



BIBLIOTHÈQUE

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

Mise en garde

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

Warning

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

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DU BOIS DES
PEUPLIERS HYBRIDES ET DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES DE LEUR
PRÉDICTION PAR INFRA-ROUGE PROCHE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE

PAR

SIRINE BALI

NOVEMBRE 2023

DÉDICACE

À tous ceux qui me sont chers, ce travail est pour vous...

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Ahmed Koubaa pour la confiance qu'il m'a accordée en m'offrant l'opportunité de rejoindre son laboratoire et en me permettant de faire partie de son équipe de recherche.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes codirecteurs, monsieur Mohamed Amine Ben Souf, professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), madame Annie DesRochers, professeure à l'Institut de Recherche sur les Forêts (IRF) de Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), et monsieur Cyriac Mvolo, Chercheur scientifique à Ressources Naturelles Canada (RNCan), pour leur soutien et pour leur grande contribution dans la réussite de ce projet.

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements à M. William Belhadeb, qui a accompagné mes premiers pas au sein du laboratoire et ses suggestions constructives et efficaces et les solutions qu'il a proposées à chaque fois que nous avons eu un problème.

J'exprime également ma gratitude à l'égard des membres de IRF pour leur soutien multiforme.

Je remercie finalement toute personne ayant contribué à la réussite de mon projet de maîtrise, d'une manière ou d'autre.

AVANT-PROPOS

Ce travail de recherche est le fruit d'une collaboration entre l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) et l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS). Il est mené sous la direction du professeur Ahmed Koubaa, titulaire de la Chaire de Recherche du Canada sur la Valorisation, la Caractérisation et la Transformation du bois (CRC-VACAT).

La rédaction de ce rapport suit les normes classiques de présentation relatives aux programmes d'études supérieures en génie de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Ce mémoire porte sur la compréhension des sources de variation des propriétés physiques (masse volumique basale, et les proportions de surface de l'aubier, duramen, et écorce) et chimiques (extractibles, lignines, celluloses et hémicelluloses) du bois de peuplier hybride, mais aussi sur le développement de modèles permettant de prédire les propriétés chimiques. Dans ce but ce travail s'articule autour de cinq parties, à savoir : une introduction générale, trois chapitres et une conclusion. Le premier chapitre est dédié à la description de l'état des connaissances et la revue bibliographique. Le deuxième chapitre décrit la démarche expérimentale adoptée lors des essais. Le troisième chapitre aborde en détail les résultats de l'étude, présentés en trois sections. D'abord, la première section porte sur la variation des propriétés physiques. Ensuite, la variation des composantes chimiques du bois de l'aubier et de duramen sont étudiées. Finalement, la troisième partie est dédiée au développement des modèles prédictifs des propriétés chimiques du bois des peupliers hybrides.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
AVANT-PROPOS	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
RÉSUMÉ	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Généralités sur les espèces de peupliers.....	3
1.1.1 Historique.....	3
1.1.2 La biologie des peupliers	3
1.1.3 Morphologie du peuplier.....	3
1.1.4 Hybridation du peuplier	4
1.1.5 Distribution et culture du peuplier	5
1.1.6 Culture du peuplier au Canada.....	5
1.1.7 Culture du peuplier au Québec.....	5
1.2 Le bois : formation et composition.....	6
1.2.1 Formation du bois	6
1.2.2 Duraminisation.....	7

1.2.3	Les principales parties du bois	8
1.3	Composition chimique du bois.....	10
1.3.1	Principaux éléments constitutifs de la paroi cellulaire du bois	10
1.4	Les propriétés du bois de peuplier hybride et son potentiel d’usage dans les produits du bois.....	15
1.4.1	Les propriétés anatomiques et potentiel d'application	15
1.4.2	Les propriétés physiques et potentiel d'application.....	15
1.4.3	Les propriétés mécaniques et potentiel d’application	16
1.4.4	Les propriétés chimiques.....	16
1.5	Les facteurs qui influent sur les propriétés du bois de peuplier hybride	19
1.5.1	Age de l’arbre.....	19
1.5.2	Conditions de croissance.....	20
1.6	La spectroscopie infrarouge proche.....	22
1.5.1	Propriétés anatomiques	23
1.5.2	Propriétés physiques	23
1.5.3	Propriétés mécaniques.....	23
1.5.4	Propriétés chimiques	24
1.7	Modèles de prédiction	25
CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES		26
2.1	Problématique, objectifs et hypothèses du présent travail.....	26
2.1.1	Problématique	26
2.1.2	Objectifs	26
2.1.3	Hypothèses	27

2.2	Matériel	27
2.2.1	Choix et localisation des sites expérimentaux	27
2.2.2	Échantillonnage.....	28
2.3	Méthode.....	29
2.3.1	Mesures	29
2.3.2	Caractérisations chimiques.....	31
2.3.3	Caractérisation physique : Masse volumique basale.....	35
2.3.4	Spectroscopie infrarouge-proche	36
2.3.5	Analyse statistique	40
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION		41
3.1	Propriétés physiques.....	41
3.1.1	Variations de l'aubier, duramen, et écorce.....	41
3.1.2	Masse volumique basale	45
3.2	Propriétés chimiques	49
3.2.1	Variation entre les sites	50
3.2.2	Effet du clone et son interaction avec le site sur les constituants chimiques	52
3.2.3	Effet de l'espacement.....	55
3.2.4	Variation moyenne dans l'aubier et le duramen	56
3.2.5	Corrélation entre les propriétés chimiques.....	57
3.3	Modèles de prédiction par spectroscopie infrarouge proche.....	58
3.3.1	Spectre.....	58
3.3.2	Prédiction des propriétés chimiques.....	59

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	65
RÉFÉRENCES.....	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Morphologie des feuilles contrastée chez le peuplier : (a) <i>Populus balsamifera</i> , (b) <i>Populus deltoides</i> , (U) les surfaces supérieure et (L) les surfaces inférieure (Cronk 2005).....	4
Figure 1.2 : Développement des cellules du xylème (Cuny et Rathgeber 2021).....	7
Figure 1.3 : Illustration d'une section transversale d'une tige de bois montrant les parties de l'arbre (Thi 2017).	9
Figure 1.4 : Structure de la paroi cellulaire (Vallejo-Montesinos, Muñoz et coll. 2016).	10
Figure 1.5 : Représentation schématique d'une molécule de cellulose (Claisse 2012).	11
Figure 1.6 : Formules chimiques de différents sucres composant les hémicelluloses (Saha Tchinda 2015).....	12
Figure 1.7 : Monomères constitutifs de la lignine (Ghalia et Dahman 2017).....	13
Figure 1.8 : Structure microscopique du bois (Plomion, Leprovost et coll. 2001).	14
Figure 1.9 : Bandes d'absorption dans la région d'infrarouge proche et spectres typiques d'un échantillon de biomasse solide (Skvaril, Kyprianidis et coll. 2017).	22
Figure 2.1 : Localisation des sites expérimentaux	28
Figure 2.2 : Échantillonnage et dimensions de billots	29
Figure 2.3 : Étapes de mesures avec ImageJ.....	30
Figure 2.4 : Aubier et duramen séparés	31
Figure 2.5 : Aubier et duramen broyés.....	31
Figure 2.6 : Système d'extraction	32
Figure 2.7 : Poudre de bois imprégnée avec l'acide sulfurique	33
Figure 2.8 : Système d'extraction de la lignine KLASON via un autoclave de type presto/cuiseur rapide (VWR Canada)	33

Figure 2.9 : Lignine.....	34
Figure 2.10 : Plaquette de bois.....	36
Figure 2.11 : Appareil d'analyse par la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (Shimadzu IR Tracer-100, kyoto, Japon).	36
Figure 2.12 : Échantillons SPIR (Aubier, Duramen)	37
Figure 2.13 : les étapes de prétraitement des spectres dans l'infrarouge proche. a) données brutes. b) données normalisées. c) données après dérivée première. d) données après dérivée seconde.....	39
Figure 3.1 : Variation longitudinale moyenne en fonction de la hauteur des proportions de l'aubier, du duramen et de l'écorce	42
Figure 3.2 : Variation des proportions en surface de l'aubier, duramen et écorce sur chaque site.....	44
Figure 3.3 : Variation entre les clones des proportions moyenne en surface en aubier et duramen.....	45
Figure 3.4 : Variation de la masse volumique basale moyenne entre les sites	47
Figure 3.5 : Variation de la masse volumique basale moyenne pour chaque clone....	48
Figure 3.6 : Variation de la masse volumique basale moyenne entre les trois espacements.....	48
Figure 3.7 : Variation des constituants chimiques entre sites	52
Figure 3.8 : Variation des constituants chimiques selon le clone et les sites.....	54
Figure 3.9 : Variation des teneurs en extractible selon l'espacement	55
Figure 3.10 : Spectre infrarouge proche d'un échantillon pour l'aubier et le duramen	59
Figure 3.11 : Les modèles de prédictions des propriétés chimiques.....	60
Figure 3.12 : Modèles de prédiction des extractibles pour chaque facteur.	61
Figure 3.13 : Modèles de prédiction des lignines pour chaque facteur.....	62
Figure 3.14 : Modèles de prédiction des celluloses pour chaque facteur.....	63
Figure 3.15 : Modèles de prédiction des hémicelluloses pour chaque facteur.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Propriétés chimiques de diverses espèces de peupliers et de leurs hybrides.....	18
Tableau 2.1 : Les clones d'étude.....	29
Tableau 3.1 : Résultats de l'analyse de la variance des proportions de surface de l'aubier, duramen et écorce des clones de peuplier hybride (Valeurs de F et niveau de signification)	43
Tableau 3.2 : Résultats de l'analyse de variance de la masse volumique basale	46
Tableau 3.3 : Variation de la composition chimique dans l'aubier et le duramen.....	49
Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse de la variance des propriétés chimiques (Valeurs de F et niveau de signification)	51
Tableau 3.5 : Coefficients de corrélation de Pearson entre les propriétés chimiques des clones de peuplier hybride	58

RÉSUMÉ

Grâce à sa remarquable productivité, le peuplier hybride présente un intérêt pour l'industrie forestière. Ses meilleurs clones ont des caractéristiques du bois similaires, voire supérieures, à celles du peuplier faux-tremble. Ils possèdent un grand potentiel d'utilisation pour différentes applications dont les pâtes et papiers, les panneaux de bois et la bioénergie. Cependant, peu d'information est disponible sur les propriétés chimiques de leur bois. Ces dernières déterminent leur potentiel d'utilisation pour diverses applications, dont les bioproduits et la bioénergie. Les méthodes de caractérisation conventionnelles des propriétés chimiques sont destructives et très coûteuses. L'utilisation de la spectroscopie infrarouge permet de caractériser la chimie de surface des fibres de bois sans les quantifier. Par contre, l'infrarouge proche permet de quantifier la composition chimique du bois en utilisant des modèles de prédiction spécifiques à chaque essence de bois. Ainsi, l'objectif général de ce travail de recherche est de caractériser et de quantifier les propriétés chimiques du bois de différents clones de peuplier hybride par spectroscopie infrarouge proche. Les objectifs spécifiques sont : 1) Évaluer les proportions de l'aubier et du duramen du bois des différents clones de peuplier hybride; 2) Évaluer la densité basale et les proportions des composants chimiques du bois de l'aubier et du duramen de ces clones; 3) Analyser la chimie de surface du bois de ces clones par spectroscopie infrarouge proche; 4) développer des modèles de prédiction des propriétés chimiques du bois des peupliers hybrides à partir des résultats de spectroscopie infrarouge proche. Les teneurs en lignine, cellulose, hémicelluloses et en extractibles sont déterminés selon les normes en vigueur. Les données de la spectroscopie infrarouge proche combinées aux données de référence ont permis de développer des modèles prédictifs de la composition chimique du bois des peupliers hybrides.

Mots clés : Peupliers hybrides, Propriétés physico-chimiques du bois, Spectroscopie infrarouge proche, Chimie de surface

ABSTRACT

Thanks to its exceptional productivity, hybrid poplar attracts interest in the forestry industry. Its best clones have similar or superior wood characteristics to those of aspen. They can be used for various applications, including pulp and paper, wood panels, and bioenergy. However, more information is needed on the chemical properties of their wood. These properties determine their potential for use in various applications, including bioproducts and bioenergy. The conventional methods for characterizing the chemical properties are destructive and very expensive. The surface chemistry of wood fibers can be characterized by infrared spectroscopy without quantifying them. However, near-infrared allows the chemical composition of wood to be quantified using specific prediction models for each wood species. Therefore, the general objective of this research work was to characterize and quantify the chemical properties of wood from different hybrid poplar clones using near-infrared spectroscopy. The specific objectives were: 1) to evaluate the proportions of sapwood and heartwood of different hybrid poplar clones; 2) to evaluate the basal density and proportions of chemical components of the sapwood and heartwood of these clones; 3) to analyze the surface chemistry of the wood of these clones by near-infrared spectroscopy; and 4) to develop predictive models of the chemical properties of the wood of hybrid poplars from the results of near-infrared spectroscopy. Lignin, cellulose, hemicelluloses, and extractive contents were determined according to the current standards. The near-infrared spectroscopy data combined with reference data allowed the development of predictive models of the chemical composition of hybrid poplar wood.

Keywords: Hybrid poplars, Physicochemical properties of wood, Near-infrared spectroscopy, Surface chemistry.

INTRODUCTION

Le bois est l'une des plus importantes ressources renouvelables, qui ont été exploitées depuis des siècles par les êtres humains. Selon de nombreuses prévisions, la consommation des matériaux fibreux dans l'industrie du bois continuera à augmenter de façon régulière dans le monde entier jusqu'en 2050 au moins (Kircher 2022). Pour satisfaire cette demande, les forêts plantées enregistrent une augmentation progressive et prédomineront dans de vastes régions du monde en tant que future source durable de bois (FAO 2022).

Dans ce contexte, la sylviculture à courte rotation est une bonne stratégie pour répondre à la demande de production de biomasse, en particulier la consommation d'énergie, afin de remplacer les combustibles fossiles. Elle consiste à cultiver sur des terres agricoles de faible qualité des arbres à croissance rapide capables d'atteindre leur taille optimale au bout de 15 à 18 ans. Les saules (*Salix* spp.) et les peupliers (*Populus* spp.) sont des espèces adaptées au taillis à courte rotation, étant donné qu'elles sont récoltées à des intervalles beaucoup plus courts, de 1 à 5 ans et de 4 à 10 ans respectivement, favorisant les systèmes de production agricole (Daugaviete, Makovskis et coll. 2022).

Le peuplier fait aujourd'hui l'objet d'une attention particulière et sa culture semble prédominante dans plusieurs secteurs, en tant que biomasse pour les énergies renouvelables, ainsi que pour la production de la pâte à papier, les panneaux à lamelles orientées (OSB), et même pour la fabrication de contreplaqué (Buchman, Jackson et coll. 2020).

Toutefois, les propriétés physiques comme la masse volumique du bois, est considérée comme l'indicateur le plus important pour déterminer les propriétés mécaniques et autres propriétés physiques, indépendamment du type de bois, mais elle varie selon le site et le clone (Huda, Koubaa et coll. 2014) . Les proportions de bois de cœur, d'aubier

et d'écorce définissent le volume de la partie utilisable du bois, sa durabilité et son potentiel d'utilisation. Celles-ci varient considérablement selon la hauteur de la tige (Rodriguez-Perez, Moya et coll. 2022), en fonction du site, de la localisation géographique, des conditions environnementales (Moya, Bond et coll. 2014), et de l'espacement entre les arbres (Brito, Vidaurre et coll. 2019). En outre, ces différents tissus de bois varient en termes de composition chimique, étant donné que chaque composant de la biomasse lignocellulosique (cellulose, hémicelluloses, lignines, et matières extractibles) suscite un intérêt particulier dans différentes applications industrielles. Dans ce but, la caractérisation chimique du bois est une nécessité pour les industries. Toutefois, les méthodes conventionnelles demandent beaucoup de temps et d'argent. Afin de surmonter ces problèmes, la méthode de spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) est une solution fiable, permettant d'évaluer les propriétés du bois rapidement et à faible coût, sans destruction de l'échantillon à analyser (Hein, Pakkanen et coll. 2017). Plusieurs études ont validé la capacité de la technique SPIR à identifier différentes caractéristiques, notamment celle menée par Jia, Wang et coll. (2021) qui ont évalué les propriétés physiques et mécaniques des peupliers hybrides. Selon une autre approche, (Inagaki, Schwanninger et coll. 2012), la spectroscopie dans le proche infrarouge a permis de prédire la densité et la longueur des fibres d'Eucalyptus. Cependant, la littérature concernant la prédiction des propriétés chimiques des peupliers hybrides est limitée, avec des exemples dans les études de Maranan et Laborie (2008), ainsi que dans celle de Huang, Li et coll (2008).

