. Elles doivent ajuster leur métabolisme, leur croissance et leur développement pour s'adapter à ces nouvelles conditions.



**Figure 3.1** Densité moyenne pour les familles du pin sylvestre et la famille du pin gris dans les deux sites d'étude.



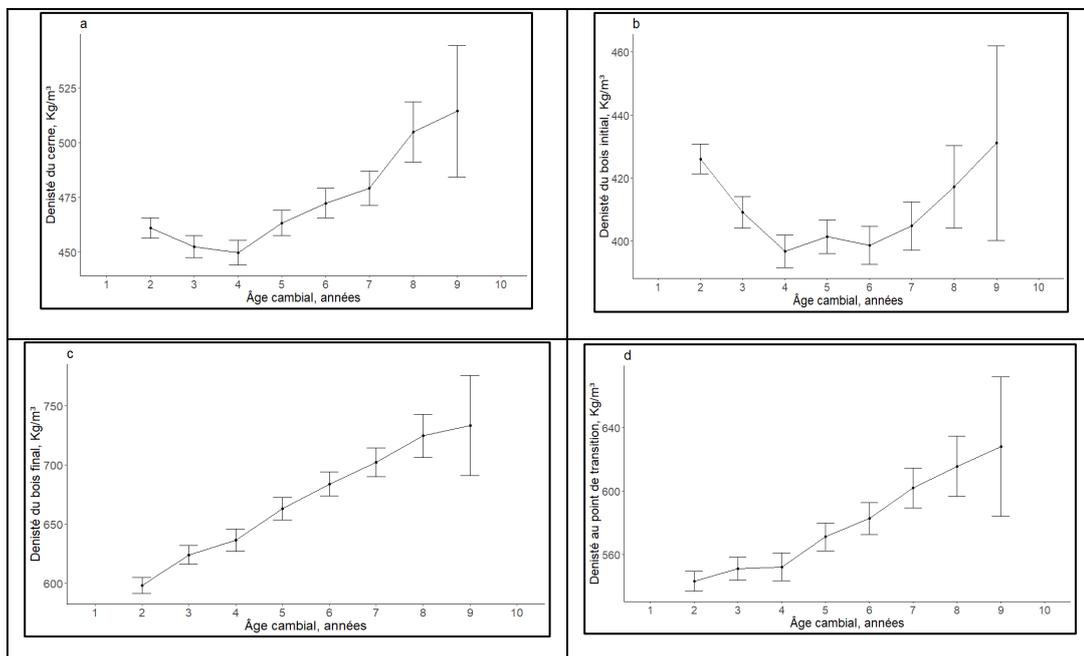
**Figure 3.2** Croissance moyenne au HP pour les familles du pin sylvestre et la famille du pin gris dans les deux sites d'étude.

### 3.3 Variations radiales de la densité et de la largeur des cernes du bois du pin sylvestre

Au total, 500 échantillons de 19 familles du pin sylvestre ont été analysés dans cette étude en utilisant la densitométrie à rayon X afin d'étudier les variations radiales de la densité et de la croissance. Des graphiques illustrant la variation radiale des propriétés mesurées, de la moelle à l'écorce, en fonction de l'âge cambial, ont été générés dans la prochaine partie pour examiner les différentes variations.

#### 3.3.1 Variation radiale de la densité

La variation radiale des composantes de la densité des cernes en fonction de l'âge cambial pour le bois du pin sylvestre est illustrée dans la Figure 3.3. Le profil de la densité des cernes du bois varie en allant de la moelle vers l'écorce. En effet, la densité est très élevée près de l'écorce et faible près de la moelle. Dans notre étude, le profil de la densité moyenne du cerne a commencé par une légère diminution à partir de la moelle en allant au 4<sup>e</sup> cerne pour une valeur de (450 kg/m<sup>3</sup>), puis une augmentation presque linéaire pour atteindre une densité de 510 kg/m<sup>3</sup> dans le cerne 9 (Figure 3.3a).



**Figure 3.3** Profils de variation radiale avec l'écart type de : a) la densité annuelle des cerne, b) la densité du bois initial, c) la densité du bois final, et d) la densité de transition en fonction de l'âge cambial pour le bois du pin sylvestre.

Ces profils suivent le patron décrit par Panshin et De Zeeuw (1981) qui est caractérisé par une diminution de la densité près de la moelle et par une augmentation vers l'écorce.

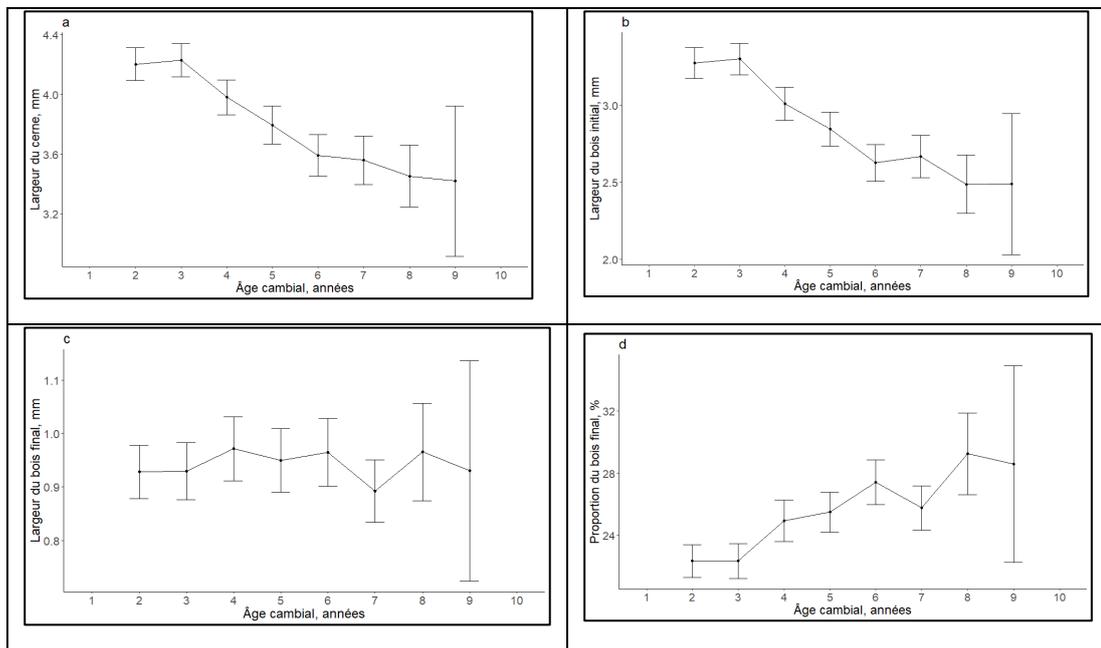
Le bois initial est le composant majeur du cerne, son modèle de variation pour sa densité est similaire à celle de la densité des cerne, mais avec des valeurs plus faibles. Elle diminue rapidement de son maximum près de la moelle pour atteindre une valeur minimale ( $450 \text{ kg/m}^3$ ) au 4<sup>e</sup> cerne puis elle augmente lentement en allant vers l'écorce (Figure 3.3b). Cependant, dans le cas du bois final, la densité a augmenté régulièrement de façon linéaire en fonction de l'âge cambial jusqu'à une densité maximale d'environ  $740 \text{ kg/m}^3$  à l'âge de 9 ans (Figure 3.3c). La variation radiale de la densité de transition suit la même tendance que la densité du bois final. Ces profils de variation sont similaires avec celles rapportées dans la littérature pour le bois juvénile du pin sylvestre du sud-ouest de l'Allemagne (Sauter et al., 1999), et pour le pin gris (Kasroui, 2011). Le modèle de la densité radiale s'explique par

la variation de la densité du bois initial et final. La densité du bois final est très élevée par rapport à celle du bois initial (Figure 3.3b, c), une augmentation de sa proportion affecte directement la densité moyenne des cernes. Les propriétés physiques (densité) sont également affectées par le passage du bois initial au bois final (Lenz et al., 2010).

La variation de la densité entre le bois initial et le bois final s'explique par la différence anatomique au niveau des parois cellulaires pour chaque type de bois. Le bois initial (bois du printemps) est formé par une paroi cellulaire mince et un grand lumen, ce qui donne une faible densité. En revanche, le bois final (bois d'été) est composé d'une paroi cellulaire épaisse avec un petit lumen ce qui donne une forte densité (Panshin et De Zeeuw 1981). En allant dans le même sens, les différences de température, de lumière et de disponibilité de l'eau entre le début et la fin de saison de croissance seraient les facteurs responsables de cette différence.

### 3.3.2 Variation radiale de la croissance annuelle

Les variations radiales de la largeur du cerne (LC), largeur du bois initial (LBI) et largeur du bois final (LBF), ainsi que la proportion du bois final en fonction de l'âge cambial au DHP, sont illustrées dans la Figure 3.4. On a observé une légère augmentation des largeurs moyennes de cernes de croissance pour les 3 premiers cernes près de la moelle, atteignant une valeur maximale de 4,3 mm à l'âge de 3 ans, puis elle a diminué rapidement en allant vers l'écorce pour atteindre une valeur minimale de 3,4 mm à l'âge de 9 ans (Figure 3.4a). Le profil de variation de la LBI suit celui de la LC, mais avec des valeurs plus faibles. Cependant, le profil de variation de la LBF diffère de celui de la largeur moyenne et initiale du cerne. Il se caractérise par une légère augmentation de la moelle jusqu' au 4<sup>e</sup> cerne suivi d'une instabilité en allant vers l'écorce. La proportion du bois final varie significativement le long de la section radiale de l'arbre. Elle est plus élevée près de l'écorce, atteignant environ 30%, tandis qu'elle est plus basse près la moelle avec un pourcentage d'environ 20%. Cette variation est illustrée dans la Figure 3.4d.