Notre objectif dans la présente étude se focalise sur la caractérisation du bois des peupliers hybrides. Elle vise en particulier à identifier les facteurs affectant les propriétés physiques (les proportions d'aubier, duramen, et écorce, ainsi que la masse volumique basale), et les propriétés chimiques (extractibles, lignines, hémicelluloses, cellulose), afin d'établir des modèles prédictifs de ces dernières.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Généralités sur les espèces de peupliers

1.1.1 Historique

Les peupliers poussent sur le territoire canadien depuis la disparition des calottes glaciaires de la dernière période glaciaire. La population autochtone avait alors adopté les peupliers comme étant des arbres précieux en raison de leurs bienfaits sur la santé. Ensuite, avant la création de la frontière entre le Canada et les États-Unis, des explorateurs européens ont commencé à s'intéresser aux espèces de peuplier dont ils ont importé et cultivé certaines graines dans leurs jardins. Vers les années 1750, des hybridations se produisent entre les peupliers nord-américains et européens, lesquelles ont été amenées par des immigrants au Canada et aux États-Unis (Richardson, Cooke et coll. 2007).

1.1.2 La biologie des peupliers

Les peupliers comptent parmi les représentants de la famille des Salicaceae. La classification des peupliers en fonction de leurs caractéristiques morphologiques et écologiques permet de les regrouper en 6 sections : *Abaso*, *Turanga*, *Leucoïdes*, *Aigeiros*, *Tacamahaca*, et *Populus*, et environ 30 espèces (Dickmann 2001). De ces espèces, seulement 5 sont originaires du Canada: de la section *Aigeiros*, citons le peuplier deltoïde (*Populus deltoides*), de celle du *Tacamahaca*, le peuplier de l'ouest (*P. trichocarpa*), le peuplier baumier (*P. balsamifera*) et le peuplier à feuilles étroites (*P. angustifolia*), finalement de la section *Populus*, le peuplier faux-tremble (*P. tremuloides*) (Farrar 1995).

1.1.3 Morphologie du peuplier

Bien que les peupliers se caractérisent par une croissance rapide, ces espèces disposent d'une tige de hauteur importante, droite, revêtue d'une écorce fine

(Dickmann 2001). De plus, elles sont dotées de simples feuilles caduques, mais variables d'un peuplier à l'autre. Donc pour faire la différence entre les peupliers, il faut bien examiner les feuilles. D'après Cronk (2005), la feuille du peuplier baumier, possède une différence de couleur entre les faces avec un court pétiole, par contre celle du peuplier deltoïde, est de forme isobilatérale avec un pétiole long (Figure 1.1).

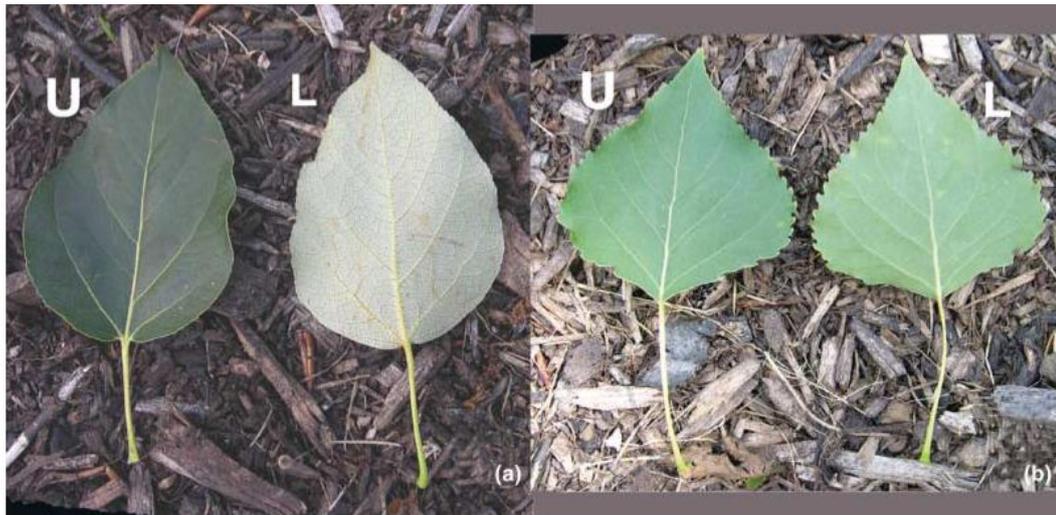


Figure 1.1 : Morphologie des feuilles contrastée chez le peuplier : (a) *Populus balsamifera*, (b) *Populus deltoides*, (U) les surfaces supérieure et (L) les surfaces inférieure (Cronk 2005).

1.1.4 Hybridation du peuplier

L'hybridation est un phénomène qui se produit naturellement entre deux espèces différentes par pollinisation, et qui conduit à la création d'un individu qui partage les propriétés de ses parents (Marques, Draper et coll. 2014). Toutefois, ce processus entre les peupliers, peut être soit intrasectionnel, c'est-à-dire un croisement dans la même section, citons l'hybride *P. x canadensis*, qui résulte d'un croisement entre l'espèce nord-américaine *P. deltoides* et l'espèce européenne *P. nigra*, soit intersectionnelle, c'est-à-dire qu'elle se produit entre deux sections comme c'est le cas pour l'hybride *P. x jackii* le fruit du croisement des espèces *P. balsamifera* L. et *P. deltoides* en Amérique du Nord. Seules les espèces de la section

Populus sont exclues de l'hybridation intrasectionnelle en raison de l'incompatibilité du croisement (Talbot 2011).

1.1.5 Distribution et culture du peuplier

La culture des peupliers est très répandue dans le monde, principalement dans l'hémisphère nord, allant des tropiques équatoriaux aux limites latitudinales et altitudinales de la croissance des arbres, ainsi qu'à l'hémisphère sud (Isebrands, Aronsson et coll. 2014). La culture des peupliers se développe sur des sites profonds dotés d'une texture de sol fine pour une meilleure humidité et une bonne irrigation, ayant une luminosité et des températures importantes (Fortier, Truax et coll. 2012). La Commission internationale du peuplier (CIP) mentionne que la superficie des forêts de peupliers, en 2016, était de 54,5 millions d'hectares principalement en Russie, au Canada, aux États-Unis et en Chine (Food and Agricultural Organization 2016).

1.1.6 Culture du peuplier au Canada

Au Canada, le peuplier est une ressource naturelle ayant un potentiel économique et environnemental important. Pour cela, des programmes de sélection et d'amélioration génétique du peuplier ont débuté en Ontario en 1930, puis au Québec dans les années 1950, ensuite en Alberta à partir de 1990. Aujourd'hui, les méthodes de la culture intensive à courte rotation (CIRC) pour les plantations de peupliers hybrides au Canada visent à fournir de la pâte ou de la fibre de bois pour une variété de produits de bois d'ingénierie comme les panneaux OSB (Derbowka, Andersen et coll. 2012).

1.1.7 Culture du peuplier au Québec

Au Québec, le programme de sélection et d'amélioration génétique a été lancé par le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) en 1969. Ce programme visait à développer des hybrides résistants aux maladies et à haut rendement qui peuvent bien pousser dans les différentes conditions bioclimatiques du Québec (Périnet, Caron et coll. 2006). L'objectif de sélection était basé sur le

potentiel de rusticité, le défilement de la tige, la qualité du bois et le degré de résistance aux maladies et aux insectes (Périnet 2007). Au Québec, depuis 1997 jusqu'à aujourd'hui, les entreprises forestières gèrent activement les plantations de peupliers. Au-delà de ces compagnies, certains petits propriétaires privés ont également commencé à cultiver des peupliers hybrides. (Fortier, Truax et coll. 2012).

1.2 Le bois : formation et composition

1.2.1 Formation du bois

La formation du bois est basée sur le processus de xylogénèse, qui correspond au développement des cellules cambiales (Cuny et Rathgeber 2021). La croissance est contrôlée par deux types de cellules méristématiques; celles qui assurent la croissance longitudinale (tissus primaires), et celles qui favorisent la croissance latérale (le cambium vasculaire et le cambium liège) (Lachaud, Catesson et coll. 1999).

Le cambium comporte des cellules fusiformes responsables de la formation des cellules du système axial (fibres, trachéides, vaisseaux, tubes criblés), et des rayons initiaux pour produire les cellules du système radial (parenchyme horizontal et du parenchyme vertical du xylème et du phloème) (Ross 2010). La division des cellules cambiales est bifaciale, car vers l'extérieur, dans le sens centrifuge, elle donne naissance aux cellules du liber et vers l'intérieur, dans le sens centripète, elle produit un tissu lignifié (Smetana, Mäkilä et coll. 2019).

La division cellulaire chez les cellules mères du xylème est plus active que celle du phloème, ce qui implique une inégalité remarquable entre les proportions du phloème et le xylème (Plomion, Leprovost et coll. 2001). La formation du xylème, comme le montre la Figure 1.2, commence par l'allongement et l'élargissement radial des cellules filles, qui forment par la suite une paroi cellulaire épaisse lignifiée, et finissent par la mort cellulaire programmée (Vander Mijnsbrugge, Meyermans et coll. 2000).

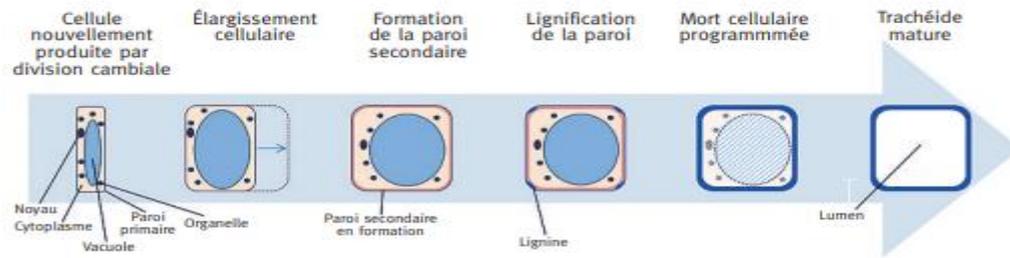


Figure 1.2 : Développement des cellules du xylème (Cuny et Rathgeber 2021).

1.2.2 Duraminisation

On appelle duraminisation le début de la formation du bois de cœur. En effet, ce processus est dû à la mort des cellules du parenchyme de l'aubier qui se transforme en bois de cœur. La matière de réserve que constituent les cellules vivantes du parenchyme se dégrade progressivement en approchant du bois de cœur pour s'y transformer en composés phénoliques ou extractibles. Une fois les cellules du parenchyme mortes, les composés phénoliques emmagasinés au sein du cytoplasme vont être libérés. Ces composés se diffusent dans les parois et les lumens des cellules voisines pour former le bois de cœur. La mort des cellules du parenchyme n'est pas due aux mécanismes biomoléculaires précis qui engendrent le déclin et la mort des cellules du parenchyme. En revanche, une forte concentration de dioxyde de carbone ou d'éthylène, voire la dessiccation du bois de façon générale, sont des facteurs susceptibles d'initier le processus de formation du bois de cœur (Rubino et McCarthy 2003).

Le bois de cœur se présente sous une forme conique irrégulière tout en restant continu au sein de l'arbre. Toutefois, ce processus de duraminisation semble avoir un rythme de développement saisonnier avec des phases de repos annuel. Le diamètre et la hauteur de ce cône, dès que sa création est mise en place, augmentent durant toute la durée de son cycle de vie (Taylor, Gartner et coll. 2002). Dans tous les cas, la proportion d'aubier dans un arbre reste sensible à la croissance du cambium vasculaire et du bois de cœur. Si la croissance du cambium est supérieure à celle du bois de cœur, la proportion d'aubier dans un arbre devrait augmenter et

vice versa. Enfin, il faut dire que ce processus se déroule cellule par cellule, et non anneau par anneau. Par conséquent, la configuration du bois de cœur n'est pas uniforme dans l'espace au sein d'un arbre (Rubino et McCarthy 2003).

1.2.3 Les principales parties du bois

1.2.3.1 L'écorce

D'un point de vue anatomique, l'écorce constitue un ensemble de tissus à l'extérieur du cambium vasculaire, composée par des tissus vivants (écorce interne) et des tissus non vivants (écorce externe). La partie interne de l'écorce est constituée du phloème, du phellogène (cambium du liège) et du phelloderme, alors que sa partie externe comprend le phellème mature (Rains, Caron et coll. 2022). Grâce aux substances chimiques qu'elle contient, l'écorce joue le rôle de couche protectrice de l'arbre contre les conditions environnementales défavorables ainsi que contre les attaques de champignons et d'insectes (Bremer, Oktae et coll. 2021). De même, l'écorce offre une large gamme d'applications industrielles, y compris son utilisation dans les biocomposites écorce-ciment, comme matériau d'isolation pour les bâtiments (Giannotas, Kamperidou et coll. 2021), et comme ressource potentiellement intéressante pour les bioraffineries (Vangeel, Neiva et coll. 2021).

Des études sur des peupliers hybrides ont montré que l'épaisseur et la densité basale de l'écorce diffère d'un clone à l'autre, mais aussi en fonction du diamètre et de la hauteur de l'arbre (Hytönen, Beuker et coll. 2018). Par ailleurs, dans les études de Nie, Liu et leurs collaborateurs (2022), il est noté que les facteurs géographiques et climatiques, notamment la température, jouent un rôle prépondérant dans la variation de l'épaisseur de l'écorce. L'espacement est un facteur significatif de variation de l'épaisseur de l'écorce chez les hybrides d'*Eucalyptus*, plus l'espacement est grand, plus l'épaisseur de l'écorce est importante (Ramalho, Pimenta et coll. 2019).

1.2.3.2 Aubier et duramen

Sur une coupe transversale, il est possible de distinguer, à l'œil nu, l'aubier du duramen sur la base de la couleur (Figure 1.3). Le bois de cœur représente une valeur économique considérable par rapport à l'aubier par sa durabilité naturelle, sa belle couleur, son arôme distinctif et sa richesse en principes actifs (Kampe, Magel et coll. 2013).

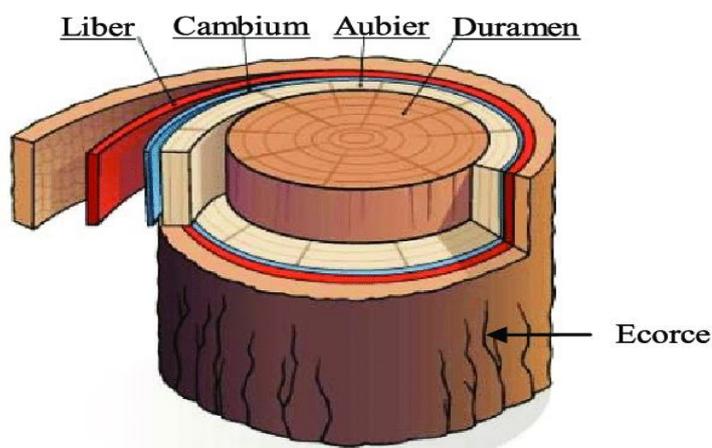


Figure 1.3 : Illustration d'une section transversale d'une tige de bois montrant les parties de l'arbre (Thi 2017).

La formation du duramen se fait via la mort des cellules de l'aubier qui ne contiennent plus de matière de réserve, et tout ce processus se déroule à travers la zone de transition (Lim, Paasela et coll. 2016). Lors de ce processus, des changements de structure chimique sont apportés sur les deux types de bois ce qui fait la différence entre eux (Bektaş, Tutuş et coll. 2020). C'est pour cela que diverses études sont faites pour la caractérisation des propriétés chimiques de bois de l'aubier et duramen, citons le travail de Xiao, Chen et coll. (2019) sur les hybrides d'Eucalyptus. De plus la proportion d'aubier et de duramen dans l'arbre est un critère pour estimer la valeur énergétique de l'arbre, qui dépend de plusieurs facteurs tels que les conditions du sol, le climat et l'habitat (Lehnebach, Morel et

coll. 2017). Plusieurs études ont été menées pour mesurer les proportions d'aubier et de duramen dans les arbres, telles que celle réalisée par Johansson et Hjelm (2013) sur des peupliers hybrides en Suède, ainsi que celle menée par De Boever, Vansteenkiste et coll. (2007) sur des peupliers en Belgique.

1.3 Composition chimique du bois

1.3.1 Principaux éléments constitutifs de la paroi cellulaire du bois

La paroi cellulaire du bois est formée d'une structure composite en matériaux organiques, comprenant principalement des microfibrilles de cellulose (35 et 50%), qui sont liées aux hémicelluloses amorphes (20-35%) par des liaisons hydrogène, et lignine comme liant, dont la teneur varie entre 18 et 35% (Figure 1.4). Notons également la présence de matières extractibles qui sont soit organiques, soit inorganiques. Celles-ci sont des éléments non structuraux qui représentent une quantité plus ou moins importante de la composition chimique pouvant aller de 0 à 10% (Rowell, Pettersen et coll. 2005).