**Figure 3.4** Profils de variation radiale avec l'écart type pour a) la largeur annuelle des cerne, b) la largeur du bois initial, c) la largeur du bois final et d) la proportion de bois final en fonction de l'âge cambial pour le bois du pin sylvestre.

Cette tendance était attendue, car la largeur du cerne du bois initial a fortement diminué à partir du cerne 3 en allant vers l'écorce, tandis que la largeur du bois final a montré une faible variabilité vers l'écorce. La variation radiale de la croissance et de la densité présente des tendances inverses. Cette observation s'explique par la relation et le lien entre le taux de croissance et la densité du bois. En effet, l'augmentation de la densité en fonction de l'âge cambial diminue la largeur du cerne. Ce qui signifie que les cerne les plus larges sont associés à de faibles valeurs de densité et inversement. Cette caractéristique est bien connue pour la plupart des essences des conifères (Karaoui, 2011 ; Dos Santos, 2014; Bouslimi et al., 2019).

Dans notre étude, les deux premiers cerne produits par l'arbre étaient plus larges par rapport aux autres. En effet, les cerne larges indiquent une croissance rapide (Falcon-Lang, 2005). La forte croissance radiale près de la moelle est typique dès les premières années de croissance, où la concurrence entre les cimes est limitée et la croissance des arbres est vigoureuse (Mvolo et al., 2019). De plus, les jeunes

arbres ont souvent une croissance initiale plus rapide lorsqu'ils sont en phase de développement juvénile, ce qui pourrait se traduire par des cernes plus larges au début de leur croissance. L'augmentation de la proportion du bois final (PBF) au cours des années entraîne une densité plus élevée, caractérisée par des cernes de croissance moins larges. En effet une croissance élevée est le résultat d'une production importante du bois initial (BI) que du bois final (BF) d'où on va avoir une faible densité du bois. Des études antérieures sur le bois juvénile des conifères comme le bois du pin gris (Karaoui, 2011) et de l'épinette noire (Dos Santos, 2014) ont trouvé des allures de variation similaire à notre étude (Figure 3.4), mais avec des valeurs différentes selon l'espèce étudiée. La largeur du bois initial (LBI) était plus importante que la largeur du bois final (LBF). Cette observation est connue pour tous les conifères puisque le bois initial se produit durant le printemps lorsque la disponibilité en eau et en nutriments est élevée. En revanche, la formation du bois final est liée avec une réduction de la teneur en eau. Les valeurs de l'écart type pour les composantes de la largeur des cernes sont élevées par rapport à la densité. Cela confirme que la variation de la croissance radiale entre les 19 familles est importante. Donc, un effet significatif de la famille sur la largeur du cerne sera attendu.

Les variations radiales dans la croissance et la densité ont révélé des profils similaires à ceux observés chez d'autres conifères étudiés au Canada. De plus, ses caractéristiques (densité et croissance moyenne), se comparent à celles des espèces locales. Ces résultats pourraient avoir des implications pratiques significatives, notamment dans le domaine de la gestion forestière, en visant une valorisation optimale de cette essence.

Les résultats de l'analyse de variance des effets fixes sur la largeur et la densité du cerne dans le bois initial et final, ainsi que leurs interactions, sont présentés dans le Tableau 3.3. On observe que l'âge cambial a eu un effet significatif sur toutes les propriétés du bois à l'exception de la largeur du bois final. L'effet de la famille et du site est plus significatif que celui du bloc.

**Tableau 3.2** Résultats de l'analyse de variance des effets fixes, des effets aléatoires et des interactions sur la largeur et la densité du cerne dans le bois initial et final.

Source de variation	Effets fixes						Interactions		Effets aléatoires	
	Âge cambial		Famille		Site		Famille X Site		Arbre	Bloc
	Valeur de F	Valeur de P	Valeur de F	Valeur de P	Valeur de F	Valeur de P	Valeur de F	Valeur de P	Valeur de P	Valeur de P
<b>Caractères</b>										
<b>Densité du cerne (DC)</b>	17,51	< 0,0001	1,51	0,07	0,02	0,87	1,86	0,01	0,25	0,35
<b>Densité du bois initial (DBI)</b>	11,78	< 0,0001	1,32	0,16	11,56	0,0001	1,98	0,008	0,02	0,06
<b>Densité du bois final (DBF)</b>	62,72	< 0,0001	5,48	0,0001	128,24	< 0,0001	2,49	0,0004	1	1
<b>Largeur du cerne (LC)</b>	17,94	< 0,0001	14,11	< 0,0001	121,24	< 0,0001	4,01	0,0001	0,025	0,0001
<b>Densité de transition (Trans D)</b>	22,11	< 0,0001	4	0,0001	48,8	0,0001	2,2	0,002	1	0,78
<b>Largeur du bois initial (LBI)</b>	24,32	< 0,0001	13,98	< 0,0001	79,27	< 0,0001	3,8	0,0001	0,01	0,0001
<b>Largeur du bois final (LBF)</b>	1,05	0,39	5,61	0,0001	86,52	< 0,0001	1,54	0,06	0,27	0,21
<b>Proportion du bois final (PBF)</b>	21,26	< 0,0001	3,06	0,0001	3,49	0,06	1,24	0,21	0,99	0,01

L'âge cambial de l'arbre a eu un effet significatif sur la densité du cerne (DC), du bois initial (DBI) et du bois final (DBF) ( $P < 0,0001$ ). Ce résultat est attendu puisque les variations intra-arbre de la densité (Figure 3.3) nous ont montré que ces caractères variaient fortement en fonction de l'âge cambial. De même, pour la croissance radiale de la largeur du cerne et du bois initial ( $P < 0,0001$ ) sauf pour la largeur du bois final qui n'est pas significatif ( $P < 0,39$ ). En effet, la Figure 3.4c montre que la variation du bois final est très faible par rapport à la variation de la largeur du bois initial et du cerne qui ont montré une diminution importante avec l'âge en allant de la moelle vers l'écorce.

L'effet de la famille est hautement significatif en ce qui concerne les critères de croissance (LC, LBI, LBF) et la densité du bois final (DBF) ( $P < 0,0001$ ). Cela veut dire qu'on a une grande variation pour les taux de croissance entre ces 19 familles. Ce résultat était déjà attendu comme l'indique le Tableau 3.1 où les coefficients de variations pour les largeurs du cerne étaient plus importants que celle de la densité.

L'analyse de la variance montre que l'effet du site sur la croissance (LC, LBI, LBF) et pour (DBI, DBF) est hautement significatif ( $P < 0,0001$ ). Cependant, l'effet du site n'était pas significatif pour la densité moyenne du cerne. En effet, le Tableau 3.1 a montré des CV plus importants pour les critères de croissance (CV = 21%) que pour la densité (CV = 7,9%). L'effet du site sur la croissance fait référence à l'influence de l'environnement sur le développement des arbres. La variation de la croissance est plus prononcée à Rollet qu'à Guyenne. Ceci s'explique par des différences de conditions de croissance entre les sites.

L'interaction famille  $\times$  site fait référence à la variation des effets de la famille d'arbres en fonction du site de plantation. En d'autres termes, cela signifie que l'effet ou l'influence d'une certaine famille d'arbres sur les caractéristiques ou le comportement des arbres peut varier selon le site où ils sont plantés. Les effets des interactions entre la famille et le site sont significatifs pour les composantes de la densité (DC, DBI, DBF) et de la largeur de cernes (LC, LBI, LBF), à l'exception de la proportion du bois final (PBF) n'était pas significatif. Ces effets indiquent que

la croissance des familles n'étaient pas les mêmes d'un site à l'autre. Cela confirme que les caractéristiques du site peuvent avoir des effets différents sur la qualité du bois. La proportion du bois final ne montre pas de différences significatives en fonction de l'interaction entre la famille et le site, cela pourrait indiquer que cette caractéristique spécifique du bois est moins sensible aux variations génétiques et environnementales dans cette étude.

L'interaction famille  $\times$  site met en évidence l'importance de considérer à la fois la génétique des arbres (la famille) et les conditions environnementales locales (le site) lors de l'évaluation ou de la prise de décision en matière de gestion forestière ou de sélection de plantations.

### 3.4 Analyse de génétique quantitative

Les corrélations génétiques et phénotypiques entre les caractères sont des indicateurs importants pour la sélection indirecte sur des caractères spécifiques. Elles pourraient guider le développement d'outils de sélection pour les génotypes souhaités dans les programmes d'amélioration.

Les corrélations génétiques étaient globalement plus élevées que les corrélations phénotypiques pour presque toutes les caractéristiques étudiées. Ceci souligne l'importance de prendre en compte les facteurs génétiques dans la compréhension et l'amélioration des caractères étudiés.

#### 3.4.1 Corrélations phénotypiques entre les propriétés du bois

Les coefficients de corrélation phénotypique entre les différents caractères sont présentés dans le Tableau (3.3) en dessus de la diagonale. On a trouvé des corrélations phénotypiques positives et significatives entre la densité du bois et ses composantes (DC, DBI, DBF). La corrélation phénotypique la plus élevée a été observée entre la densité du cerne (DC) et la densité du bois initial (DBI), avec un coefficient de corrélation de 0,94. De manière similaire, une forte corrélation phénotypique a été observée entre la largeur du cerne (LC) et la largeur du bois

initial (LBI) avec un coefficient de corrélation de 0,94. En revanche, la corrélation phénotypique la plus faible a été observée entre la DC et la largeur du bois final (LBF) avec un coefficient de corrélation de -0,06.