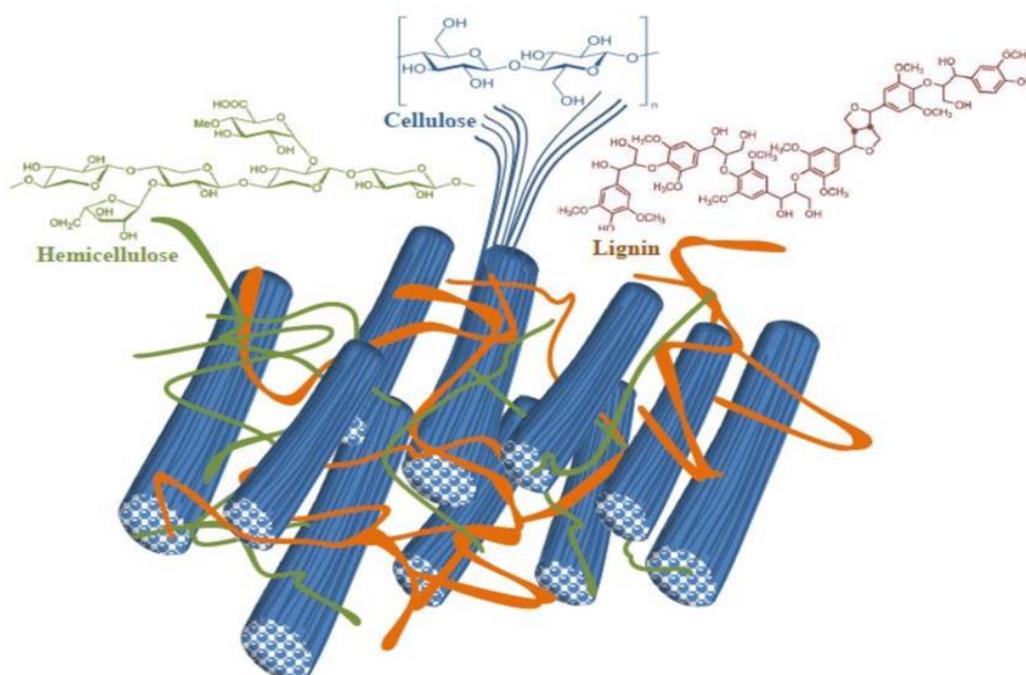


Figure 1.4 : Structure de la paroi cellulaire (Vallejo-Montesinos, Muñoz et coll. 2016).

1.3.1.1 Cellulose

La cellulose est l'élément essentiel dans la composition chimique des matériaux lignocellulosiques. C'est un homopolymère linéaire glucane d'unités d'anhydro-D glucose reliées entre-elles par des liens glucosidiques β -(1 \rightarrow 4) qui entraînent une rotation alternative de 180° de l'axe de la chaîne de cellulose (Heinze 2016). Le motif de répétition est le cellobiose qui est formé à partir de deux unités de glucose et deux extrémités différentes aux deux bouts des chaînes de cellulose ; une extrémité réductrice et l'autre non réductrice (Figure 1.5) (Habibi, Lucia et coll. 2010).

Les chaînes cellulosiques ont une structure cristalline ordonnée et dense, grâce à la position équatoriale des groupements hydroxyles. Ces groupements favorisent la formation des liaisons hydrogène de type force de Van der Waals entre les couches des chaînes moléculaires, ce qui apporte une stabilité et rigidité au polysaccharide (Claisse 2012). La structure cristalline de la cellulose se trouve sous forme d'un regroupement des microfibrilles dans des unités appelées fibrilles (Habibi, Lucia et coll. 2010). Le degré de polymérisation définit la longueur des chaînes polymère, c'est l'un des critères principaux pour caractériser la qualité de la cellulose. Pour le bois, le degré de polymérisation s'étend de 9 000 à 10 000 (Rowell, Pettersen et coll. 2005).

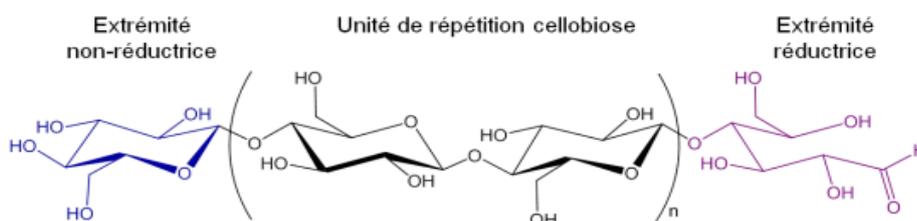


Figure 1.5 : Représentation schématique d'une molécule de cellulose (Claisse 2012).

1.3.1.2 Hémicellulose

Après la cellulose, l'hémicellulose est le second constituant chimique le plus abondant dans la biomasse ligneuse (Machmudah, Kanda et coll. 2017). L'hémicellulose possède une structure complexe hétéropolymérique composée de plusieurs unités monosaccharidiques à structure linéaire ou ramifiée telle que les pentosanes (β -D-xylose, α -L-arabinose), les hexoses (β -D-mannose, β -D-glucose, α -D-galactose), les acides uroniques (acide β -D-glucuronique, acide α -D-4-O-méthylglucuronique et acide α -D-galacturonique) et des deoxy-hexoses comme l' α -L-rhamnose et l' α -L-fucose (Figure 1.6) qui se présentent en quantités variables selon la source (Frassoldati et Ranzi 2019). Contrairement à la cellulose, la structure ligneuse de l'hémicellulose est amorphe, dont les chaînes sont courtes, linéaires et très ramifiées (Machmudah, Kanda et coll. 2017) avec un degré de polymérisation plus faible que celui de la cellulose, soit d'environ 50 à 3 000 (Brunner 2014).

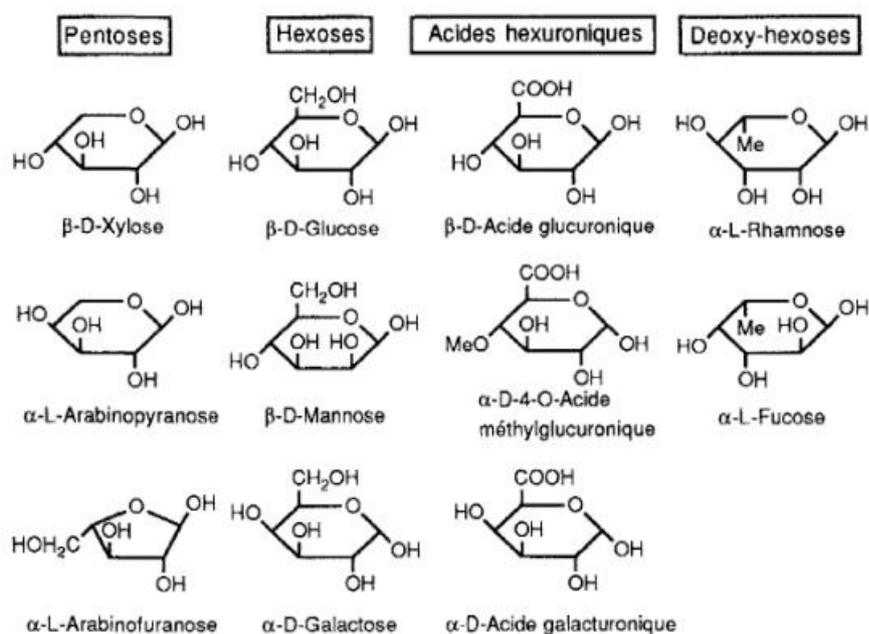


Figure 1.6 : Formules chimiques de différents sucres composant les hémicelluloses (Saha Tchinda 2015).

1.3.1.3 Lignine

La lignine est chimiquement très différente des hémicelluloses et de la cellulose. C'est un polymère amorphe tridimensionnel de structure aliphatique et aromatique (Ghalia et Dahman 2017). Cette macromolécule est constituée principalement de trois unités avec un noyau phénolique, lié à certaines parties des polysaccharides (Calvo-Flores et Dobado 2010). Les trois unités phénylpropane sont des unités gaïacol (G) obtenues à partir de l'alcool trans-coniférylique, des unités sringue (S) qui représentent l'alcool trans-sinapoyl, et des unités p-hydroxyphényle (H) qui signifie le précurseur, l'alcool trans-p-coumaryl (Figure 1.7) (Ghalia et Dahman 2017).

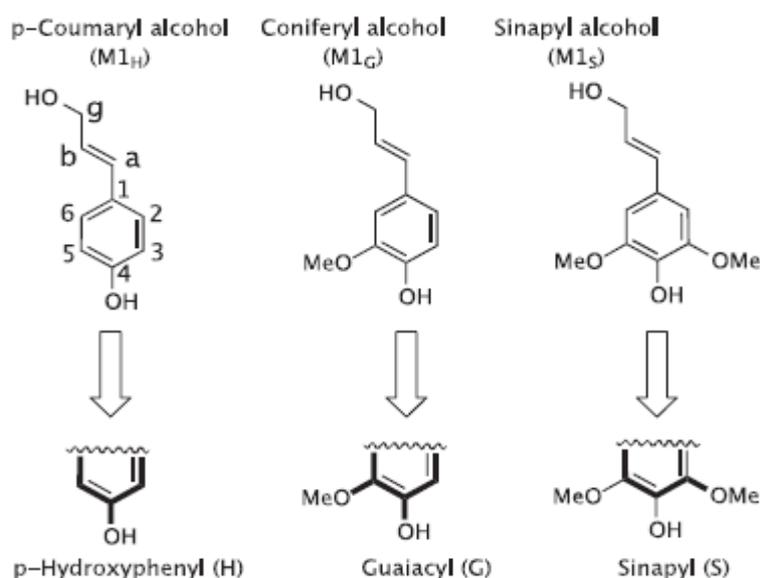


Figure 1.7 : Monomères constitutifs de la lignine (Ghalia et Dahman 2017).

1.3.1.4 Substances extractibles

Les matières extractibles confèrent certaines particularités au bois telles que la couleur, l'odeur et la durabilité naturelle. Elles sont des composés non structuraux de nature différente, que l'on trouve dans la structure poreuse du bois et se présentent avec un poids moléculaire faible qui varie entre 5 à 15% en poids. Il

existe deux principales classes de matières extractibles : les terpènes (hydrophobes) et les composés phénoliques (hydrophiles) (Ohra-Aho, Ghalibaf et coll. 2022).

1.3.1.5 Structure et répartition des constituants chimiques dans les parois

Durant la différenciation cellulaire, diverses couches sont construites dans la paroi cellulaire comme le montre la Figure 1.8, lors de la division cellulaire, c'est la lamelle moyenne qui se développe en premier, d'une épaisseur de 0,5 à 1,5 μm , riche en lignine, ce qui assure l'adhérence d'une cellule avec ses voisines. Au début de la différenciation cellulaire, une autre couche se forme, souple, et fine, environ 0,1 μm d'épaisseur, nommé paroi cellulaire primaire. Cette dernière dispose de plusieurs couches de microfibrilles de celluloses disposées aléatoirement. Une fois que cette couche de cellules est complètement terminée, une autre couche se forme au sein de la paroi cellulaire primaire appelée paroi cellulaire secondaire. Celle-ci est constituée de trois couches S1, S2 et S3 qui se distinguent par l'orientation des microfibrilles. La couche S1, représente une épaisseur comprise entre 0,1 et 0,35 μm , avec une orientation des microfibrilles de 60° à 80° par rapport à l'axe de la cellule, contrairement à la couche S2, plus épaisse, environ 75% à 85% de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire, présentant un angle d'orientation des microfibrilles de 5° à 30° . Et enfin, la couche S3 a une épaisseur de 0,5 à 1,10 μm et son angle d'orientation est de 60° à 90° . (Plomion, Leprovost et coll. 2001).

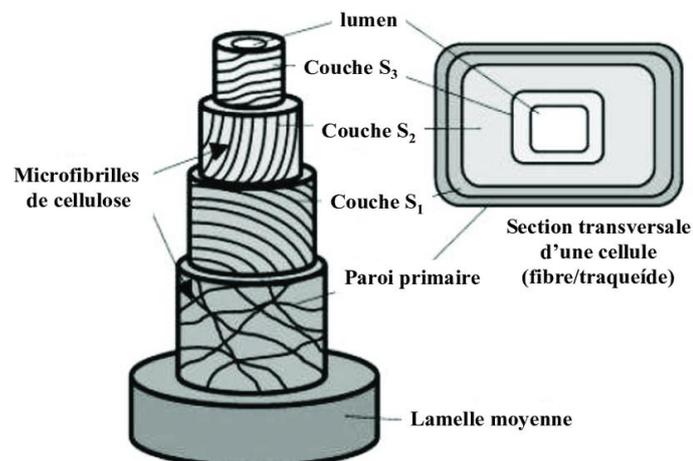


Figure 1.8 : Structure microscopique du bois (Plomion, Leprovost et coll. 2001).

1.4 Les propriétés du bois de peuplier hybride et son potentiel d'usage dans les produits du bois

1.4.1 Les propriétés anatomiques et potentiel d'application

En papeterie, les propriétés des fibres contribuent à la solidité de la feuille de papier. En particulier, la longueur des fibres est l'un des critères qui conditionnent la production de la feuille et permet de juger de la résistance et des propriétés optiques du papier. Les fibres courtes offrent une feuille uniforme et dense, mais cela affecte négativement la résistance. Aujourd'hui, les arbres à croissance rapide sont visés pour la production de pâte et papier, comme le peuplier et tout particulièrement ses hybrides avec ses propriétés de fibre améliorée (Ai et Tschirner 2010).

Dans ce sens, étudier les propriétés anatomiques était un intérêt pour divers chercheurs. Ai et Tschirner (2010), ont constaté une longueur de fibre des peupliers très faible environ 0,38 mm, ceci se traduit par une bonne résistance à la traction, mais une mauvaise résistance à la déchirure des papiers. Aussi, Huda, Koubaa et coll. (2012), ont étudié les variations des propriétés anatomiques plus précisément les variations radiales et longitudinales entre les sites et les clones, et ont constaté des variations hautement significatives, ce qui offre la possibilité de sélectionner des clones ayant de meilleures propriétés anatomiques. De plus, selon les résultats de Wang, Liu et coll. (2016), une différence au niveau des propriétés anatomiques est observée entre le peuplier et ses hybrides, également en fonction du choix du parent femelle.

1.4.2 Les propriétés physiques et potentiel d'application

La croissance rapide des peupliers hybrides se traduit par des propriétés physiques du bois relativement faibles. Vu sa faible densité, le bois de peuplier est fortement recommandé pour la fabrication de panneaux de particules, de panneaux de fibres et de panneaux de lamelles. Il présente également un impact économique pour diverses industries en raison de son incidence sur les coûts de récolte, de transport et de broyage (Balatinecz, Kretschman et coll. 2001). Généralement, une faible

densité est associée à un retrait volumique élevé. Cette constatation est affirmée par plusieurs chercheurs, citons les résultats de Huda, Koubaa et coll. (2014), selon lesquels une faible densité est liée à un faible retrait radial, mais accompagnée par une hausse du retrait volumétrique, du retrait longitudinal et du retrait tangentiel. Pliura, Yu et coll. (2005), ont conclu que la densité était corrélée négativement avec le retrait longitudinal, mais corrélée positivement avec le retrait volumique, radial et tangentiel. D'autre part, les variations du site et du clone affectaient significativement les propriétés physiques du bois des peupliers hybrides (Balatinecz, Kretschman et coll. 2001, Huda, Koubaa et coll. 2014).

1.4.3 Les propriétés mécaniques et potentiel d'application

Le bois de peuplier ne peut pas être utilisé directement comme matériau structurel, mais plutôt dans la fabrication de composites à base de bois, y compris les panneaux de particules (Abdolzadeh, Doosthoseini et coll. 2011), les panneaux de fibres (Yoshihara 2011), les panneaux de bois lamellé-orientés (Kramer, Barbosa et coll. 2014). Diverses études ont examiné les propriétés du bois des peupliers, citons Huda, Koubaa et coll. (2014), qui ont constaté une variation significative des propriétés mécaniques d'un site à l'autre et d'un clone à un autre. Le Module de rupture (MOR) et le Module d'élasticité (MOE) ont augmenté avec la hauteur de l'arbre et de la moelle vers l'écorce, selon Himes, Leavengood et coll. (2021). D'autres études ont été consacrées pour améliorer les propriétés mécaniques du bois des peupliers, comme Yu, Zhang et coll. (2017), où ils ont déterminé une augmentation significative du module d'élasticité (MOE), du module de rupture (MOR) et de la dureté Brinell (BH) sous un traitement à haute pression. Similairement à Sözbir, Bektas et coll. (2019), qui ont conclu que le traitement thermique affectait négativement les propriétés mécaniques contrairement à la densification qui les améliorait.

1.4.4 Les propriétés chimiques

D'après les recherches de Balatinecz, Kretschman et coll. (2001), le bois de peuplier est riche en polysaccharides. En effet il renferme environ 50% de cellulose et 30%

d'hémicelluloses, ayant une faible teneur en lignine, à savoir environ 20 % ou même moins (Tableau 1.1).

Jin et Kamdem (2009) ont examiné la composition chimique du bois de peupliers hybrides par rapport à celle des peupliers faux-trembles. Ils ont rapporté que la teneur en lignine variait de 20,39 à 22,55 %, en concordance avec les résultats obtenus par Blankenhorn, Bowersox et coll. (1985) pour lequel la proportion de lignine allait de 17,26 à 25,70 %. En ce qui concerne les fractions d'holocelluloses, elles s'étalent entre 79,58 et 80,18 %, plus faibles que les valeurs établies par Murphey, Bowersox et coll. (1979). En revanche, les mesures en matières extractibles sont significatives et plus importantes chez le peuplier faux-tremble que chez les peupliers hybrides. Les quantités de cendres relevées par Jin et Kamdem (2009) différaient sensiblement d'un clone à l'autre, avec des pourcentages entre 0,69 à 1,00 %, ce qui concorde avec les résultats rapportés par Blankenhorn, Bowersox et coll. (1985), qui variaient entre 0,68 à 1,13 % pour 7 clones de peupliers hybrides.