La corrélation entre la DC et DBI ( $r = 0,94$ ) est supérieure à celle entre la DC et DBF ( $r = 0,71$ ), qui est dû au fait que la proportion du bois initial (BI) dans le cerne est plus élevée que celle du bois final (DBF). Une corrélation positive et significative entre la DBI et DBF ( $r = 0,61$ ) a été trouvée. Ces relations positives entre ces caractéristiques correspondent également aux relations trouvées par Peltola et al. (2009) pour les pins sylvestres âgés de 20 ans en Finlande. Ces résultats suggèrent que les opportunités d'améliorer l'uniformité intra-cernes en ce qui concerne la densité du bois sont limitées.

Cependant, une faible corrélation négative a été observée pour la densité du cerne (DC), le bois initial (DBI) et les caractères de croissance (LC, LBI, LBF). Cette observation est attendue, car nous avons précédemment trouvé des profils radiaux opposés pour la densité et la largeur du cerne dans les premières parties de nos résultats. Cette faible corrélation négative indique que lorsque la densité du cerne augmente, la densité du bois initial et les caractères de croissance (LC et LBI) tendent à se diminuer légèrement. Cette relation peut être due à divers facteurs environnementaux et génétiques qui influent sur la formation du bois dans l'arbre. Chez l'épinette blanche (*Picea glauca*), les corrélations phénotypiques entre la densité et la largeur du cerne étaient négatives et significatives (Lamara et al., 2016 ; Mvolo., et al 2019.). Dans le cas du pin sylvestre, une étude a été réalisée sur des arbres âgés de 33 ans, localisés dans le sud-est de la Suède par Hannrup et al. (2000) qui ont observé des corrélations faibles et négatives entre la densité du bois et la croissance pour le bois juvénile, ce qui est cohérent avec notre étude.

En général, les caractères de croissance ont eu un effet négatif sur les composantes de la densité du bois à l'exception de DBF. La PBF est négativement corrélée avec la LC ( $r = -0,28$ ) ainsi que pour la LBI ( $r = -0,55$ ). Cependant, la PBF était positivement corrélée avec la LBF ( $r = 0,59$ ). Les corrélations entre les caractères

de croissance (LC, LBI, LBF) sont toutes positives. En effet, une forte corrélation est trouvée entre LC et LBI ( $r = 0,94$ ), alors qu'elle a été modérée pour LBF ( $r = 0,55$ ). Nos résultats se comparent avec des études antérieures portant sur le bois juvénile du cèdre blanc (Bouslimi et al., 2019) ainsi que sur le sapin baumier (Koga et Zhang, 2002). Les corrélations phénotypiques les plus faibles observées étaient entre DC, DBI et la PBF, cela signifie que la densité du cerne n'est pas fortement prédictive par la proportion du bois final (PBF).

#### 3.4.2 Corrélations génétiques entre les propriétés du bois

La corrélation génétique est une mesure importante dans le domaine de la génétique quantitative et de la sélection. Une corrélation génétique négative entre la croissance et la qualité du bois pourrait être d'une cause génétique ou environnementale (Lenz et al., 2013). Les corrélations génétiques étaient plus fortes que les corrélations phénotypiques (Tableau 3.3). La plupart des corrélations génétiques pour les caractéristiques de la densité et de la croissance étaient modérées ou fortes.

Les corrélations génétiques de la densité du bois final (DBF) étaient fortement corrélées avec les composantes de croissance (LC, LBI, LBF). Par exemple, la corrélation entre la DBF et la LC était de 0,98. Ces fortes corrélations génétiques suggèrent que la sélection d'une de ces caractéristiques dans le cadre des programmes d'amélioration, entraîne des changements significatifs dans les autres caractéristiques. Cependant, la DBF est corrélée négativement avec la PBF ( $r = -0,92$ ). Cette forte relation entre ces deux caractères indique que lorsque la densité du bois final augmente, la PBF diminue, et inversement. Cette observation suggère que les caractéristiques génétiques influent sur la composition et la structure du bois. Ces résultats pourraient avoir des implications importantes pour les programmes de sélection. La largeur du cerne (LC) était fortement corrélée avec la LBI et LBF ( $r = 0,98$  et  $r = 0,84$ ), ces valeurs indiquent que ces caractéristiques sont étroitement liées et que leur variation est principalement due à des facteurs génétiques. Des corrélations fortes et négatives entre la proportion du bois final

(PBF), LC et LBI ( $r = -0,95$  et  $r = -0,98$ ) ont été observées, ce qui signifie que les arbres ayant des caractères de croissance élevée et rapide ont tendance à avoir une proportion de bois final plus faible.

Dans la présente étude, les corrélations génotypiques étaient plus fortes que les corrélations phénotypiques pour toutes les propriétés du bois. Ces résultats pourraient s'expliquer par les influences environnementales qui affaiblissent les corrélations phénotypiques entre les propriétés du bois par rapport aux corrélations génotypiques. En d'autres termes, les variations observées dans les propriétés du bois peuvent être davantage influencées par les conditions environnementales plutôt que par les facteurs génétiques propres à chaque famille d'arbres. Cela souligne l'importance de prendre en compte les interactions entre les facteurs génétiques et environnementaux dans la compréhension des caractéristiques des arbres dans les plantations forestières.

#### 3.4.3 Valeurs de l'héritabilité

L'héritabilité est un paramètre important dans l'élaboration de stratégies de sélection. Les valeurs d'héritabilité au sens étroit et l'erreur standard pour chaque caractère du bois ont été estimées et sont présentées en diagonale du Tableau 3.3. Les caractéristiques de croissance, à savoir la largeur du cerne (LC) et la largeur du bois initial (LBI), ont démontré des héritabilités modérées qui se classent parmi les plus élevées dans l'ensemble des caractéristiques analysées. Ce qui suggère que les aspects génétiques jouent un rôle significatif dans la détermination de la variation de ces caractéristiques. Ces héritabilités indiquent la part de la variabilité observée dans ces caractéristiques qui peut être attribuée à des facteurs génétiques.

La densité du bois final (DBF) présente une héritabilité faible ( $h^2 = 0,2$ ). Cette valeur est très comparable à celle rapportée par Fries et al. (2008) pour l'ensemble de 10 premiers cernes de bois du pin sylvestre. Elle est supérieure à celle trouvée par Lenz et al. (2013) pour l'épinette blanche âgée de 15 ans ( $h^2 = 0,14$ ) et inférieure à celle rapportée pour le pin maritime âgé de 17 ans ( $h^2 = 0,26$ ) par Gaspar et al., (2008). Les estimations de l'héritabilité pour la largeur du cerne et les autres

caractères de croissance indiquent que la LC est sous contrôle génétique modéré ( $h^2 = 0,46$ ). Cette valeur est deux fois plus élevée que celle rapportée par Lenz et al. (2013) pour les jeunes arbres d'épinette blanche ( $h^2 = 0,23$ ). De plus, elle est supérieure à celle rapportée pour le pin sylvestre ( $h^2 = 0,2$ ) par Hong et al. (2015). La valeur d'héritabilité pour la LBI ( $h^2 = 0,5$ ) était plus élevée que celle du LBF ( $h^2 = 0,07$ ). En ce qui concerne la proportion de bois final (PBF), son héritabilité était faible ( $h^2 = 0,12$ ).

Les composantes de la croissance dans cette étude présentent une variation entre les familles et démontrent un contrôle génétique significatif. Pour les caractéristiques de la densité moyenne du cerne et la densité du bois initial, les variations selon les familles n'étaient pas significatives (Tableau 3.3;  $P > 0,07$  et  $P > 0,16$ ). Ces résultats suggèrent que les variations de ces deux composantes sont très probablement dues à des facteurs environnementaux et non génétiques.

Les valeurs d'héritabilité des différentes caractéristiques du bois ont été estimées pour les cernes 2, 3 et 7 et sont présentées dans le Tableau 3.4. L'analyse de ces valeurs d'héritabilité permet d'évaluer l'évolution de contrôle génétique au fil du temps. Les estimations de l'héritabilité pour la largeur du cerne diminuent avec l'âge en allant d'une valeur de 0,43 dans le 2<sup>e</sup> cerne à 0,24 dans le 7<sup>e</sup> cerne. Les valeurs de l'héritabilité pour la largeur du bois final étaient très faibles ( $h^2 = 0,07$  et  $h^2 = 0,02$ ) par rapport aux valeurs du bois initial ( $h^2 = 0,29$  et  $h^2 = 0,25$ ). Cela indique que le bois formé dans la saison de l'été est soumis à de fortes influences de l'environnement.

En conclusion, les estimations d'héritabilité étaient élevées pour les traits de croissance, alors que les héritabilités pour les traits de la densité étaient plus faibles. Dans la plupart des conifères, les valeurs de l'héritabilité pour les traits de la densité étaient toujours supérieures à celle de la croissance, mais dans notre cas c'est l'inverse puisque les arbres étudiés sont des arbres transplantés d'origine européenne, donc le changement sur leur hérédité est dû pour s'adapter aux changements de l'environnement et surtout le changement climatique.

**Tableau 3.3** Coefficients de corrélation phénotypique (erreurs standard entre parenthèses) entre les différents caractères (en dessus de la diagonale), coefficients de corrélation génétique (erreurs standard entre parenthèses) entre les différents caractères (en dessous de la diagonale), valeurs d'héritabilité au sens étroit en diagonale (avec les erreurs standard entre parenthèses).