Tableau 1.1 : Propriétés chimiques de diverses espèces de peupliers et de leurs hybrides.

Espèce ou hybride	Extractible (%)	Lignine (%)	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Références
<i>P. deltoides</i> x <i>maximowiczii</i>	2,1%-2,5%	19,1%-20,7%	50,4%-52%	30,3%-32,7%	Krutul, Antczak et coll. (2019)
<i>P. trichocarpa</i>	1,5%-1,7%	19,9%-20%	50,2%-53%	32,6%-35,2%	Krutul, Antczak et coll. (2019)
Peupliers hybrides	-	28,2%-34%	43%-45,2%	15,9%-17%	Zhang, Fang et coll. (2022)
Peupliers hybrides	1,3%-3,3%	1,7%-24%	43%-47%	36%-39%	Kačík, Ďurkovič et coll. (2012)
Peupliers	-	23%-30%	48%-52%	19%-26%	Rego, Dias et coll. (2019)
<i>P. deltoides</i>	-	23%	47%	18%	
<i>P. tremuloides</i>	-	19%	49%	19%	Rowell, Pettersen et coll. (2005)
<i>P. trichocarpa</i>	-	21%	49%	19%	
<i>P. deltoides</i>	-	25,9%	46,5%	26,6%	

On a pu observer que plusieurs auteurs affirment que les caractéristiques chimiques de la biomasse ligneuse sont étroitement liées à l'espèce. Les peupliers possèdent une teneur en cellulose plus élevée que celle des autres feuillus. Patt, Kordsachia et coll. (2006) ont ainsi trouvé que la teneur en cellulose et en lignine du bois de peuplier était relativement importante en comparaison avec le hêtre et le bouleau, tandis que sa proportion d'hémicellulose était moindre. Par ailleurs, une différence de la composition chimique de la biomasse a également été observée entre les espèces et les clones du genre *Populus* (Willför, Sundberg et coll. 2005). De plus, selon Guidi, Tozzini et coll. (2009), le bois est en moyenne plus riche en cellulose et sa teneur en lignine et en cendres est moins élevée que celle de l'écorce. Suite à ces résultats, il est apparu que la majorité des propriétés chimiques différait entre le bois et l'écorce (Guidi, Tozzini et coll. 2009).

1.5 Les facteurs qui influent sur les propriétés du bois de peuplier hybride

1.5.1 Age de l'arbre

L'âge d'un arbre est un facteur fondamental qui influence de manière significative les propriétés du bois des peupliers hybrides. Les variations qui surviennent au fil du temps sur les caractéristiques du bois jouent un rôle crucial dans l'utilisation de ce matériau naturel. Par exemple, l'augmentation du rapport Duramen/Aubier avec l'âge du cambium est due à l'évolution progressive des cellules d'aubier, issues du cambium, qui deviennent plus denses et accumulent des composés chimiques spécifiques, finissant ainsi par former le duramen (Nawrot, Pazdrowski et coll. 2008). En ce qui concerne les propriétés anatomiques, les recherches menées par Huda, Koubaa, et coll. (2012) sur les peupliers hybrides ont révélé que, à toutes les hauteurs de l'arbre, la longueur des fibres était initialement courte près de la moelle, puis augmentait rapidement au cours des premières années, pour finalement continuer à augmenter, bien que de manière plus modérée, en s'approchant de l'écorce. Cette observation pourrait s'expliquer par une augmentation de la longueur des initiales cambiales à mesure que l'arbre vieillit. Par ailleurs, la largeur des fibres tendait à augmenter près de la moelle, mais cette tendance s'inversait dans les cernes

extérieurs de l'arbre. Au sujet des propriétés mécaniques, les études de Girardon, Denaud, et coll. (2016) montrent que le module d'élasticité du bois juvénile est plus faible que celui du bois mature. Ceci s'explique par l'augmentation progressive de l'épaisseur de la paroi cellulaire au fur et à mesure que le tissu de bois vieillit (González, Velín, et coll. 2020). Également, la composition chimique du bois de peuplier hybride peut changer avec l'âge. Fan, Ding et coll. (2023), montrent que les teneurs en lignine et en matières extractibles de NaOH sont plus élevées dans le bois juvénile que dans le bois mature. De plus Cobas, Felissia et coll. (2013), montrent que la teneur en hémicelluloses et extractibles était plus faible dans le bois mature que dans le bois juvénile. Contrairement à la cellulose qui est importante dans les cellules du bois mature, en raison du fait que la cellulose provoque une accumulation progressive de ce matériau sur les parois cellulaires de la région cambiale (González, Velín, et coll. 2020). À l'égard des propriétés physiques, Ištók, Sedlar et coll. (2016) ont trouvé que la densité du bois des peupliers augmente de la moelle à l'écorce. Cela peut s'expliquer par le fait que le bois juvénile est connu pour avoir une densité plus faible que le bois mature.

1.5.2 Conditions de croissance

- Climat et sol :

La disponibilité en eau, la qualité du sol, la température, l'altitude et d'autres facteurs environnementaux influencent la croissance ainsi que la qualité du bois. Nawrot, Pazdrowski et coll. (2008), mentionnent que les proportions de duramen et d'aubier présentent des variations en réponse aux conditions climatiques et au type de sol. Par exemple, le pourcentage de duramen augmente avec les environnements de croissance caractérisés par des précipitations importantes (de Almeida, Vidaurre et coll. 2020). Fan, Ding et coll. (2023) affirment que le pH et la concentration en potassium (K) du sol, l'humidité relative annuelle moyenne et la durée d'ensoleillement, ont eu un impact négatif sur l'augmentation annuelle moyenne du diamètre à hauteur de poitrine (DBH) des hybrides de *Populus × euramericana*. En outre, leurs résultats ont révélé qu'une augmentation des précipitations annuelles

moyennes et du potassium (P) du sol conduit à une diminution des teneurs en hémicellulose et extractibles dans le duramen. Selon Cheng, Liu et coll. (2015) des précipitations insuffisantes pourraient réduire le taux de division cellulaire et réduire la période de différenciation cellulaire, ce qui conduit à une période de croissance plus courte, en empêchant l'expansion des cellules et réduisant le diamètre du lumen, et par conséquent réduire la teneur en cellulose. Concernant la densité du bois, Fan, Ding et al (2023) constatent que les précipitations annuelles moyennes ont un effet négatif sur la densité de l'aubier, tandis que les températures annuelles moyennes au sol ont un effet positif sur la densité du duramen. En effet, la diminution de la disponibilité en eau se manifeste par la formation de lumens de taille réduite et par l'épaississement des parois cellulaires. Bien que cette adaptation puisse potentiellement réduire l'efficacité du transport de l'eau, elle a été interprétée comme un mécanisme adaptatif. Cela s'explique par le fait qu'elle a renforcé la résistance du système de transport de l'eau à la cavitation, entraînant ainsi une augmentation de la densité (Nabais, Hansen et coll. 2018). De même Xu, Bao et coll. (2011), déclarent que la hausse de la température entraîne une accélération de l'activité cambiale, ce qui accélère la division cellulaire et augmente la production de cellules ligneuses, d'où une meilleure densité. Pour les propriétés mécaniques, Fan, Ding et coll. (2023) ont rapporté que l'azote et du pH du sol, ainsi qu'avec des précipitations annuelles moyennes plus élevées et une durée d'ensoleillement annuelle moyenne prolongée favorisent l'amélioration du module élastique de flexion et la résistance à la flexion du bois.

- Espacement :

Les arbres sont en concurrence les uns avec les autres pour les ressources, y compris la lumière, l'eau et les nutriments. Cette concurrence peut influencer leur croissance et donc la qualité du bois. Les études de Ahmed, Fu et coll (2020) sur l'hybride *Populus simonii* × *P. nigra*, montrent qu'un espacement large favorise l'augmentation du diamètre à la poitrine des arbres, de la densité du bois, ainsi que dans l'augmentation de la largeur et de la longueur des fibres. Cependant il n'a aucun effet sur la composition chimique du bois. En outre, un espacement étroit

conduisant à un noyau juvénile plus grand qui contient du bois de faible résistance et rigidité (Moore, Achim et coll. 2009).

1.6 La spectroscopie infrarouge proche

Les industries de transformation du bois cherchent toujours des méthodes non destructives, rapides, peu coûteuses et précises pour caractériser les propriétés du bois (Tsuchikawa et Kobori 2015). Aujourd'hui la spectroscopie infrarouge proche (SPIR) est un atout qui pourrait offrir un large ensemble de données de mesures du bois permettant de comprendre comment les facteurs génétiques et environnementaux induisent des variations dans les bois (Tsuchikawa et Kobori 2015). L'infrarouge proche est une technique optique de caractérisation qualitative et quantitative des matériaux solides et liquides. Le principe consiste à émettre une lumière électromagnétique située dans la gamme $12500\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$, qui interfère avec le matériau à analyser, de sorte que les liaisons moléculaires polaires sont soumises à des changements d'énergie vibratoire et donnent lieu à des bandes d'absorption dans différentes régions du spectre d'infrarouge proche comme l'affiche la Figure 1.9 (Skvaril, Kyprianidis et coll. 2017).

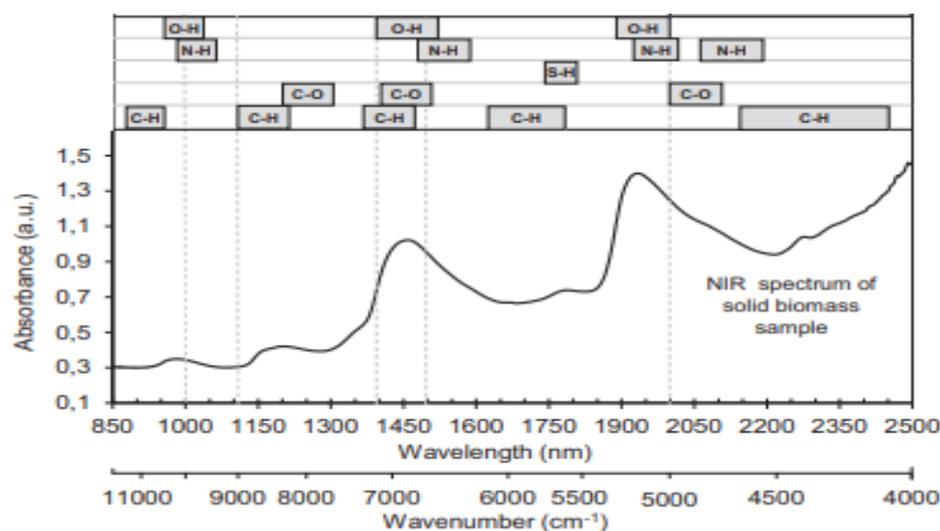


Figure 1.9 : Bandes d'absorption dans la région d'infrarouge proche et spectres typiques d'un échantillon de biomasse solide (Skvaril, Kyprianidis et coll. 2017).

1.5.1 Propriétés anatomiques

La spectroscopie infrarouge proche (SPIR) touche aussi l'évaluation des caractéristiques anatomiques du bois à l'aide du SPIR. Aujourd'hui, l'estimation des propriétés anatomiques du bois fait l'objet de différents programmes de sélection des arbres, parmi lesquels le travail de Hein (2012), lequel avait développé des modèles prédictifs destinés à fournir une estimation du retrait radial et tangentiel ($R^2=0.46$) et de l'angle de microfibrille (AMF) (R^2 entre 0.71 et 0.75) du bois d'*Eucalyptus*. Également Sun, Chai et coll. (2011), ont appliqué la spectroscopie infrarouge proche afin d'estimer l'angle de microfibrille (AMF) et la longueur des fibres du bois de bambou. Ils ont trouvé une bonne corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées. Inagaki, Schwanninger et coll. (2012), ont mentionné le potentiel de cette technique pour l'industrie de la pâte à papier, pour caractériser les fibres de bois d'*Eucalyptus camaldulensi* avec précision.

1.5.2 Propriétés physiques

La masse volumique des peupliers était l'un des sujets de la recherche de Jia, Wang et coll. (2021), où ils ont déterminé la variation radiale de la masse volumique, et de construire des modèles de leurs prédictions avec un bon coefficient de détermination R^2 qui variait entre 0,55 et 0,60. Arriel, Ramalho et coll. (2019), ont créé des modèles multivariés destinés à prédire la masse volumique basale du bois d'*Eucalyptus* en se référant aux valeurs mesurées à hauteur de poitrine. De même pour les panneaux de particules, Hein, Campos et coll. (2011), ont pu réaliser des modèles au moyen de l'infrarouge proche pour estimer leur capacité d'absorption et de gonflement.

1.5.3 Propriétés mécaniques

L'utilisation de la spectroscopie dans le proche infrarouge intervient aussi dans le développement des modèles de prédiction des propriétés mécaniques via des outils mathématiques. Récemment, Jia, Wang et coll. (2021), ont élaboré des modèles prédictifs des propriétés mécaniques du bois de peuplier, et ceci dans le but de

gagner du temps pour évaluer leurs propriétés dans le futur. Les propriétés mécaniques du mélèze hybride ont été un sujet de recherche de Fujimoto, Yamamoto et coll. (2007), qui ont investigué la capacité de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) à fournir une estimation du module d'élasticité (MOE) et du module de rupture (MOR) lors d'essais de flexion. Pour l'hybride d'*Eucalyptus*, des modèles de prédiction des propriétés mécaniques ont été faits par Andrade, Trugilho et coll. (2010), qui rapportent de bonnes corrélations entre les données prédites et mesurées du bois massif. À partir de la SPIR, des modèles de prédiction ont été établis par Hein, Campos et coll. (2011), dans le but de contrôler les propriétés mécaniques de panneaux de particules agrosourcés obtenus à partir de particules de bois d'*Eucalyptus*, de *Pinus* et de bagasse de *Saccharum*. Dahlen, Diaz et coll. (2017), ont également utilisé la SPIR afin de prédire les propriétés mécaniques du bois du Pin.

1.5.4 Propriétés chimiques

Les méthodes de caractérisation chimiques prennent du temps et sont coûteuses, surtout pour un grand nombre d'échantillons. Donc, le passage vers le proche infrarouge est le sujet de différents chercheurs pour quantifier la composition chimique de la matière ligneuse. Costa, Lourenço et coll. (2019), ont utilisé la SPIR pour la caractérisation de la composition chimique des trois tissus des tiges de chêne-liège (liège, phloème et bois). Le développement des modèles de prédictions de la composition chimique des résidus de récolte d'*Eucalyptus*, à l'aide de l'infrarouge proche, était l'intérêt de la recherche de Ferreira, Roque et coll. (2018). Il faut également citer l'étude de Mattos, Lourençon et coll. (2016), qui ont évalué la composition chimique du bois de *Pinus taeda* et de *Schizolobium parahyba* par la technique SPIR, dans le but de chercher une nouvelle matière première pour le bioraffinage. Les recherches de Alves, Simões et coll. (2011), était sur le bois d'*Eucalyptus*, afin de déterminer le rapport syringyle/guaïacyle (S/G), ainsi que la teneur en matières extractibles par le SPIR. Quant à Maranan et Laborie (2008), ils ont axé leurs études SPIR sur le bois de peuplier, ce genre de recherche reste peu fréquent.

1.7 Modèles de prédiction

L'objectif principal d'une méthode prédictive est d'estimer au mieux à partir de données, les valeurs d'une ou de plusieurs variables pour de nouveaux échantillons. Plusieurs études ont développé des modèles de prédictions afin de faciliter à long terme la caractérisation des propriétés du bois. Liang, Fang et coll. (2019) ont développé des modèles de prédictions pour déterminer la teneur en humidité et de la densité des copeaux de bois de peuplier. De plus, Hodge, Acosta et coll. (2018) ont construit des modèles basés sur la spectroscopie infrarouge proche pour prédire les caractéristiques chimiques du bois d'Eucalyptus comme le rapport syringyle/guaiacyl (S/G), glucose, xylose, galactose, arabinose et mannose. Il convient également de mentionner Rials, Kelley et coll. (2002) et Yu, Liang et coll. (2020) qui ont développé des modèles pour les propriétés mécaniques. Nkansah, Dawson-Andoh et coll. (2010) avaient appliqué la spectroscopie infrarouge proche pour développer des modèles chimiométriques de clones de *Populus*. À cet effet ils ont pu prédire les teneurs en matières extractibles dans les régions du spectre complet et réduit présentant des coefficients de détermination, R^2 , élevés de 0,84 et 0,78, respectivement. Enfin, ils ont pu conclure que le modèle de prédiction établi dans la région spectrale complète peut être utilisé pour les applications exigeant une grande précision, alors que celui établi dans la région spectrale réduite peut servir aux analyses approximatives. Encore de bons modèles de prédiction ont été établis pour la teneur en extractible chez les peupliers noirs (*Populus nigra*) (Gebreselassie, Ader et coll. 2017). Ce résultat rejoint celui obtenu pour la prédiction de la lignine chez les *Populus* avec un R^2 de 0,64. (Nkansah, Dawson-Andoh et coll. 2010). Dans la même optique du contenu en lignine, quelques espèces telles que le mélèze, le cèdre, le pin rouge et le pin coréen présentent de bons résultats de R^2 compris entre 0,96 et 0,99 (Park, Kim et coll. 2018). À noter également les résultats de Gao, Shu et coll. (2021) pour les peupliers, dont ils ont tiré un bon résultat en se référant au coefficient de corrélation R pour évaluer la relation entre les valeurs prédites et mesurées.