Variables	DC	DBI	DBF	MaxD	MinD	LC	LBI	LBF	PBF	TransD
<b>DC</b>	<b>0</b>	0,94 (0,01)	0,71 (0,03)	0,66 (0,03)	0,89 (0,02)	-0,15 (0,04)	-0,15 (0,04)	- 0,06 (0,04)	0,07 (0,04)	0,78 (0,02)
<b>DBI</b>	NA	<b>0</b>	0,61 (0,03)	0,54 (0,03)	0,94 (0,01)	-0,13 (0,04)	- 0,08 (0,04)	- 0,17 (0,04)	- 0,08 (0,04)	0,75 (0,02)
<b>DBF</b>	NA (0)	NA (0)	<b>0,2</b> <b>(0,006)</b>	0,92 (0,01)	0,49 (0,03)	0,14 (0,04)	0,23 (0,04)	- 0,2 (0,43)	-0,37 (0,04)	0,95 (0,01)
<b>MaxD</b>	NA (0)	NA (0)	1 (0)	<b>0,25</b> <b>(0,00)</b>	0,43 (0,04)	0,17 (0,04)	0,20 (0,04)	- 0,01 (0,04)	- 0,19 (0,04)	0,85 (0,02)
<b>MinD</b>	NA	NA	NA (0)	NA (0,00)	<b>0</b>	- 0,23 (0,04)	- 0,21 (0,04)	- 0,16 (0,04)	0,02 (0,04)	0,62 (0,03)
<b>LC</b>	NA	NA	0,98 (0,00)	0,56 (0,00)	NA (0,00)	<b>0,46</b> <b>(0,07)</b>	0,94 (0,01)	0,55 (0,03)	- 0,28 (0,04)	0,12 (0,04)
<b>LBI</b>	NA	NA	0,99 (0)	0,77 (0,00)	NA	0,98 (0,04)	<b>0,5</b> <b>(0,08)</b>	0,25 (0,04)	-0,55 (0,03)	0,24 (0,04)
<b>LBF</b>	NA	NA	0,85 (0)	0,23 (0,00)	NA (0,00)	0,83 (0,05)	0,67 (0,07)	<b>0,07</b> <b>(0,08)</b>	0,59 (0,03)	-0,25 (0,04)
<b>PBF</b>	NA	NA (0)	-0,92 (0)	-0,85 (0,00)	NA	- 0,95 (0,003)	-0,98 (0,00)	- 0,57 (0,004)	<b>0,12</b> <b>(0,005)</b>	- 0,43 (0,04)
<b>TransD</b>	NA	NA (0)	0,99 (0)	1 (00)	NA	1 (0)	1 (0)	0,85 (0)	-1 (0)	<b>0,1</b> <b>(0,00)</b>

DC : densité moyenne; DBI : densité du bois initial; DBF : densité du bois final; MaxD : densité maximale; MinD : densité minimale; LC : largeur du cerne; LBI : largeur du bois initial; LBF : largeur du bois final; PBF : proportion du bois final; TransD : densité au point de transition

**Tableau 3.4** Valeurs de l'héritabilité au sens étroit pour les cernes 2, 3 et 7 avec l'erreur standard entre parenthèses.

Traits	DC	DBI	DBF	MaxD	LC	LBI	LBF	PBF
Cerne								
2	0,0062 (0,0001)	0,02 (0,0002)	0,04 (0,0002)	0,22 (0,0005)	0,43 (0,04)	0,29 (0,04)	0,07 (0,04)	-
3	-	-	-	-	0,27 (0,03)	0,25 (0,04)	0,02 (0,02)	-
7	-	-	-	0,06 (0,0003)	0,24 (0,04)	0,36 (0,07)	-	0,08 (0,002)

DC : densité moyenne; DBI : densité du bois initial; DBF : densité du bois final; MaxD : densité maximale; LC : largeur du cerne; LBI : largeur du bois initial; LBF : largeur du bois final; PBF : proportion du bois final.

### 3.5 Caractérisations des propriétés chimiques

#### 3.5.1 Méthodes conventionnelles

Le Tableau 3.5 présente la variation de la composition chimique du bois du pin sylvestre. Au total, 14 échantillons ont été analysés (différentes familles) prélevés du site Rollet. Les valeurs des propriétés du bois (extractibles, cellulose, lignine et hémicellulose) sont exprimées en fonction du poids sec de la poudre de bois. Les teneurs en extractibles sont assez proches pour l'ensemble des échantillons, qui varient de 10% à 14% de la matière sèche avec un écart type de 1,26. La teneur de la lignine insoluble dans l'acide (lignine Klason) varie de 23% à 32% avec un écart type de 2,84. Les valeurs de cellulose ont présenté une gamme assez large de pourcentages allant de 42% à 54% avec un écart type de 2,7. De même pour l'hémicellulose, les résultats ont montré une variation allant de 14% à 30%, avec un écart type d'environ 4,9. Ces

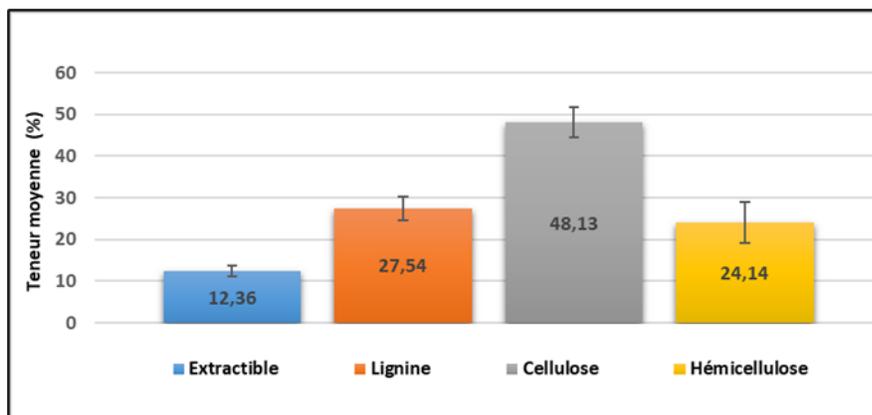
résultats seront par la suite utilisés pour la construction des modèles de calibration pour chaque composante en utilisant la spectroscopie infrarouge proche (NIRS).

**Tableau 3.5** Variation de la composition chimique en extractible, cellulose, hémicellulose et lignine du bois du pin sylvestre.

Échantillons	Extractible (%)	Lignine (%)	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)
<b>B3-F19-9</b>	10,5	25,1	45,5	28,9
<b>B5-F15-12</b>	10,6	23,5	49,5	26,5
<b>B5-F15-8</b>	13,3	28,5	49,4	21,5
<b>B1-F2-3</b>	13,3	30,7	45,4	23,8
<b>B5-F15-9</b>	12,3	28,6	50,1	21,2
<b>B5-F1-12</b>	14	25	50,6	24,3
<b>B3-F19-3</b>	11,6	25,9	49,2	24,8
<b>B2-F4-2</b>	12,6	29,8	50,4	19,7
<b>B4-F14-3</b>	13,1	32,4	43,5	24,1
<b>B2-F4-8</b>	12	23,3	42	34,1
<b>B2-F4-3</b>	13,6	27,9	47,1	25
<b>B4-F11-1</b>	13,8	27,7	53,2	19,1
<b>B5-F1-8</b>	10,3	25,9	43,5	30,
<b>B4-F11-3</b>	11,6	31,1	54,1	14,7
<b>Moyenne</b>	<b>12,36</b>	<b>27,54</b>	<b>48,13</b>	<b>24,14</b>
<b>Écart type (±)</b>	<b>1,26</b>	<b>2,84</b>	<b>3,7</b>	<b>4,9</b>

Les valeurs moyennes des extractibles, lignine, cellulose et hémicellulose sont 12,4%, 27,5%, 48,1% et 24,1%, respectivement (Figure 3.5). Selon l'étude d'Orsler et al. (1972), le bois juvénile du pin sylvestre contient 16,9% d'extractible et 28,3% de lignine. D'autres résultats obtenus par l'étude de Sable et al. (2012) sur la même espèce

indiquent des valeurs différentes pour la lignine, la cellulose et l'hémicellulose, soit 27,1%, 49% et 21%, respectivement.



**Figure 3.5** Valeurs moyennes d'extractibles, lignine, cellulose et hémicellulose par la méthode conventionnelle.

Les extractibles du bois sont des composés de faible masse moléculaire qui jouent un rôle important dans diverses applications. Par exemple, ils participent à la protection contre les champignons et les insectes, contribuent à la formation de la couleur du bois, ou ont des implications dans les processus de fabrication de la pâte à papier et d'autres produits dérivés du bois (Jansson et Niverbrant, 2009).

La teneur en extractibles pour les échantillons étudiés était élevée par rapport à d'autres espèces. Cette teneur est principalement due à l'âge de l'arbre. En effet, les arbres plus jeunes ont une teneur plus élevée en substances extractibles. Des recherches menées par Bao et al. (2011) sur 10 espèces d'arbres différentes ont confirmé que le bois juvénile se caractérise par une teneur plus élevée d'extractibles par rapport au bois mature.

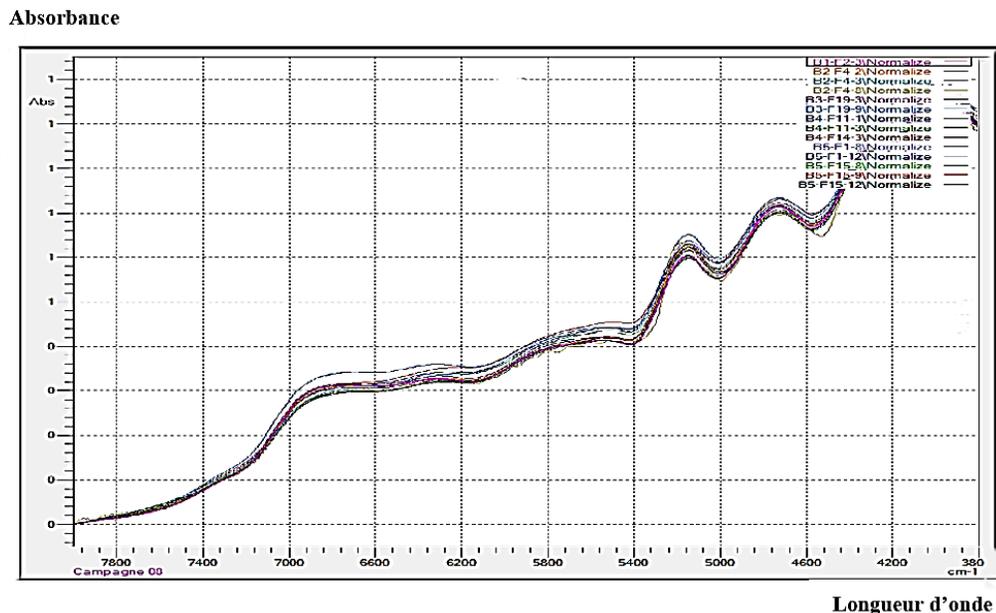
Les résultats ont démontré que les teneurs en cellulose et en lignine étaient supérieures à celles d'autres résineux tels que l'épinette noire et le sapin baumier (Koubaa et Zhang, 2009). Ces pourcentages suggèrent que le bois étudié est dense. Cela est confirmé

puisque les mesures de la densité ont révélé une valeur moyenne de  $459 \text{ kg/m}^3$  ce qui est élevé par rapport aux valeurs observées dans d'autres conifères.