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Problématique, objectifs et hypothèses du présent travail

2.1.1 Problématique

Le bois de peupliers hybrides est un matériau qui suscite un intérêt croissant dans diverses applications industrielles, notamment dans les secteurs du bois, de l'énergie et de la chimie verte. Ses propriétés physiques, notamment la proportion en surface de l'aubier, du bois de cœur et de l'écorce, ainsi que la densité basale, sont importantes car elles influencent la qualité et l'utilisation du bois dans différentes applications, telles que la construction, la fabrication de meubles et la production de biomasse. Également, les propriétés chimiques (Extractibles, lignines, cellulose et hémicelluloses) jouent un rôle clé dans la résistance, la densité énergétique et la susceptibilité à la dégradation du bois. Une connaissance approfondie des facteurs clés qui influencent les propriétés du bois permet de développer des stratégies ciblées pour améliorer la qualité du bois en fonction de l'usage auquel il est destiné. Parallèlement, la spectroscopie dans le proche infrarouge est une technique efficace qui permet d'obtenir des informations sur les propriétés du bois. Elle offre la possibilité d'évaluer rapidement et de manière non-destructive des caractéristiques telles que la composition chimique, et la densité. Cette méthode présente de nombreux avantages, notamment sa rapidité, sa facilité d'utilisation et sa capacité à fournir des résultats fiables. L'application de cette technique permet d'élaborer des modèles prédictifs visant à diminuer les coûts de caractérisation et à accroître la connaissance des propriétés du bois pour les besoins de l'industrie.

2.1.2 Objectifs

L'objectif général de ce projet est de caractériser les propriétés chimiques du bois des peupliers hybrides et développer des modèles de leur prédiction par infrarouge proche. Les objectifs spécifiques sont

- ✓ Identifier l'effet de variation de certains facteurs comme le site, le clone, l'espacement et de la hauteur sur la variation des proportions de surface de l'aubier et du duramen ;
- ✓ Déterminer la variation des propriétés chimiques et physiques en fonction du site, du clone et de l'espacement ;
- ✓ Développer des modèles de prédictions des composants chimiques basés sur l'infrarouge proche.

2.1.3 Hypothèses

Cette étude est basée sur les hypothèses suivantes :

- ✓ La proportion de duramen est importante chez les arbres des sites bénéficiant des conditions favorisant une croissance rapide, telles que des précipitations et un espacement élevé.
- ✓ Les propriétés chimiques du bois de peuplier sont soumises à un contrôle génétique et environnemental important.
- ✓ Le coefficient de détermination du modèle de prédiction est d'autant meilleur que le nombre d'échantillons et de facteurs est élevé.

2.2 Matériel

2.2.1 Choix et localisation des sites expérimentaux

La présente étude a été menée sur des sites dans le nord-ouest du Québec, plus précisément dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue (Figure 2.1). Sur ces sites, on peut rencontrer deux types de végétation, soit des forêts mixtes ou boréales continues. Le premier site se trouve dans la municipalité de **Duhamel-Ouest** (47°32'N, 79°59'W), ce site se caractérise par un luvisol argileux (45% d'argile; Agriculture and Agrifood Canada, 2013) avec des précipitations et des températures annuelles moyennes de 820 mm et de 2,8°C (Grondin, Anseau et coll. 1996). Le deuxième site était auparavant boisé avant d'être récolté en 2004. Il était situé près de la municipalité de **Duparquet** (48°29'N, 97°9'W) dans la sapinière à bouleau

blanc avec des précipitations annuelles de 918 mm et une température de 1,2 °C. Le sol de ce site a été classé comme Brunisol à l'argile lourde (70 % d'argile ; Agriculture and Agrifood Canada, 2013). Le troisième site était situé dans la municipalité de **Villebois** (49°09'N, 79°10'W) et avait été précédemment exploité en agriculture biologique pour les céréales et le foin. Ce site se trouvait dans la zone de la pessière à mousses et le type de sol était un luvisol gris argileux. (50% d'argile). Les précipitations et la température annuelles moyennes sur ce site sont de 890 mm et de 1,2 °C (Grondin, Anseau et coll. 1996).

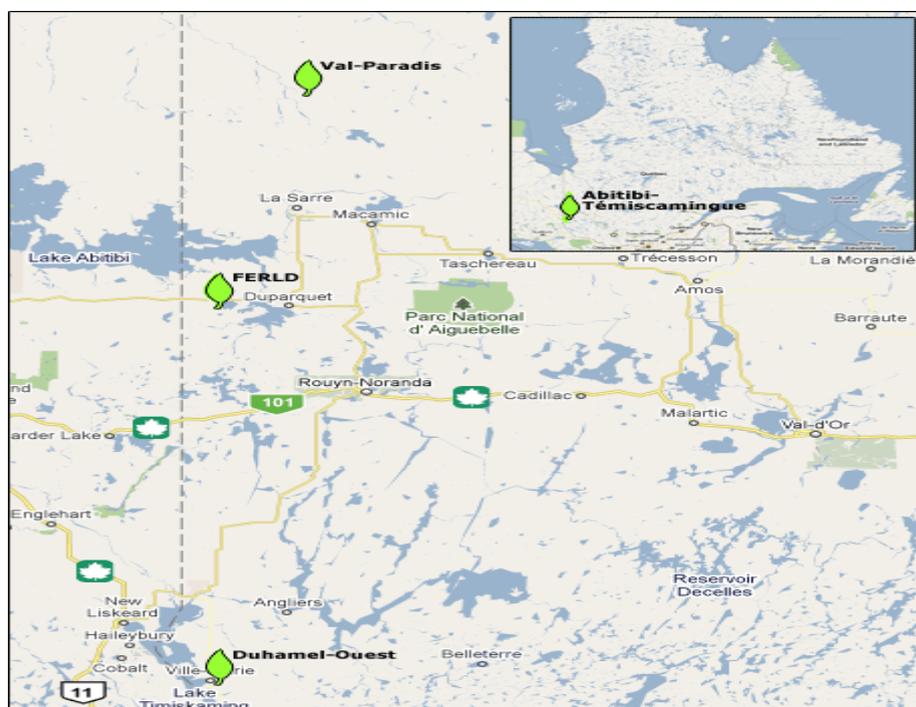


Figure 2.1 : Localisation des sites expérimentaux

2.2.2 Échantillonnage

Pour mener notre étude, on s'est intéressé aux quatre hybrides issus d'un croisement intersectionnel de la section **Tacamahaca** entre les peupliers *P. balsamifera*, *P. trichocarpa*, et *P. maximowiczii*. À cet effet dans chaque site, on échantillonne 3 arbres de chacun des quatre clones des peupliers hybrides (Tableau 2.1) de différents espacements E1 (1 x 4m), E2 (2 x 4m), et E3 (3 x 4m).

Tableau 2.1 : Liste des clones de l'étude

Clone	
747215	<i>P. trichocarpa</i> × <i>balsamifera</i>
915004	<i>P. balsamifera</i> × <i>maximowiczii</i>
915005	<i>P. balsamifera</i> × <i>maximowiczii</i>
915319	<i>P. maximowiczii</i> × <i>balsamifera</i>

Des sections de tige de 10 cm d'épaisseur ont été prélevées régulièrement à chaque 2,35 mètres à partir de 1,4 m (Figure 2.2). Il y a donc des échantillons à 3,75 m, 6,20 m, 8,65 m, 11,10 m, et 13,55 m.

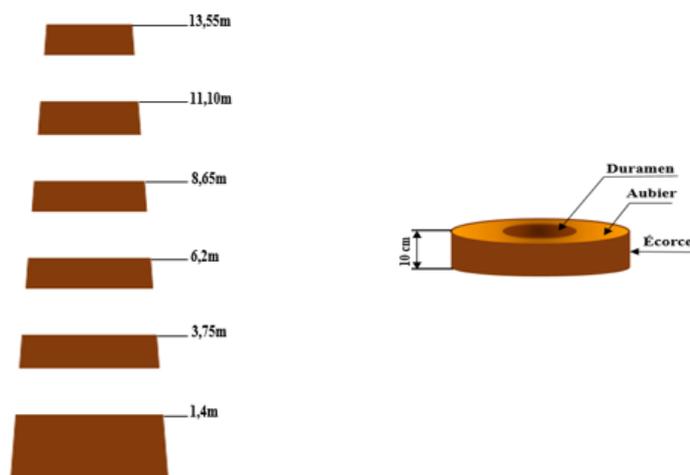


Figure 2.2 : Échantillonnage et dimensions de billots

2.3 Méthode

2.3.1 Mesures

2.3.1.1 Proportion de l'écorce

Généralement, il s'avère avantageux de mesurer l'épaisseur de l'écorce. D'une part ceci permet de valoriser ces résidus en vue de leur transformation en sous-produits

de la forêt à usage chimique, énergétique et agronomique. D'autre part, il est recommandé lors des transactions commerciales de prévoir le taux d'écorce à un point spécifique de l'arbre pour la prévision du diamètre ou le volume sous écorce des arbres. Les mesures effectuées sur et sous écorce à un point spécifique permettent de calculer le taux d'écorce selon l'équation 2.1 (Marshall, Murphy et coll. 2006):

$$\tau_{\text{écorce}} = \frac{d_{\text{sur}} - d_{\text{sous}}}{d_{\text{sur}}} \times 100 \quad (2.1)$$

Avec :

$\tau_{\text{écorce}}$: Taux d'écorce en surface,

d_{sur} : Le diamètre sur écorce, d_{sous} : Le diamètre sous écorce

2.3.1.2 Proportions d'aubier et de duramen

Chaque mesure de surface a été effectuée à l'aide du logiciel d'analyse d'image **Image J**. Il est nécessaire de mettre les images numériques à l'échelle en unités physiques de mesure, car elles sont composées de pixels. Pour ce faire, il faut tracer un repère d'échelle sur la surface à calculer. Ensuite, avec la fonction "straight line", il suffit de joindre les deux extrémités de cette échelle (Figure 2.3). Enfin, pour passer des pixels à une longueur physique, il suffit d'aller à « Analyse/Régler» l'échelle et de rentrer l'unité de mesure ainsi que la valeur de l'échelle tracée dans la case "known distance".

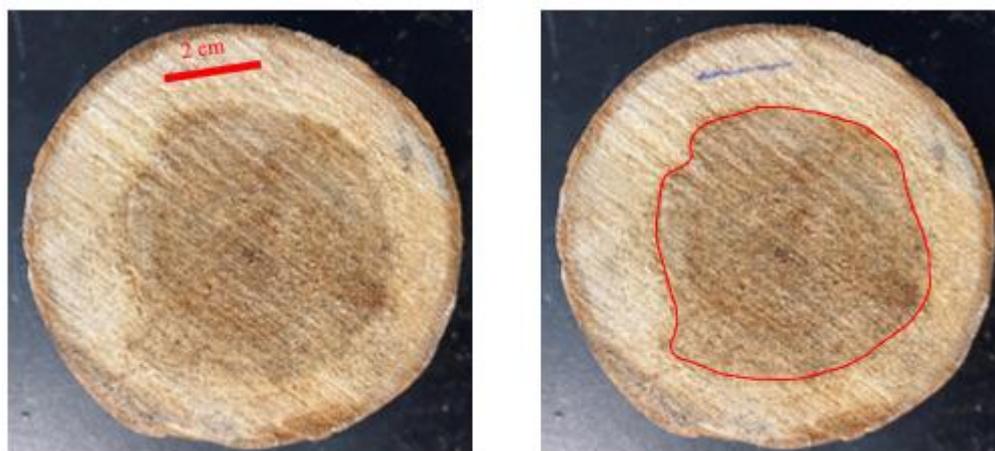


Figure 2.3 : Étapes de mesures avec ImageJ

2.3.2 Caractérisations chimiques

2.3.4.1 Préparation des échantillons

Pour les disques échantillonnés à une hauteur 1,4m, l'aubier est séparé du bois de cœur (Figure 2.4), puis taillé en cubes, ensuite séchés pendant 72 heures à 50°C, pour être finalement broyé et tamisé à l'aide d'un tamis de 40 mailles selon la norme TAPPI T264 (1989) (Figure 2.5).



Figure 2.4 : Aubier et duramen séparés



Figure 2.5 : Aubier et duramen broyés

2.3.4.2 Taux d'extractibles

Une mesure de la teneur en humidité est nécessaire avant de commencer l'extraction, pour obtenir la matière sèche. À cet effet, 5g de farine du bois ont été séchés à l'étuve pendant 6h à 70°C. Après séchage, et en conformité avec la norme TAPPI T264 (1989), une première extraction a eu lieu dans un Soxhlet (Figure 2.6) en utilisant un solvant, le cyclohexane/éthanol (2/1), pendant 6 à 8 heures, de manière à extraire les terpènes, les cires et les acides gras. Une deuxième extraction a été effectuée à l'éthanol en vue d'extraire les hémicelluloses les plus fragiles, les

tanins et une partie de la cellulose en état de dégradation avancée. Enfin, un rinçage à l'eau distillée bouillante pendant une heure permet d'extraire les glucides, les protéines et les alcaloïdes. Finalement, à chaque fin d'extraction, les résidus ont été filtrés, séchés et pesés, puis le pourcentage d'extractibles par rapport à la masse initiale a été calculé.

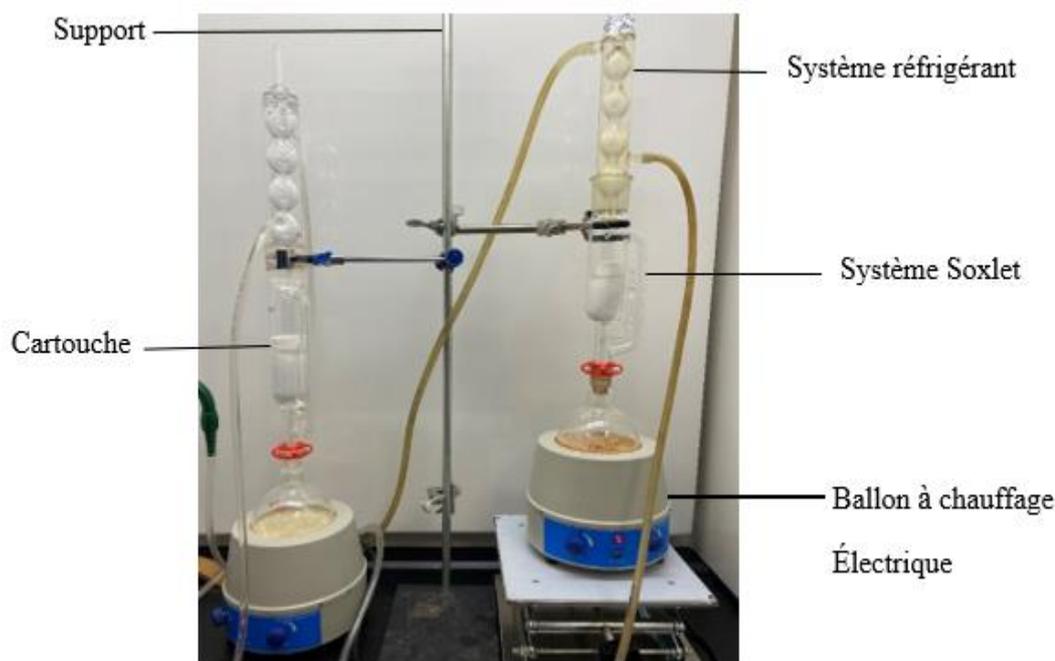


Figure 2.6 : Système d'extraction

2.3.4.3 Taux de lignine insoluble à l'acide (Lignine KLASON)

Le dosage de la quantité de lignine KLASON se fait selon la norme TAPPI T222 om-83 (1989). Dans un tube à essai, 250 mg de poudre de bois ont été imprégnés de 3mL d'acide sulfurique (72%) (H_2SO_4) et chauffé à 30°C dans un bain-marie pendant 1 heure (Figure 2.7).



Figure 2.7 : Poudre de bois imprégnée avec l'acide sulfurique

Par la suite, le tout est versé dans une bouteille résistante aux faibles pressions de 200 ml contenant 84 ml d'eau déminéralisée pour avoir une solution ayant une concentration de 3%. Ces bouteilles sont alors déposées dans l'autoclave (Figure 2.8) afin d'être stérilisées durant 1 heure à 125°C. Une fois refroidi, le résidu non soluble doit être lavé à l'eau déminéralisée, puis séché à 103°C jusqu'à la stabilisation de masse (Figure 2.9). Finalement le taux de lignine KLASON est calculé avec l'équation (2.2).