L'étude de l'analyse de la variance sur les propriétés chimiques du bois est présentée dans le Tableau A2. Un effet faible, non significatif ( $P = 0,07$ ) a été observé entre les familles pour la cellulose. Aucun effet significatif du bloc et de la famille n'a été observé pour les autres composantes.

### 3.5.2 Spectroscopie par l'infrarouge proche (NIRS)

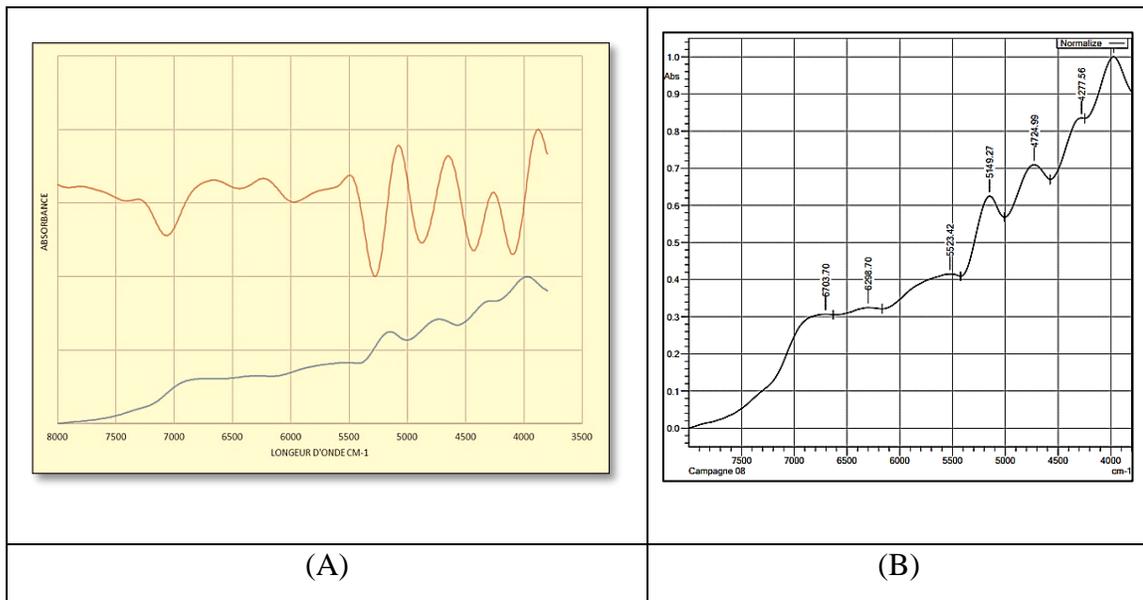
Les 14 échantillons de la poudre du bois ont fourni des spectres dans la région de  $8000 \text{ cm}^{-1}$  à  $3800 \text{ cm}^{-1}$ . Les Figures 3.6 et 3.7 représentent les spectres bruts prétraités et après dérivée seconde respectivement, afin d'éliminer les influences des variations externes liées à l'environnement (température et humidité de l'air, tassement de la poudre, homogénéité de la taille des particules) (Migeon, 2013).



**Figure 3.6** Spectres NIRS enregistrés pour les 14 échantillons analysés chimiquement après traitements statistiques (normalisation, smoothing).

La Figure 3.6 montre que toutes les courbes ont des formes et des schémas d'absorbance similaires. Dans ces spectres, on trouve un certain nombre de bandes qui indiquent la présence des principales composantes chimiques du bois, qui nous permettent de donner des résultats quantitatifs et qualitatifs sur la composition chimique de la matière analysée sous forme des liaisons moléculaires.

Les bandes présentées dans la Figure 3.7 montrent les spectres NIRS d'origine ainsi que la dérivée seconde du bois de pin sylvestre. Chaque pic correspond à une longueur d'onde indiquant la présence d'un groupement chimique spécifique. En nous basant sur des références bien établies dans la littérature, nous pourrions caractériser et attribuer une signification aux pics détectés. Les bandes d'absorption spécifiques au bois sont présentées dans cette figure et leurs attributions sont résumées dans le Tableau 3.6.



**Figure 3.7** Bande d'absorbance pour le bois du pin sylvestre : A) Spectre infrarouge proche (ligne bleue) et spectre de la dérivée seconde (ligne rouge). B) un spectre infrarouge enregistré pour un échantillon.

**Tableau 3.6** Attribution des bandes d'absorption représentatives.

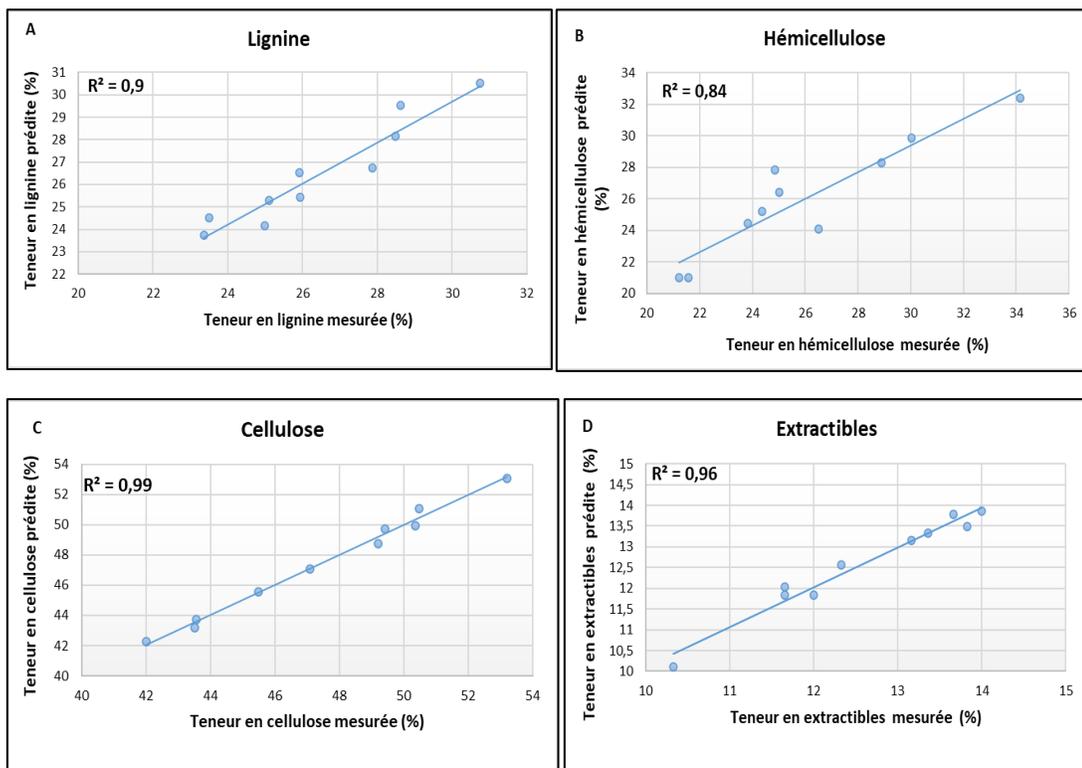
<b>Longueurs d'onde</b>	<b>Groupes</b>	<b>Composé chimique</b>	<b>Références</b>
3972,85	CO +CH	Cellulose	Bassett et al. (1963)
4277,56	CH + CH <sub>2</sub>	Cellulose	Tsuchikawa et al. (2005)
4724,99	CH+CO	Extractibles	Jones et al. (2006)
5149,27	OH + OH	Eau	Workman et Weyer (2007)
5523,42	CH	Lignine	Sandak et al. (2017)
6298,7	OH	Cellulose	Fackler et Schwanninger (2010)
6703,7	OH	Hémicellulose	Fackler et Schwanninger (2010)

### 3.5.3 Corrélations des résultats chimiques avec les spectres infrarouges

En utilisant les spectres NIRS comme variables prédictives et la composition chimique comme variable de réponse, des modèles de calibration ont été développés en utilisant la méthode de régression des moindres carrés partiels (PLS). Les modèles de calibration pour les compositions chimiques du bois sont présentés dans la Figure 3.8.

### 3.5.4 Construction des modèles de calibration

Les modèles ont été obtenus à partir des spectres des 10 échantillons pour chaque composante; extractibles, lignine insoluble, cellulose, et hémicellulose. Les diagrammes de dispersion des valeurs mesurées par rapport aux valeurs prédites pour la composition chimique du bois du pin sylvestre sont illustrés dans la Figure 3.8. Les résultats statistiques ainsi que les caractéristiques des modèles de calibration sont présentés dans le Tableau 3.7.



**Figure 3.8** Modèles de calibration obtenus après traitement statistique des résultats de dosage des lignines (A), hémicellulose (B), la cellulose (C), et des extractibles (D) des 10 échantillons et de leurs spectres infrarouges.