Figure 2.8 : Système d'extraction de la lignine KLASON via un autoclave de type presto/cuiseur rapide (VWR Canada)



Figure 2.9 : Lignine

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

2.3.4.4 Taux de cellulose

La détermination de la cellulose dans la matière lignocellulosique s'appuie sur l'approche de Kurschner-Hoffner (Browning 1967). Celle-ci consiste à transformer la lignine en produits nitrophénoliques solubles dans l'alcool ainsi qu'à décomposer, par hydrolyse, une grande partie des hémicelluloses en solution, tout en conservant la cellulose intacte. Pour ce faire, une quantité de 5 g de poudre de bois a été mise en solution à 125 ml dans un rapport de 1:4 (v/v) entre l'acide nitrique (65%) et l'éthanol (96%), pendant une heure, à 90 °C, en effectuant 4 cycles successifs. Une fois le quatrième cycle terminé et après avoir filtré la solution sous vide, la masse de cellulose a été lavée, en premier lieu avec de l'éthanol, ensuite avec de l'eau froide puis de l'eau chaude. Enfin, elle a été séchée à 103°C et pesée à 0,01 mg près. Le pourcentage de cellulose pour un échantillon donné se calcule à partir de sa masse initiale (5 g) en en appliquant la formule définie dans l'équation 2.3 :

$$\text{Cellulose (\%)} = \frac{\text{Masse de cellulose}}{\text{Masse initiale de l'échantillon}} \times 100 \quad (2.3)$$

2.3.4.5 Taux des hémicelluloses

La teneur en hémicelluloses a été déterminée en traitant 10 g de poudre de bois avec un mélange de 500 ml de solution d'acide peracétique ($C_2H_2O_3$). En effet, l'acide peracétique ($C_2H_4O_3$) est un mélange d'acide acétique pur (CH_3COOH) et de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à 30% (250ml). Ensuite on ajoute 25 g d'acétate de sodium (CH_3COONa) pendant une heure à $70^\circ C$ (Leopold et McIntosh 1961). Les hémicelluloses isolées ont été filtrées, puis séchées à $103^\circ C$ et enfin pesées. Finalement, le pourcentage des hémicelluloses a été déduit par rapport à la masse initiale de l'échantillon (équation 2.4) :

$$\text{Hémicellulose (\%)} = \frac{\text{Masse de l'hémicellulose}}{\text{Masse initiale de l'échantillon}} \times 100 \quad (2.4)$$

2.3.3 Caractérisation physique : Masse volumique basale

Les plaquettes représentées sur la Figure 2.10 sont prélevées sur chaque rondelle collectée. La détermination de la densité basale est effectuée conformément à la norme TAPPI T 258. Pour ce faire, tous les échantillons ont été immergés pendant 72 heures dans de l'eau pour atteindre un taux d'humidité supérieur au point de saturation de la fibre. Ensuite, en utilisant un chiffon humide, on enlève l'excès d'humidité, et on mesure le déplacement d'eau de chaque échantillon qui donne son volume vert. Finalement, tous les échantillons sont séchés à l'étuve et pesés pour obtenir la masse sèche. Le rapport entre la masse sèche de l'étuve et le volume vert permet de déterminer la masse volumique basale (équation 2.5).

$$DB \text{ (kg/m}^3 \text{)} = \frac{\text{Masse sèche à l'étuve (kg)}}{\text{Volume vert (m}^3 \text{)}} \quad (2.5)$$

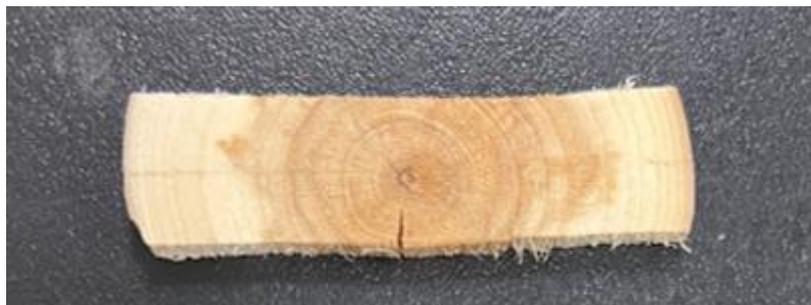


Figure 2.10 : Plaquette de bois

2.3.4 Spectroscopie infrarouge-proche

2.3.4.1 Principe

La spectroscopie infrarouge proche (SPIR) (Figure 2.11), permet d'effectuer des analyses selon le principe de l'absorption de la matière organique par le biais d'un rayonnement électromagnétique. Un spectromètre fournit des réponses en termes de transmission (mesure de l'énergie ayant traversé un échantillon) ou en termes de réflexion (mesure de l'énergie réfléchi par un échantillon épais). Dans ce cas, les ondes infrarouges doivent être comprises entre 800 nm et 100 000 nm, autrement dit, elles se situent après le visible et avant les micro-ondes. D'une façon plus spécifique, les mesures se font dans le proche infrarouge qui se situe entre 800 et 2500 nm.



Figure 2.11 : Appareil d'analyse par la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (Shimadzu IR Tracer-100, Kyoto, Japon).

L'échantillon soumis à l'analyse reçoit différentes séquences lumineuses dans la bande du proche infrarouge, ce qui crée des vibrations de type harmonique et des combinaisons dans les liaisons entre les atomes. En effet, ces vibrations sont causées par un passage à un niveau d'énergie différent à la suite de l'absorption de la lumière par des liaisons telles que C-H, N-H, O-H, C-N présentes dans le domaine du proche infrarouge. Pour chaque échantillon, un spectre spécifique est obtenu, réunissant un ensemble d'informations permettant d'estimer la quantité et la qualité des liaisons et donc de déduire indirectement la teneur en cellulose, et hémicelluloses.

2.3.4.2 Acquisition des données spectroscopiques dans le proche infrarouge

L'instrument SpectraStar 2600 XL (Unity Scientific, Milford, MA, USA) permet de traiter les échantillons de bois de 40 mailles dans un support de coupe de 100 × 50 mm (diamètre × longueur) (Figure 2.12).



Figure 2.12 : Échantillons SPIR (Aubier, Duramen)

2.3.4.3 Prétraitement des données spectroscopiques

En raison du coût élevé des analyses conventionnelles, les modèles d'étalonnage sont construits à partir d'un nombre limité d'échantillons. Cette limitation, d'après Schoot, Kapper et coll. (2020) est bénéfique pour le processus du prétraitement. De ce fait, pour une meilleure prédiction des propriétés chimiques, le passage par l'étape du prétraitement est essentiel. Ce passage a pour but d'éliminer le bruit causé lors de la mesure. À cet effet, une stratégie de prétraitement est utilisée comme suit :

Tout d'abord, une normalisation qui a pour but de compenser des variations en intensité de signal durant l'enregistrement des spectres, variations dues à des effets de diffusion de lumière et de taille de particules. Ensuite, une première dérivation est effectuée pour séparer les pics qui se chevauchent quand les basses fréquences des spectres deviennent proches de zéro. Une dérivation seconde est enfin utilisée pour localiser les composants dans les groupements d'absorption. Par conséquent, chaque dérivation affaiblit l'intensité d'absorption (Figure 2.13).

2.3.4.4 Développement du modèle de prédiction

Lors de l'analyse SPIR, la procédure de calibration vise à établir des relations entre les données SPIR et les valeurs de référence (résultats des analyses chimiques conventionnelles). Deux techniques très répandues de calibration chimiométrique : soit la régression en composantes principales et la régression partielle des moindres carrés. La calibration consiste à établir une relation entre la matrice des données spectrales (variables indépendantes) X et la matrice des valeurs de référence (variables dépendantes) Y . En effet, dans la prédiction par régression en composantes principales, les composantes principales sont développées uniquement à partir de la matrice de données X et la matrice Y n'est pas prise en compte tant que les composantes principales ne sont pas définies. Cependant, la régression partielle des moindres carrés permet de décomposer simultanément X et Y dans le but que ces composants expliquent le plus possible la covariance entre X et Y ce qui augmente le r^2 . Pour cette raison, la régression partielle a été choisie dans notre travail (Via, Zhou et coll. 2014).

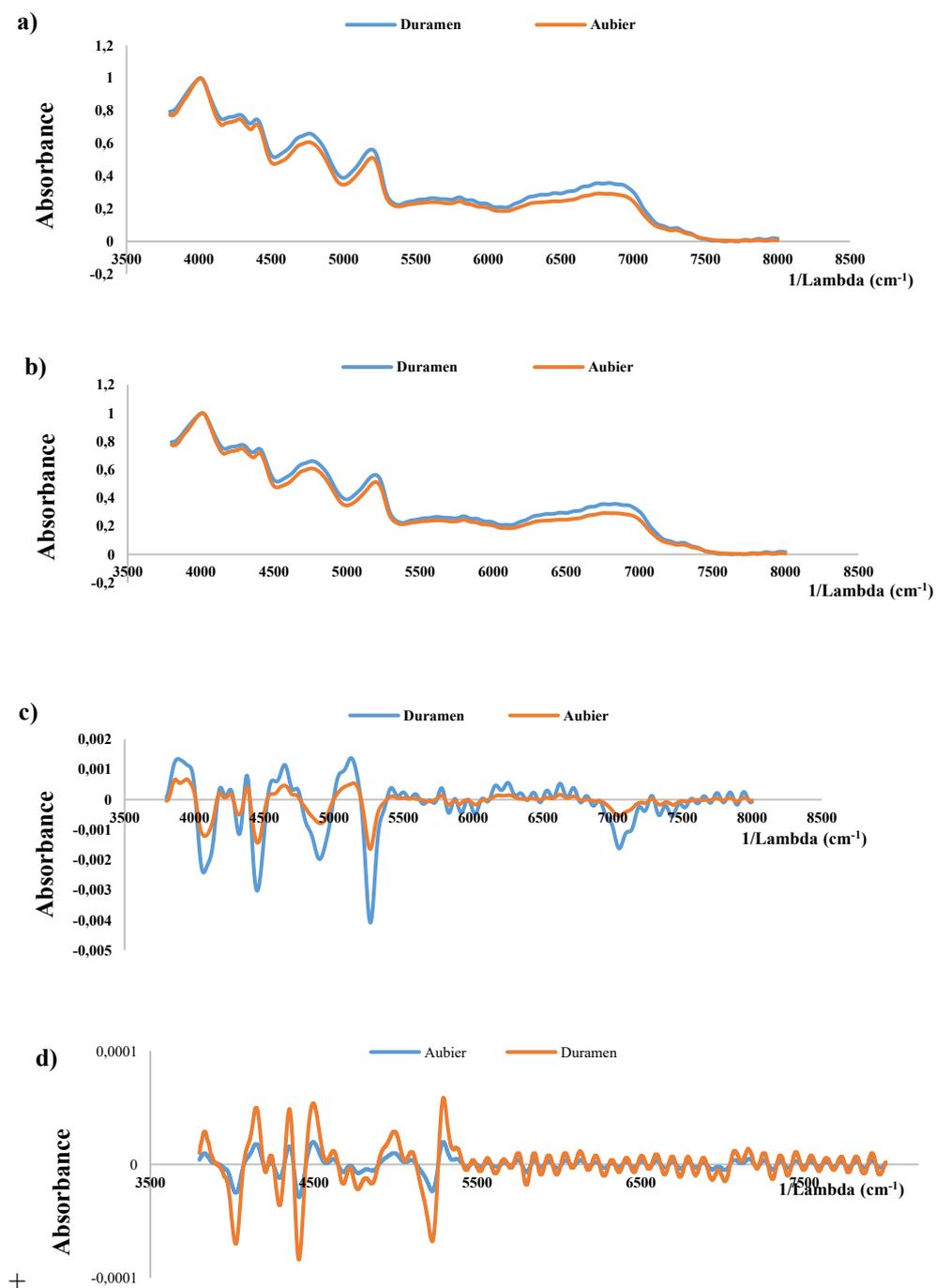


Figure 2.13 : les étapes de prétraitement des spectres dans l'infrarouge proche. **a)** données brutes. **b)** données normalisées. **c)** données après dérivée première. **d)** données après dérivée seconde

2.3.5 Analyse statistique

Cette partie a pour objectif de créer un modèle statistique qui a pour but d'expliquer les variables dépendantes qui sont notamment les propriétés chimiques (extractibles, lignines, celluloses, hémicelluloses) et physiques du bois (densité basale) sous l'effet de différents facteurs comme le site (**Duhamel-Ouest**, **Duparquet**, et **Villebois**), clone (**747215**, **915004**, **915005**, et **915319**), espacement (**1x4m**, **2x4m**, et **3x4m**), le type de bois (**Aubier** et **Duramen**), et aussi en utilisant le diamètre du tronc de l'échantillon comme covariable.

Les analyses de variance ont été effectuées à l'aide de la procédure MULTIVARIATE du logiciel SPSS (*Statistical Package for Social Sciences*) pour découvrir les facteurs qui ont une influence significative sur les propriétés chimiques et physiques. En considérant tous les termes comme des effets fixes, le modèle linéaire est écrit comme suit (Zhang, Wu et coll. 2015):

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.7)$$

Avec :

Y_{ijk} : Moyenne de la variable

μ : Moyenne générale

α_i : Effet du i^{th} site ;

β_j : Effet du j^{th} clone

γ_k : Effet du k^{th} espacement

$(\alpha\beta)_{ij}$: Effet de l'interaction entre le i^{th} site et le j^{th} clone

$(\alpha\gamma)_{ik}$: Effet de l'interaction entre le i^{th} site et le k^{th} espacement

$(\beta\gamma)_{jk}$: Effet de l'interaction entre le j^{th} clone et le k^{th} espacement

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$: Effet de l'interaction entre le i^{th} site, le j^{th} clone et le k^{th} espacement

ε_{ijk} : Erreur aléatoire

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Propriétés physiques

3.1.1 Variations de l'aubier, duramen, et écorce

3.1.1.1 Variation longitudinale

La Figure 3.1 décrit la variation des proportions des surfaces en aubier, duramen et écorce pour les six niveaux d'hauteur. La proportion de la surface d'aubier augmente par rapport à la surface du tronc pour chaque niveau de hauteur. Cela est dû à des processus physiologiques (la photosynthèse, la respiration et le transport) qui se produisent à différentes hauteurs. Le transport de l'eau se fait à travers les tissus xylèmes conducteurs de l'aubier (Pappas, Bélanger et coll. 2022). Donc une augmentation de la surface de l'aubier est dû à l'augmentation de la tension de l'eau (Perämäki, Vesala et coll. 2005).

Nos résultats montrent une diminution axiale de la proportion de surface du duramen avec la hauteur. D'après Berthier et Kokutse (2001) la formation de duramen est processus de développement, contrôlé à l'intérieur de l'arbre en fonction des changements biomécaniques et hydraulique nécessaire aux activités de l'arbre. Ces changements sont responsables à ce profil irrégulier de duramen dans l'arbre (Climent, Chambel et coll. 2003). Ces résultats sont conformes à des constatations antérieures dans la littérature (Bon, Harwood et coll. 2020). Pour la proportion de la surface de l'écorce, il y a une évolution de la base, quand la surface du tronc est importante, vers le sommet quand la surface du tronc diminue. Ces observations sont similaires avec les résultats obtenus pour les hybrides de peupliers faux-trembles (Hytönen, Beuker et coll. 2018). Comme La partie supérieure du tronc de l'arbre étant la plus exposée au soleil, elle nécessite une épaisse couche d'écorce pour maintenir une régulation thermique interne adéquate, empêchant la surchauffe due à l'exposition au soleil. Cette couche d'écorce agit comme une

barrière protectrice, protégeant les tissus internes de l'arbre des températures excessives en réfléchissant la lumière du soleil.

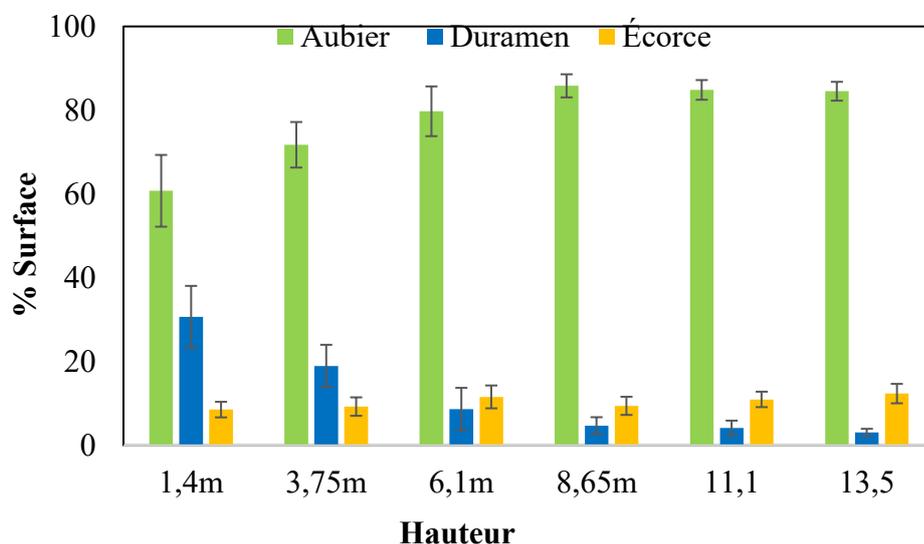


Figure 3.1 : Variation longitudinale moyenne en fonction de la hauteur des proportions de l'aubier, du duramen et de l'écorce

3.1.1.2 Analyse de variance

Une analyse de variance illustrée au Tableau 3.1 présente la variation des proportions de surface de chaque type de bois en fonction de l'effet de chaque facteur (site, clone, espacement), ainsi que leurs interactions. La covariable (le diamètre du tronc de l'échantillon) n'est pas retenue parce qu'elle n'est pas significative.

Tableau 3.1 : Résultats de l'analyse de la variance des proportions de surface de l'aubier, duramen et écorce des clones de peuplier hybride (Valeurs de F et niveau de signification)

Sources	Ddl	Type de bois		
		Aubier	Duramen	Écorce
Site (S)	2	16,01***	12,12***	7,40**
Clone (C)	3	8,70**	7,03**	3,40 ^{ns}
Espacement (E)	2	1,10 ^{ns}	1,08 ^{ns}	0,05 ^{ns}
(SxC)	6	1,70 ^{ns}	1,43 ^{ns}	2,35 ^{ns}
(SxE)	4	2,35 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,62 ^{ns}
(CxE)	6	0,68 ^{ns}	1,09 ^{ns}	0,91 ^{ns}
(SxCxE)	12	0,62 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,84 ^{ns}

Niveau de signification : ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$, et ns = non significatif.

L'effet du site sur les proportions de l'aubier, duramen et écorce est nettement significatif. La Figure 3.2 montre que les arbres situés sur des sites à faibles précipitations (Duhamel–Ouest), présentent une surface en aubier importante. Dans les conditions de sécheresse, les arbres produisent plus de surfaces d'aubier pour répondre aux besoins de la transpiration, du fonctionnement des tissus aux transports de nutriments et aux processus biochimiques, puisque les vaisseaux conducteurs présentent une plus petite surface d'aubier (Câmara, Vidaurre et coll 2023). La tendance inverse observée pour le duramen, puisque le mécanisme de production de bois de cœur en fonction de la quantité d'aubier donc on observe une quantité faible de duramen pour les sites les plus secs. De plus, les sites humides stimulent l'augmentation du diamètre, et donc la formation continue de bois de cœur (de Almeida, Vidaurre et coll. 2020). La proportion de surface d'écorce des arbres cultivés sur des sites secs est importante, tel que constaté dans l'étude de Rosell 2016. Selon Kreuzwieser et Rennenberg (2014), les précipitations excessives n'augmentent pas l'accumulation de biomasse dans l'écorce car les arbres n'utilisent pas efficacement les glucides en cas de stress hydrique, ce qui diminue la matière organique stockée dans l'écorce.

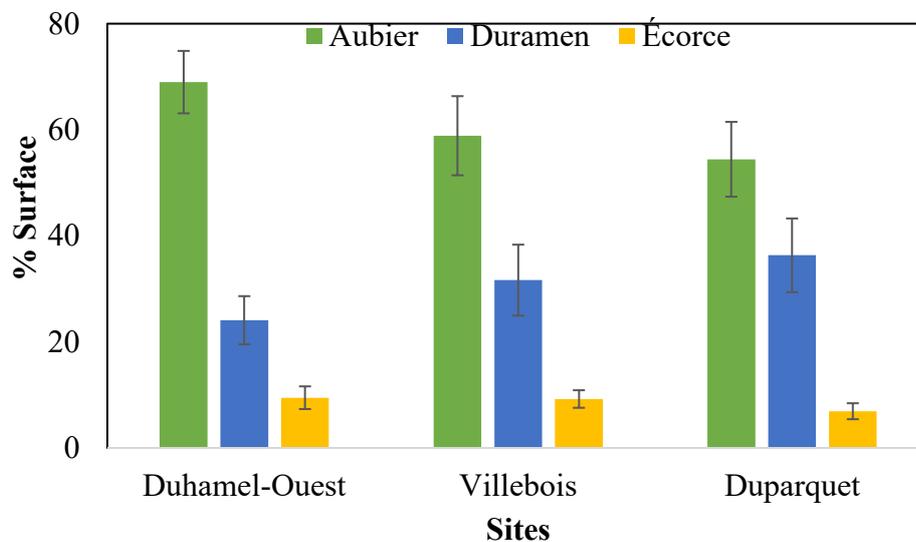


Figure 3.2 : Variation des proportions en surface de l'aubier, duramen et écorce sur chaque site

Les clones sont un facteur important de variation, comme le montre le Tableau 3.1. La Figure 3.3 montre la différence moyenne entre clones en %, ce qui permet de constater que le clone 747215 est doté d'une grande surface en duramen par rapport aux autres clones, donc une surface plus faible en aubier. Freitas, Oliveira et coll. (2019), indiquent que dans le cas de l'*Eucalyptus*, la proportion d'aubier et de duramen change d'un clone à l'autre. Ceci apparaît dans l'étude de Bon, Harwood et coll. (2020), pour les hybrides d'*Acacia* Diploïdes et Triploïdes. En ce qui concerne les interactions Site x Clone, aucun effet observé, donc le comportement des clones est indifférent quel que soit le site. Ce résultat rend la sélection plus facile dans les programmes d'amélioration des arbres. Quant à d'autres auteurs, ils soulignent le rôle prédominant des interactions clone-site sur les traits de croissance, plutôt que l'effet clonal (Zhang, Wu et coll. 2013).

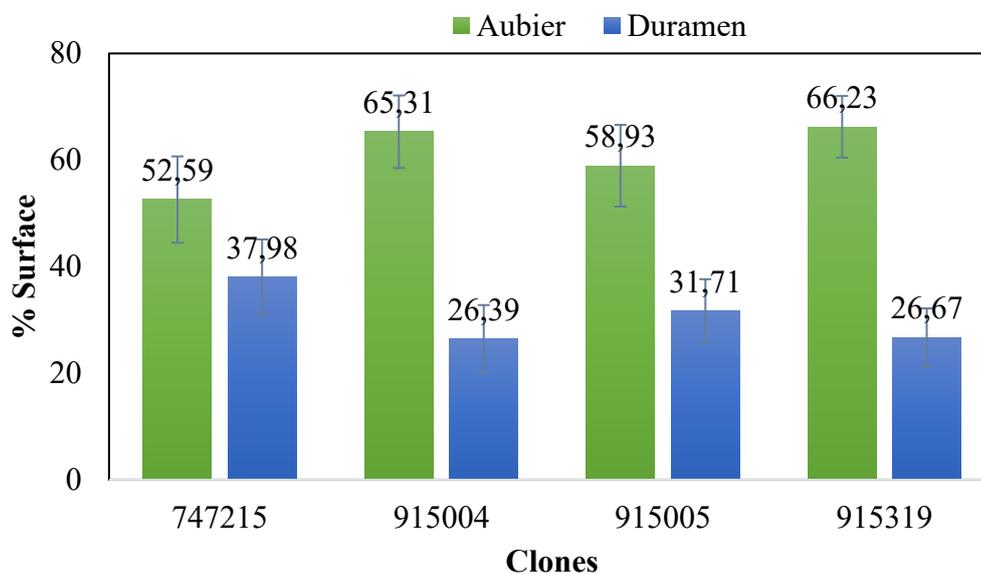


Figure 3.3 : Variation entre les clones des proportions moyenne en surface en aubier et duramen

Il est important de noter que l'espacement est un élément qui influe sur la croissance des arbres individuels. Plus les plantations sont espacées, plus la croissance en diamètre est élevée (Zhang, Fang et coll. 2022). En outre, plus l'espacement augmente, plus la surface de l'aubier augmente et celle du bois de cœur diminue (Brito, Vidaurre et coll. 2019). L'ANOVA (Tableau 3.1) montre que l'espacement n'a eu aucun effet sur les variations de la surface des 3 types de bois.

3.1.2 Masse volumique basale

De nombreuses études ont montré que la masse volumique basale du bois est parmi les critères essentiels d'évaluation de la qualité du bois ainsi que de sa capacité à être utilisé dans les industries de fabrication des produits reconstitués, et de pâte à papier (Rodriguez, Maiti et coll. 2016, Silva, Fernandes et coll. 2019). D'autre part, la masse volumique basale est un paramètre de sélection dans les programmes de sélection pour de nombreuses espèces d'arbres à croissance rapide (Gao, Wang et coll. 2017).

3.1.2.1 Analyse de variance

Tel que présenté dans le Tableau 3.2, le facteur site a eu un effet significatif sur la masse volumique basale. Cette variation entre les sites pourrait être dû aux effets édaphiques et aux conditions climatiques telles que la température, les quantités de précipitations, et la nature du sol. Ces résultats sont en accord avec les études de Huda, Koubaa et coll. (2014) qui ont signalé une influence significative du site sur la masse volumique basale des clones de peuplier hybride. La Figure 3.4 montre que la masse volumique a tendance à baisser des sites secs (Duhamel-Ouest) vers les sites humides (Duparquet). En effet, un environnement sec, avec des précipitations faibles et une température élevée, favorise la formation d'une structure fibreuse aux parois épaisses, offrant ainsi une densité élevée (Fichtler et Worbes 2012). Diverses études confirment ces constatations, en ajoutant le rôle des paramètres géographiques sur la variation de la masse volumique (Nabais, Hansen et coll. 2018).

Tableau 3.2 : Résultats de l'analyse de variance de la masse volumique basale

Sources	Ddl	F
Site (S)	2	5,22*
Clone (C)	3	4,63*
Espacement (E)	2	0,62 ^{ns}
(SxC)	6	1,09 ^{ns}
(SxE)	4	0,88 ^{ns}
(CxE)	6	0,50 ^{ns}
(SxCxE)	12	0,47 ^{ns}

Niveau de signification : * = $p < 0.05$, et ns = non significatif.

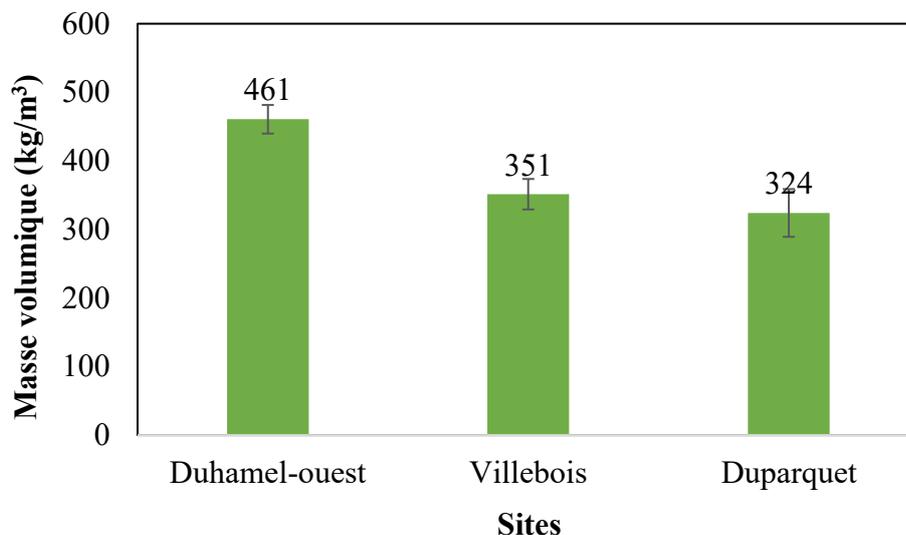


Figure 3.4 : Variation de la masse volumique basale moyenne entre les sites

L'analyse de variance (Tableau 3.2) indique aussi que le facteur clone agit sur la variation de la masse volumique basale. Avec ce résultat, il est possible de faire une meilleure sélection clonale en vue d'améliorer les propriétés physiques des clones de peuplier hybride. Cette différence entre les clones est observée sur la Figure 3.5, dont le clone 747215 détient la plus haute masse volumique, et ceci en raison du fait que ce clone est caractérisé par une proportion élevée de bois de cœur, et que généralement les vaisseaux du bois de cœur sont remplis de tylose, donc la densité du bois de cœur est plus élevée que celle de l'aubier (Fajardo 2018). Ces résultats concordent avec ceux de Huda, Koubaa et coll. (2014). Cependant, l'interaction site x clone n'était pas significative ainsi que le classement des clones ne varie pas d'un site à l'autre. Les mêmes résultats ont été enregistrés pour d'autres clones de peupliers hybrides (Huda, Koubaa et coll. 2014, Huda, Koubaa et coll. 2018). À l'inverse, certaines publications sur les peupliers hybrides ont souligné l'importance de l'interaction entre le clone x le site. (Zhang, Yu et coll. 2003, Fang, Liu et coll. 2021).

Aucune différence significative n'a été observée pour les trois types d'espacement. Ces résultats réaffirment les résultats observés par Zhang, Fang et coll. (2022), et Eloy, Caron et coll. (2014). Cependant, Ahmed, Jiang et coll (2020) ont conclu au

sujet des peupliers de *simonii* × *P. nigra*, que la densité du bois diminuait avec la diminution de l'espacement. La Figure 3.6 illustre cette tendance pour les clones étudiés, mais la différence n'est pas significative.

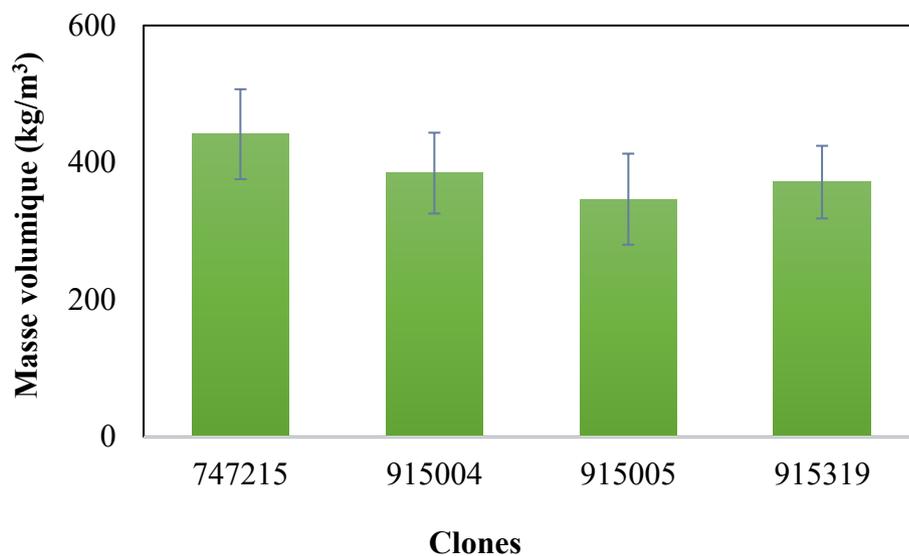


Figure 3.5 : Variation de la masse volumique basale moyenne pour chaque clone

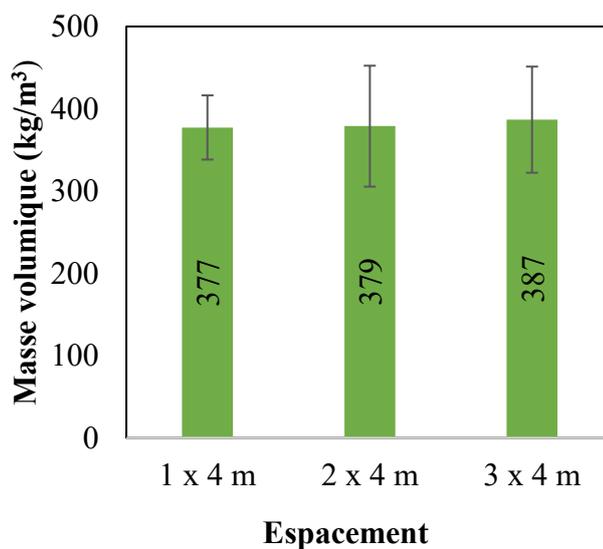


Figure 3.6 : Variation de la masse volumique basale moyenne entre les trois espacements

3.2 Propriétés chimiques

La composition chimique moyenne des quatre clones est présentée dans le Tableau 3.3 pour l'aubier et le duramen. En partant des matières extractibles, les résultats obtenus sont dans la même marge des valeurs (5,7% et 1,8%) obtenus par Krutul, Antczak et coll. (2019) pour ces études sur le bois de peuplier noir. En moyenne, l'aubier présentait une teneur légèrement élevée (4,5%) que le bois de cœur (4,4%). Ces résultats sont similaires aux résultats des teneurs en extractibles des peuplier deltoïde et peuplier baumier obtenu par Swan et Kellogg (1986). En ce qui concerne la lignine, on remarque un large intervalle de variation. Les valeurs obtenues sont proches de celles obtenues soit pour *P. deltoïdes* x *maximowiczii* et de *P. trichocarpa* environ 19,1% à 20,7% (Krutul, Antczak et coll. 2019). Contrairement aux extractibles, le duramen est plus riche en lignine que l'aubier (plus de 5,5 %). Ceci concordant avec les résultats de Swan and Kellogg (1986), et aussi ceux de Jin, Singh et coll. (2013) pour le bois de tulipier de Virginie. La cellulose représente le plus grand pourcentage de la masse du bois. Dans notre cas, elle représente environ 53,5% dans l'aubier et 52,3% dans le bois de cœur. Ces valeurs sont proches de celles rapportées par Sannigrahi, Ragauskas et coll. (2010) pour les peupliers. Les teneurs en hémicelluloses représentent en moyenne 15,5 % dans l'aubier et 15,3 % dans le duramen. Ces valeurs sont similaires à celles des peupliers hybrides analysés par Zhang, Fang et coll. (2022).