**Tableau 3.7** Caractéristiques des modèles de calibration obtenues par spectroscopie infrarouge proche sur 10 échantillons de pin sylvestre.

Composantes	Modèle	R <sup>2</sup>	N <sup>a</sup>	RMSEC <sup>b</sup>
<b>Lignine</b>	$Y = 0,9096X + 2,3925$	0,90	5	0,28
<b>Cellulose</b>	$Y = 0,9916X + 0,4007$	0,99	5	0,087
<b>Hémicellulose</b>	$Y = 0,8468X + 3,9888$	0,84	4	0,37
<b>Extractibles</b>	$Y = 0,9632X + 0,4635$	0,96	3	0,18

<sup>a</sup>Nombre de facteurs

<sup>b</sup>RMSEC : Erreur quadratique moyenne de calibration

Le coefficient de détermination, noté  $R^2$ , est une mesure de la qualité de la corrélation entre les valeurs réelles et les valeurs prédites. Il reflète la qualité du modèle et est calculé de la manière suivante :

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3-1)$$

Où  $\hat{Y}_i$  est la valeur prédite,  $Y_i$  est la valeur réelle mesurée et  $\bar{Y}$  la valeur moyenne observée.

Le nombre de facteurs  $N$  est un paramètre optimal pour la construction des modèles, optimisé afin d'expliquer la variance de l'ensemble d'étude tout en évitant le surajustement qui peut erroner le modèle. Si le nombre de facteurs est insuffisant, le modèle ne parvient pas à représenter intégralement les caractéristiques de l'échantillon, entraînant ainsi une précision de prédiction médiocre. En revanche, un nombre élevé de facteurs peut conduire à un surajustement des prédictions.

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne de la calibration (RMSEC) sont un outil pour évaluer la performance du modèle. Les composantes qui ont des RMSEC plus faibles comme l'extractible et la cellulose (0,18 et 0,087) ont des  $R^2$  plus élevés ( $R^2 = 0,96$  et  $R^2 = 0,99$ ). L'erreur dans le modèle de calibration de la teneur en extractibles est plus faible que celle de la lignine (0,28) qui est un polymère de structure très complexe, il est donc difficile de déterminer sa quantité exacte dans le bois.

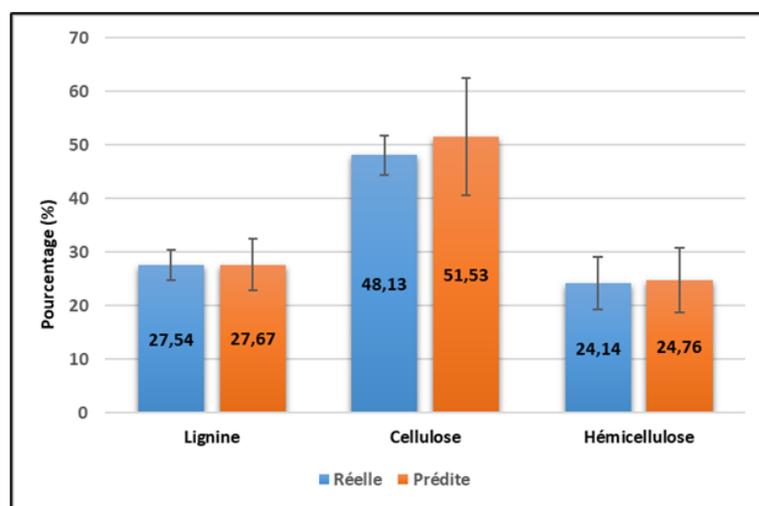
### 3.5.5 Application des modèles de calibration sur les carottes

Afin de tester nos modèles et les appliquer dans un contexte pratique, nous avons utilisé les carottes pour estimer et déterminer les teneurs des composants structurels du bois. Tout d'abord, les carottes ont été scannées à l'aide du NIR, puis les spectres obtenus ont été soumis à un traitement préalable comprenant le raffinement, la normalisation et la dérivation seconde. Ensuite, nous avons appliqué les modèles sur les spectres pour chaque carotte dans le but d'estimer les valeurs des composantes chimiques dans chaque échantillon. Les résultats des prédictions pour les échantillons de carottes sont

résumés dans le Tableau 3.8. Le nombre d'échantillons choisis pour chaque composant est lié à la présence de valeurs aberrantes. En raison d'erreurs instrumentales et de calibrage, ainsi que de contraintes liées aux échantillons, des valeurs aberrantes ont été observées dans nos données. Cependant, nous avons procédé à leur élimination afin de garantir la fiabilité de nos résultats.

**Tableau 3.8** Estimation des compositions chimiques des carottes par les modèles de calibration.

Composantes	Nombre d'échantillons	Intervalle (max-min)	Moyenne	Écart type	Erreur standard
Lignine	184	38,8-19,76	27,67	4,87	0,13
Cellulose	133	66,8-29,35	51,53	10,96	3,4
Hémicellulose	155	33,97-11,4	24,76	6,07	0,62



**Figure 3.9** Valeurs moyennes réelles (méthode conventionnelle) et prédites (méthode par spectroscopie infrarouge proche) des teneurs de la composition chimique du bois du pin sylvestre.

Les teneurs moyennes prédites pour la lignine, cellulose et hémicellulose des carottes sont proches des valeurs trouvées par les méthodes conventionnelles (Figure 3.9). En effet, pour évaluer la précision de nos modèles de calibration, nous avons calculé les erreurs standard (ES) entre les valeurs estimées et les valeurs réelles conventionnelles. Les valeurs des erreurs standard entre les deux méthodes de caractérisation étaient : 0,13 pour la lignine, 3,4 pour la cellulose et 0,62 pour l'hémicellulose (Tableau 3.8). Ces erreurs sont de faibles valeurs, ce qui indique que nos modèles de calibration sont fiables et sont applicables pour estimer la composition chimique du bois du pin sylvestre.

## Conclusion et implications pratiques

### 4.1 Conclusions

Les objectifs de cette étude étaient d'étudier la variation des propriétés du bois du pin sylvestre provenant de deux sites dans la région de l'Abitibi, en se basant sur la croissance, la caractérisation physique (densité) et chimique (teneur en cellulose, hémicellulose, lignine et extractibles), ainsi qu'une estimation des paramètres génétiques (héritabilité et corrélations génétiques et phénotypiques).

Les résultats de cette étude ont confirmé que la densité et la croissance variaient en fonction de l'âge cambial de l'arbre. L'analyse des patrons de la variation intra-arbres des attributs de la qualité du bois chez le pin sylvestre a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La densité du cerne et du bois initial présente une variation radiale similaire, avec une diminution pour les quatre premiers cernes près de la moelle, suivie d'une augmentation vers l'écorce. En ce qui concerne le bois final, la variation de la densité montrait une augmentation linéaire jusqu'à atteindre une valeur maximale près de l'écorce. Ces profils de variations sont comparables à ceux rapportés dans la littérature pour le bois juvénile dans plusieurs espèces.
- Pour la croissance radiale, la largeur du cerne et la largeur du bois initial variaient fortement en fonction de l'âge cambial de l'arbre, en effet elles diminuent en allant de la moelle vers l'écorce.
- L'âge cambial constitue une source de variation influençant les caractéristiques du bois. Il a un effet significatif sur des caractéristiques telles que la densité du bois et la largeur des cernes.
- Les liens entre les caractéristiques de la qualité du bois, comme sa densité et sa croissance, ont été analysés. Les corrélations entre les composantes de la densité du bois étaient à la fois fortes et positives. Cependant, les corrélations

entre la densité et les composantes de la croissance étaient généralement plus faibles et négatives, à l'exception de la densité du bois final.

- Pour les valeurs de l'héritabilité, les largeurs moyennes et initiales du cerne sont sous contrôle génétique modéré ( $h^2 = 0,5$ ) et que la densité du bois final est sous contrôle génétique faible ( $h^2 = 0,2$ ).
- La composition chimique du bois du pin sylvestre (extractibles, cellulose, hémicellulose et lignine) a été déterminée avec des méthodes conventionnelles. Les résultats obtenus par ces méthodes ont été utilisés pour construire des modèles de calibration fiables pour chaque propriété en utilisant la spectroscopie infrarouge proche.

## 4.2 Implications pratiques

Ce projet de recherche a permis d'explorer le comportement d'une espèce d'arbre originaire d'Europe dans les conditions climatiques et environnementales du Canada. Les résultats de cette étude ont permis d'acquérir des connaissances sur la qualité du bois du pin sylvestre au Canada et leurs utilisations potentielles dans les programmes d'amélioration génétique. Aussi, ils seront d'une grande importance pour les industries qui utilisent le bois du pin sylvestre comme matière première et permettront de choisir les bonnes sources génétiques pour assurer une meilleure qualité du bois. En outre, les différences remarquables dans les caractéristiques du bois entre les familles offrent la possibilité de sélectionner les familles les mieux adaptées à diverses applications.

Les résultats obtenus à travers la spectroscopie infrarouge proche (NIRS) confirment la possibilité de mesurer les composants chimiques structurels du bois en utilisant une méthode simple, rapide et non destructive par prélèvement d'échantillons (carottage), tout en permettant d'obtenir davantage d'informations sur les variations des propriétés chimiques au sein des arbres, sans les endommager.

## Références bibliographiques

- Azmul Huda, A. S. M., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R. E., Périnet, P., & Fortin, Y. (2018). Phenotypic and genotypic correlations for wood properties of hybrid poplar clones of Southern Quebec. *Forests*, 9(3).
- Bao, F. C., Jiang, Z. H., Jiang, X. M., Lu, X. X., Luo, X. Q., & Zhang, S. Y. (2001). Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology*, 35, 363-375.
- Bassett, K. H., Liang, C. Y., & Marchessault, R. H. (1963). The infrared spectrum of crystalline polysaccharides. The near infrared spectrum of cellulose. *Journal of Polymer Science Part A: General Papers*, 1(5), 1687-1692.
- Beaudoin, R. (2004). Perte de dominance apicale sur le pin sylvestre: symptômes visuels et microscopiques de carence en bore. Ministère des ressources naturelles, de la faune et des parcs, Direction de la recherche forestière.
- Benyoucef, S., & Harrache, D. (2015). Caractérisation de la microstructure de sciure de bois de pin sylvestre « *Pinus sylvestris* L. ». *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 6(3), 765-772.
- Bouslimi, B. (2014). Variation intra-arbre, intrasites et intrasites des attributs de la qualité du bois *Thuja occidentalis* (Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). 93-171.
- Braido Dos Santos. (2014). Variation intra-arbre de la croissance radiale, de la masse volumique et de la morphologie des trachéides du bois d'épinette noire avant et après traitement de coupes partielles. (Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). 48-53.
- Burdon, R. D., Kibblewhite, R. P., Walker, J. C., Megraw, R. A., Evans, R., & Cown, D. J. (2004). Juvenile versus mature wood: a new concept, orthogonal to corewood versus

- outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. *Forest science*, 50(4), 399-415.
- Caceres Cuadros, C. (2016). Influence de la qualité du bois sur les dimensions des copeaux produits par une équarrisseuse-fragmenteuse. (Thèse de doctorat, Université Laval).
- Carlisle, A., & Brown, A. H. F. (1968). *Pinus Sylvestris* L. *Journal of Ecology*, 56(1), 269-307.
- Dokken, K. M., Davis, L. C., & Marinkovic, N. S. (2005). Use of infrared microspectroscopy in plant growth and development. *Applied Spectroscopy Reviews*, 40(4), 301-326.
- Dumont, B. (2005). Guide des arbres, arbustes et conifères pour le Québec.
- Durrant, T. H., De Rigo, D., & Caudullo, G. (2016). *Pinus sylvestris* L. in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *European atlas of forest tree species*, 14, 845-846.
- Fackler, K., & Schwanninger, M. (2010). Polysaccharide degradation and lignin modification during brown rot of spruce wood: a polarised Fourier transform near infrared study. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18(6), 403-416.
- Falcon-Lang, H. J. (2005). Global climate analysis of growth rings in woods, and its implications for deep-time paleoclimate studies. *Paleobiology*, 31(3), 434-444.
- Farjon, A., & Filer, D. (2013). An atlas of the world's conifers: an analysis of their distribution, biogeography, diversity, and conservation status. Brill.
- Ferrer, F. (2019). Limites à l'utilisation d'un résistographe en micro-densitométrie: variations intercernes et intracernes de la croissance et de la masse volumique (Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). p16.
- Fries, A., & Ericsson, T. (2006). Estimating genetic parameters for wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Silvae Genetica*, 55(2), 84-92.

- Fries, A., & Ericsson, T. (2009). Genetic parameters for earlywood and latewood densities and development with increasing age in Scots pine. *Annals of Forest Science*, 66(4), 404–404.
- Funda, T., Fundova, I., Gorzsás, A., Fries, A., & Wu, H. X. (2020). Predicting the chemical composition of juvenile and mature woods in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using FTIR spectroscopy. *Wood Science and Technology*, 54(2), 289–311.
- Fundová, I. (2020). Quantitative genetics of wood quality traits in Scots pine. Swedish University of Agricultural Sciences. 19-40.
- Fundova, I., Funda, T., & Wu, H. X. (2019). Non-destructive assessment of wood stiffness in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and its use in forest tree improvement. *Forests*, 10(6), 491.
- Gaspar, M. J., Louzada, J. L., Aguiar, A., & Almeida, M. H. (2008). Genetic correlations between wood quality traits of *Pinus pinaster*. *Annals of Forest Science*, 65(7), 1.
- Giertych, M., & Mátyás, C. (1991). *Genetics of Scots pine*. Elsevier. Amsterdam, pp 19–26.
- Giroud, G. (2019). *Caractérisation de la qualité du bois : les propriétés du bois*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Gullichsen, J., Paulapuro, H., & Stenius, P. (2000). *Forest products chemistry. Paper Making Science and Technology. Book, 3*.
- Hannrup, B., Ekberg, I., & Persson, A. (2000). Genetic correlations among wood, growth capacity and stem traits in *Pinus sylvestris* L. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15(2), 161-170.
- Hart, J. F. (2010). *A review of the effects of silviculture on wood quality*. University of British Columbia. Wood 493.
- Hodge, G. R., & Purnell, R. C. (1993). Genetic parameter estimates for wood density, transition age, and radial growth in slash pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(9), 1881-1891.

- Hong, Z., Fries, A., & Wu, H. X. (2014). High negative genetic correlations between growth traits and wood properties suggest incorporating multiple traits selection including economic weights for the future Scots pine breeding programs. *Annals of Forest Science*, 71(4), 463-472.
- Hong, Z., Fries, A., & Wu, H. X. (2015). Age trend of heritability, genetic correlation, and efficiency of early selection for wood quality traits in Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7), 817–825.
- Jansson, M. B., & Nilvebrant, N. O. (2009). Wood extractives. *Wood chemistry and wood biotechnology (pulp and paper chemistry and technology)*, 147-171.
- Jones, P. D., Schimleck, L. R., Peter, G. F., Daniels, R. F., & Clark, A. (2006). Nondestructive estimation of wood chemical composition of sections of radial wood strips by diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *Wood Science and Technology*, 40, 709-720.
- Joyet, P. (2001). Caractérisation des qualités mécaniques du pin sylvestre. *Forêt méditerranéenne*, 22(1), 37-40.
- Jozsa, L.A., & Middleton, G.R. (1994). A discussion of wood quality attributes and their practical implications Forintek Canada Corp. Pub. special SP-34F. 42 p.
- Jyske, T., Mäkinen, H., & Saranpää, P. (2008). Wood density within Norway spruce stems.
- Kasraoui, H. (2011). Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la masse volumique du bois et sur la morphologie des trachéides du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb) (Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal).
- Katila, P., Galloway, G., Alfaro, R. I., Kanninen, M., Lobovikov, M., & Varjo, J. (2010). *Forests and society-responding to global drivers of change*. Vienna: IUFRO.
- Koga, S., & Zhang, S. Y. (2002). Relationships between wood density and annual growth rate components in balsam fir (*Abies balsamea*). *Wood and Fiber Science*, 146-157.
- Koubaa, A., Zhang, S. T., & Makni, S. (2002). Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of Forest Science*, 59(5-6), 511-518.

- Koubaa, A., Zhang, S. Y., Isabel, N., Beaulieu, J., & Bousquet, J. (2000). Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce. *Wood and Fiber Science*, 61-71.
- Lamara, M., Raheison, E., Lenz, P., Beaulieu, J., Bousquet, J., & MacKay, J. (2016). Genetic architecture of wood properties based on association analysis and co-expression networks in white spruce. *New Phytologist*, 210(1), 240-255.
- Larocque, G. R., & Marshall, P. L. (1995). Wood relative density development in red pine (*Pinus resinosa* Ait.) stands as affected by different initial spacings. *Forest Science*, 41(4), 709-728.
- Larson, P. R. (1972, December). Evaluating the quality of fast-grown coniferous wood. In *Proceedings of the 63<sup>rd</sup> Western Forestry Conference* (pp. 6-8). Seattle, Washington 6 Dec. 1972.
- Lenz, P., Auty, D., Achim, A., Beaulieu, J., & Mackay, J. (2013). Genetic improvement of white spruce mechanical wood traits early screening by means of acoustic velocity. *Forests*, 4(3), 575-594.
- Lenz, P., Cloutier, A., MacKay, J., & Beaulieu, J. (2010). Genetic control of wood properties in *Picea glauca* an analysis of trends with cambial age. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(4), 703-715.
- Mazet, J. F., Nepveu, G., Velling, P., & Deret-Varcin, E. (1990). Étude des effets de quelques paramètres sylvicoles et environnementaux sur la densité du bois de l'Epicéa commun, du Sapin pectiné et du Pin sylvestre dans le Nord-Est de la France. In *Actes du 3<sup>ème</sup> Colloque « Sciences et industrie du bois » ABBORA* (Vol. 2, pp. 537-546).
- Migeon, M. (2013). Etablissement de modèles de prédiction en spectrométrie proche infrarouge pour l'étude de la composition lignocellulosique du bois de peuplier noir (Thèse de doctorat, France. Institut Universitaire de Technologie de Tours (IUT de Tours), FRA.).
- Mounguengui, M. M., Lang, J., & Guiraud, M. (2008). Sedimentary dynamics and extensional structuring related to early Cretaceous rifting of Neocomian and Barremian

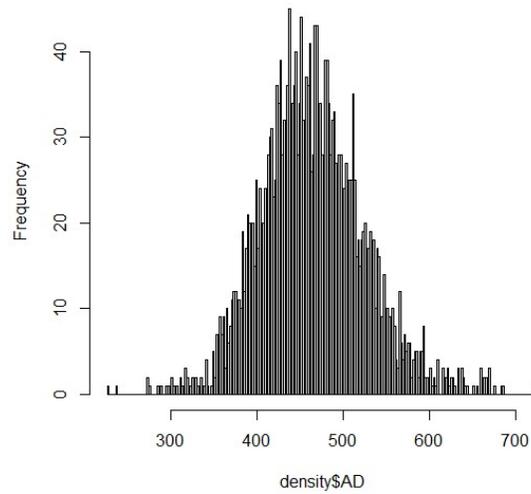
- deposits of the interior basin of Gabon. *Journal of African Earth Sciences*, 51(5), 239-256.
- Mullin, T., Andersson, B., Bastien, J., Beaulieu, J., Burdon, R., Dvorak, W., King, J., Kondo, T., Krakowski, J., Lee, S., McKeand, S., Pâques, L., Raffin, A., Russell, J., Skrøppa, T., Stoehr, M., & Yanchuk, A. (2011). Economic Importance, Breeding Objectives and Achievements. *In Genetics, Genomics and Breeding of Conifers*. Science Publishers. 40-127.
- Mutz, R., Guilley, E., Sauter, U. H., & Nepveu, G. (2004). Modelling juvenile-mature wood transition in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects models. *Annals of Forest Science*, 61(8), 831–841.
- Mvolo, C. S., Koubaa, A., Beaulieu, J., Cloutier, A., Defo, M., & Yemele, M. C. (2019). Phenotypic correlations among growth and selected wood properties in white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss). *Forests*, 10(7), 589.
- Orsler, R. J., Newman, P. L., & Laidlaw, R. A. (1972). Pulping of British-Grown Softwoods. Pt. VIII. A Study of Juvenile, Mature, and Top Wood in a Large Scots Pine Tree. 173-180.
- Panshin, A. J., & De Zeeuw, C. (1981). *Textbook of wood technology*. McGraw-Hill, New York. (pp. 772-pp).
- Park Y, Koubaa A., Brais S., & Mazerolle MJ (2009). Effects of cambial age and stem height on wood density and growth of jack pine grown in boreal stands. *Wood Fiber Sci* 41:346–358
- Peltola, H., Gort, J., Pulkkinen, P., Zubizarreta Gerendiain, A., Karppinen, J., & Ikonen, V. P. (2009). Differences in growth and wood density traits in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genetic entries grown at different spacing and sites. *Silva Fennica* 43(3): 339–354.
- Pettersen, R. C. (1984). The chemical composition of wood. *The chemistry of solid wood*, 207, 57-126.

- Pliura, A., Zhang, S. Y., MacKay, J., & Bousquet, J. (2007). Genotypic variation in wood density and growth traits of poplar hybrids at four clonal trials. *Forest Ecology and Management*, 238(1-3), 92-106.
- Ressources naturelles Canada (2023). Aperçu de l'industrie forestière du Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/forets/industrie-commerce/aperçu-lindustrie-forestiere-canada/13312>.
- Ressources naturelles Canada (2024). Données statistiques | Ressources naturelles Canada. <https://scf.rncan.gc.ca/profilstats/emploi/CA>.
- Rowell, R. M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC press.
- Ruotsalainen, S., & Persson, T. (2013). Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Best practice for tree breeding in Europe. *Skogforsk*, Uppsala, 49-64.
- Sable, I., Grinfelds, U., Jansons, A., Vikele, L., Irbe, I., Verovkins, A., & Treimanis, A. (2012). Pine wood and fibers. In *BioResources*. Vol. 7(2), 1771-1783.
- Sandak, A., Sandak, J., Waliszewska, B., Zborowska, M., & Mleczek, M. (2017). Selection of optimal conversion path for willow biomass assisted by near infrared spectroscopy. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 10(2), 506.
- Sauter, U. H., Mutz, R., & Munro, B. D. (1999). Determining juvenile-mature wood transition in Scots pine using latewood density. *Wood and Fiber Science*, 31(4), 416-425.
- Schimleck, L. R., Rezende, G. D., Demuner, B. J., & Downes, G. M. (2006). Estimation of Whole-tree Wood Quality Traits Using “Near Infrared Spectra” from Increment Cores. *Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment*, 59(3), 231-236.
- Schreiner, L., Bauer, P., & Buettner, A. (2018). Resolving the smell of wood - Identification of odour-active compounds in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Scientific Reports*, 8(1).
- Schwanninger, M., & Hinterstoisser, B. (2002). Klason lignin: Modifications to improve the precision of the standardized determination. *Holzforschung*, 56(2), 161-166.
- Sell, J., & Kropf, F. (1990). *Propriétés et caractéristiques des essences de bois*. Lignum.

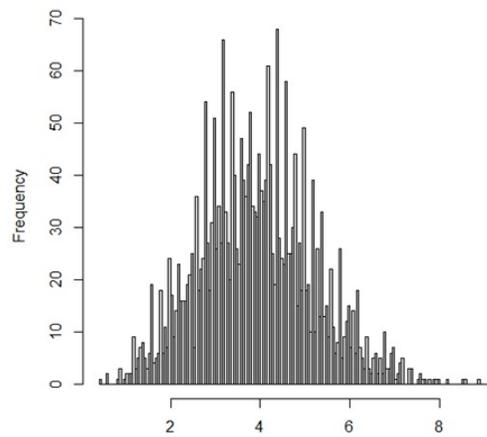
- Sjostrom, E. (1993). Wood chemistry: fundamentals and applications. Gulf professional publishing. Academic Press: San Diego, CA, USA.
- Tappi, T. (1988a). 204 om-88: Solvent extractives of wood and pulp. Technical Association of the Pulp and Paper Industry.
- Tappi, T. (1988b). 207 cm-88: Solubility in hot water. Technical Association of the Pulp and Paper Industry.
- Tappi, T. (1989). 264 cm-97: Preparation of Wood for Chemical Analysis. Technical Association of the Pulp and Paper Industry.
- Trouy, M.C. (2015). Anatomie du bois : Formation, fonctions et identification. Editions Quae. 151 p.
- Tsuchikawa, S., Yonenobu, H., & Siesler, H. W. (2005). Near-infrared spectroscopic observation of the ageing process in archaeological wood using a deuterium exchange method. *Analyst*, 130(3), 379-384.
- Wang, M.L., & Stewart, J.D. (2012). Determining the transition from juvenile to mature wood microfibril angle in lodgepole pine: a comparison of six different two-segment models. *Annals of forest science*. 69(8): 927–937.
- Workman Jr, J., & Weyer, L. (2007). Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy. CRC press. 344 p. Boca Raton.
- Zhang, S. Y., & Chui, Y. H. (1996). Selecting dry fiber weight for higher and better-quality jack pine fiber production. *Wood and Fiber Science*, 146-152. Vol 28.
- Zhang, S. Y., & Jiang, Z. H. (1998). Variability of selected wood characteristics in 40 half-sib families of black spruce (*Picea mariana*). *Wood science and technology*, 32, 71-82.
- Zhang, S. Y., & Koubaa, A. (2009). Les résineux de l'Est du Canada: Écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. FP Innovations.
- Zobel, B. J., & Jett, J. B. (1995). Genetics of wood production. Springer Science & Business Media. Verlag, Berlin.

Zobel, B. J., & van Buijtenen, J. P. (1989). Wood variation and wood properties. Wood variation: its causes and control, 1-32. Verlag, Berlin.

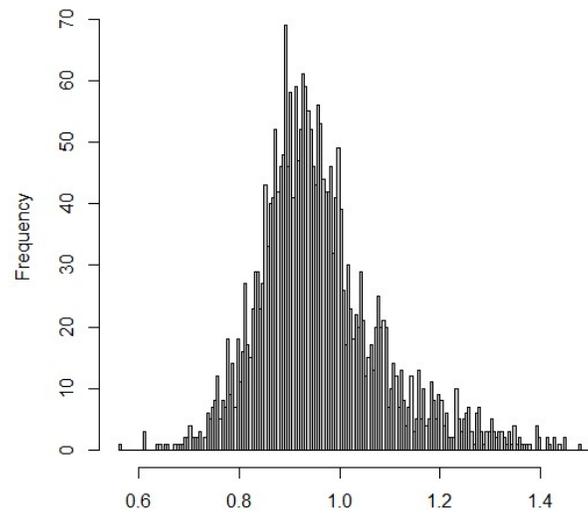
## Annexes



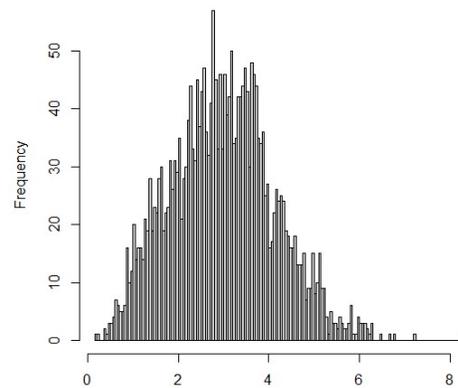
**Figure A1:** Distribution des valeurs de la densité moyenne pour tous les échantillons.



**Figure A2 :** Distribution des valeurs de la largeur moyenne des cernes pour tous les échantillons.



**Figure A3:** Distribution des valeurs de la largeur du bois final pour tous les échantillons.



**Figure A4 :** Distribution des valeurs de la largeur du bois initial pour tous les échantillons.

**Tableau A1.** Information détaillée sur les échantillons dans les deux sites.

Numéro	Famille
F1	Suukoozero
F2	Moskva-3
F3	Sosnovec
F4	Chala
F5	Kivach-15
F6	Olonez-10
F7	Kalevala-669
F9	Olonez-13
F10	Olonez-8
F11	Kastenka-216
F13	Lachdenoch-15
F14	Olonez-2
F15	Soztavala
F17	Uzbozero-674
F19	Kastenka-217
F20	Lachdenoch-36
F21	Olonez-14
F22	Olonez-5
F23	Olonez-3

**Tableau A2.** Résultats de l'analyse de variance sur les propriétés chimiques.

<b>Source de variation</b>	<b>Bloc</b>		<b>Famille</b>	
	Valeur de F	Valeur de P	Valeur de F	Valeur de P
<b>Propriétés</b>				
Cellulose	0,805	0,5593	3,920	0,0721
Hémicellulose	1,119	0,419	1,215	0,352
Lignine	1,971	0,204	0,644	0,553
Extractible	0,683	0,626	0,028	0,973