Tableau 3.3 : Variation de la composition chimique dans l'aubier et le duramen

	Extractibles	Lignine	Cellulose	Hémicellulose
Aubier	2,9% - 5,6%	16,2%-35,7%	45,5%-61,3%	5,9%-28%
Duramen	3,2%-5,7%	19,4%-37,7%	41,87-59,9%	8,6%-24,2

3.2.1 Variation entre les sites

L'analyse de la variance présentée dans le Tableau 3.4 indique que le facteur site agit sur la variation des teneurs en extractibles, lignines et hémicelluloses. Une teneur élevée en matières extractibles et en lignine a été enregistrée pour les arbres du site de Duparquet (Figure 3.7). Comme évoqué plus haut, les arbres de Duparquet ont une proportion de bois de cœur plus élevée que les autres sites, or celui-ci est généralement plus riche en extractibles, ce qui soutient nos résultats. En ce qui concerne la teneur en lignine, d'après Zhang, Fang et coll. (2022), ceci est lié aux taux des précipitations, qui favorisent la production de la lignine dans l'arbre. Cependant, la teneur en hémicelluloses est importante chez les arbres plantés sur Duhamel-Ouest (Figure 3.7). D'après Zhang, Zhang et coll. (2022) une forte teneur en hémicelluloses est associée à des sites ayant une latitude élevée et de faibles précipitations, tels que le site Duhamel-Ouest. Ces résultats suggérant que le choix du site pourrait être mis à profit pour améliorer ces constituants.

Toutefois, l'effet du site sur la teneur en cellulose n'était pas significatif (Tableau 3.4). Ce résultat contredit les conclusions de Fan, Ding et al. (2023), qui montrent qu'une augmentation des précipitations annuelles augmente la teneur en cellulose pour les Peupliers. Pour l'espèce *Larix olgensis*, Zhang, Zhang et al (2022), suggèrent une teneur en cellulose élevée dans les régions de basse latitude et de haute longitude. D'autre part, Cheng, Liu et coll. (2015), indiquent que des précipitations insuffisantes peuvent réduire le taux de division cellulaire et raccourcir le temps de différenciation des cellules, ce qui entraîne une réduction de la période de croissance, une inhibition de l'expansion cellulaire et des diamètres de lumière plus petits, et donc une réduction de la teneur en cellulose.

Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse de la variance des propriétés chimiques (Valeurs de F et niveau de signification)

Sources	Ddl ¹	Propriétés			
		Extractibles	Lignine	Cellulose	Hemicellulose
Site	2	17,44***	7,93**	2,00 ^{ns}	12,21***
Clone	3	2,42 ^{ns}	11,13***	11,76***	0,17 ^{ns}
Espacement	2	4,74*	2,86 ^{ns}	2,14 ^{ns}	0,33 ^{ns}
Type de bois	1	1,43 ^{ns}	6,17*	4,26 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Site x clone	6	1,21 ^{ns}	7,92***	7,55***	6,83***
Site x Espacement	4	4,13**	0,22 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,89 ^{ns}
Clone x Espacement	6	1,90 ^{ns}	1,06 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Site x Clone x Espacement	12	1,05 ^{ns}	1,90 ^{ns}	2,14*	2,88**

Ddl : Degré de liberté ; niveau de signification : * = p<0,05, ** = p<0,01, *** = p<0,001, et ns = non significatif.

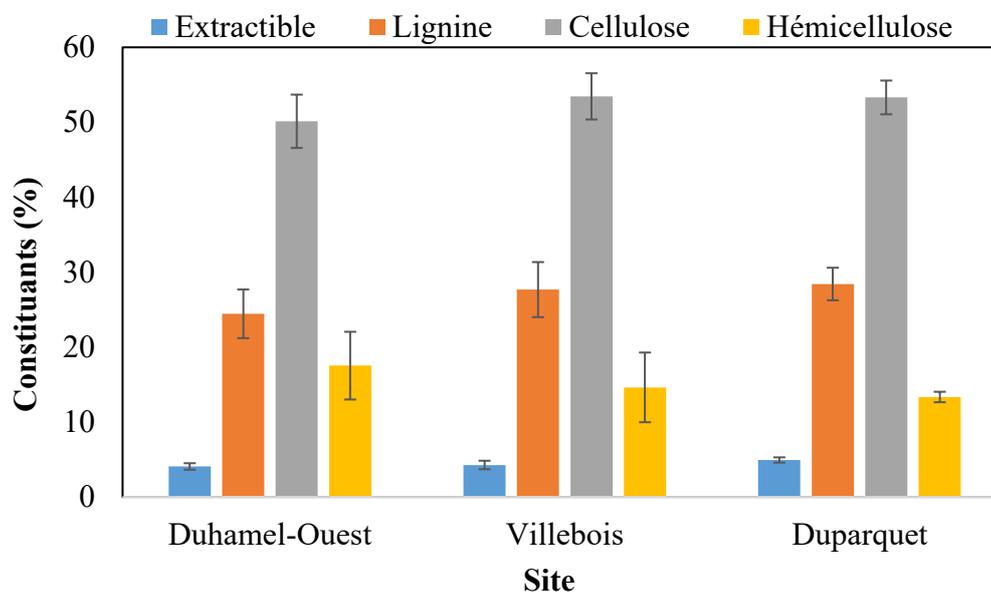


Figure 3.7 : Variation des constituants chimiques entre sites

3.2.2 Effet du clone et son interaction avec le site sur les constituants chimiques

L'ANOVA (Tableau 3.4) montre que le facteur clone n'a pas d'impact sur la variation des extractibles. Par conséquent, la teneur en matières extractibles des arbres étudiés présente un caractère génétique négligeable et les écarts entre les clones relativement faibles pourraient être induits par des facteurs environnementaux. Ces conclusions sont en accord avec les résultats antérieurs pour des clones d'*Eucalyptus* hybrides (Wu, Zhou et coll. 2017). En outre, on constate que les interactions site x clone n'ont aucun effet sur la variation des teneurs en extractibles.

Dans le cas de la teneur en lignine, l'analyse de la variance montre un effet hautement significatif du clone. Ces résultats sont en accord avec ceux de Paula Protásio, Lima et coll. (2021) pour les *Eucalyptus*. Cependant, une interaction clone × site significative a été observée, ce qui montre que la réponse des clones diffère selon les sites. Sur les sites Duhamel-Ouest et Villebois, le clone 915004 avait le taux de lignine le plus élevé, alors que sur le site de Duparquet, le clone 747215 enregistrait la plus forte teneur en lignine (Figure 3.8). Il faut donc choisir les clones en fonction des sites pour maximiser le gain génétique.

Pour la teneur en celluloses, des variations significatives entre les différents clones sont observées jusqu'à un niveau de certitude qui atteint 99,99%. Sur les sites Duhamel-Ouest et Duparquet, le clone 915319 est celui qui détient la plus forte teneur en cellulose par rapport aux autres clones, alors que sur le site de Villebois, c'est le clone 747215 qui enregistre la plus forte teneur (Figure 3.8). Une interaction significative ($p < 0,001$) est observée entre les sites et les clones, donnant la possibilité de prévoir un aménagement des clones en fonction des sites pour augmenter la contribution génétique (Zhang, Wu et coll. 2015).

Aucune différence significative n'a été enregistrée entre les clones sur le même site en termes de contenu en hémicelluloses (Tableau 3.4). Ces résultats sont en accord avec ceux de Zamora, Wyatt et coll. (2013) pour les peupliers hybrides et par Shen, Xing et coll. (2021) pour les peupliers *deltoïdes* et ses hybrides. Toutefois, une interaction significative clone x site ($p < 0,01$), similaire à celles observées pour les hybrides de saule par Serapiglia, Cameron et coll. (2013). En effet, les clones 747215 et 915004 génèrent plus d'hémicellulose sur le site Duhamel-Ouest que sur les autres sites, quant aux clones 915005 et 915319, ils sont plus performants sur le site Villebois que sur les autres (Figure 3.8).

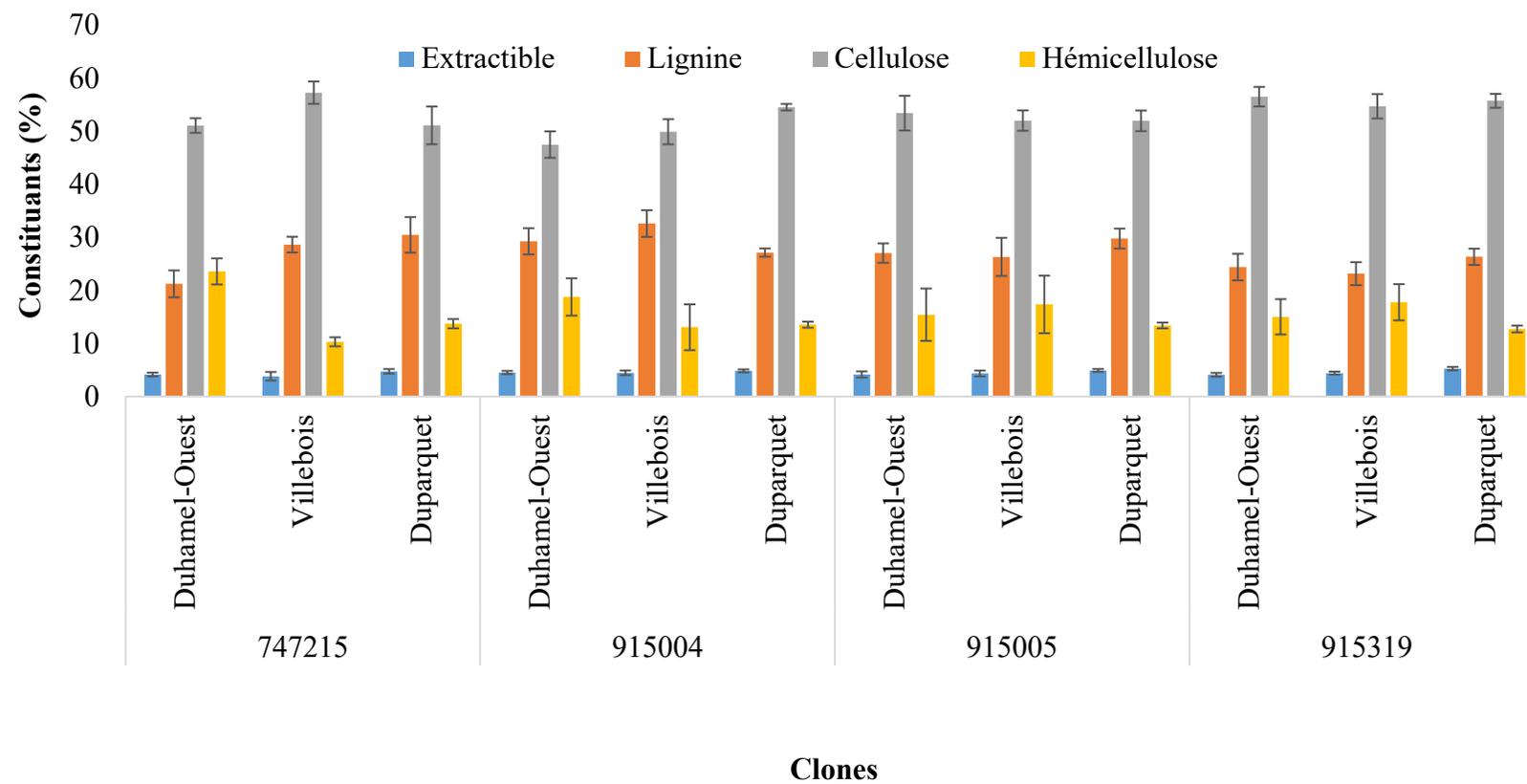


Figure 3.8 : Variation des constituants chimiques selon le clone et les sites

3.2.3 Effet de l'espacement

L'analyse de variance confirme que l'espacement entre les arbres a eu un effet significatif sur la teneur en matières extractibles (Tableau 3.4), ce qui rejoint les constatations de Soares Brito, Baptista Vidaurre et coll. (2021), pour l'effet des espacements sur les propriétés chimiques des clones d'*Eucalyptus*. Comme illustré à la Figure 3.9, plus les espacements de plantation sont étendus, plus le pourcentage des matières extractibles était élevé, comme il a été mentionné par Rocha, Vital et coll. (2016) pour l'*Eucalyptus*. De plus, des interactions significatives site x espacement montrent que l'espacement 3 x 4 m sur le site de Villebois, et celui de 2 x 4m sur les sites de Duhamel-Ouest et Duparquet, produit plus d'extractibles.

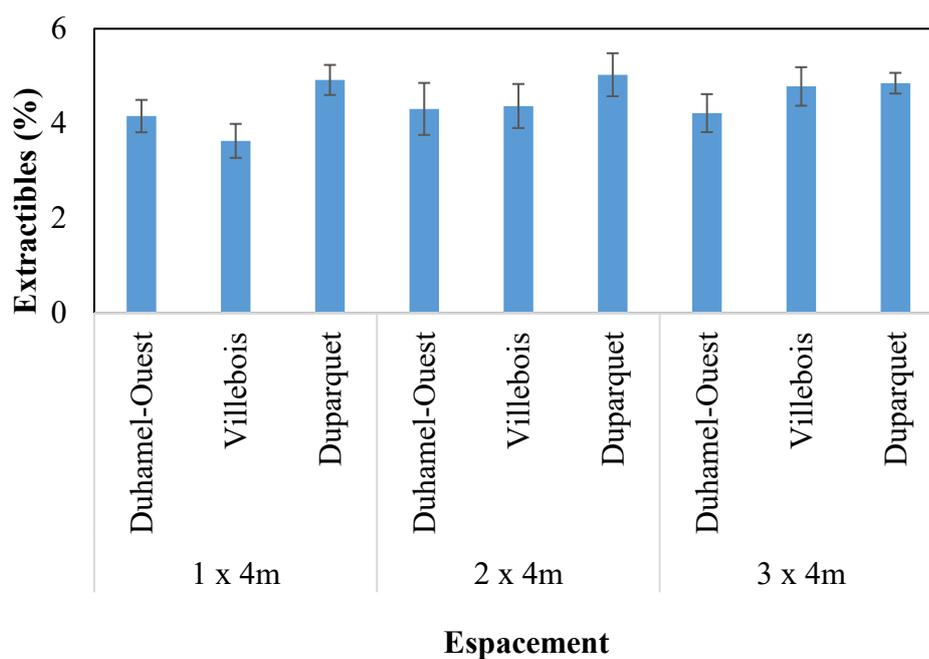


Figure 3.9 : Variation des teneurs en extractible selon l'espacement

En ce qui concerne l'effet de l'espacement relatif à la teneur en lignine, cellulose et hémicellulose, les résultats ne montrent aucune différence significative avec l'espacement. Cette observation rejoint les résultats de Zhang, Fang et coll. (2022) qui ont expliqué cette constatation par une faible plasticité phénotypique vis-à-vis de ces constituants. Cependant, des interactions significatives site x clone x espacement sont significatifs pour les teneurs en cellulose et en hémicelluloses. L'interprétation de l'effet de l'interaction triple est généralement complexe et pourrait s'expliquer par les erreurs expérimentales et d'autres facteurs environnementaux non considérés dans cette analyse.

3.2.4 Variation moyenne dans l'aubier et le duramen

L'effet du type de bois (aubier et bois de cœur) sur la teneur en extractibles, cellulose, et hémicelluloses, n'est pas significatif (Tableau 3.4). La répartition des substances extractibles est variable entre l'aubier et le bois de cœur. Généralement, le bois du cœur est celui qui est riche en matières extractibles. Les matières extractibles se présentent sous deux formes : polaire et non polaire. Dans le duramen, les matières extractibles sont polaires et non polaires, tandis que l'aubier ne contient que des composés polaires (Miranda, Sousa et coll. 2017). Selon Lukmandaru et Takahashi (2008), les extractibles non polaires augmentent avec l'âge du bois de cœur et la transition du bois juvénile vers le bois mature est caractérisée par une augmentation significative de la quantité d'extractibles non polaire. Ainsi, l'effet non significatif du type de bois s'explique par le fait que les arbres étudiés étaient jeunes.

En ce qui concerne la répartition de la lignine dans l'aubier et le duramen, on observe une variation significative ($p < 0.05$). La teneur en lignine dans l'aubier et le bois de cœur des peupliers hybrides était de 26,41 et 27,96 %, respectivement. D'après les études de Pažitný, Russ et coll. (2020) sur les peupliers, le duramen est la partie la plus ancienne de l'arbre et c'est pourquoi il contient plus de lignine que l'aubier, c'est-à-dire, la teneur en lignine a diminué de la moelle vers l'aubier (DeMartini et Wyman 2011, Shen, Xing et coll. 2021).

En revanche, la teneur en cellulose n'a révélé aucune variation significative entre les deux types de bois. Cette observation est conforme aux résultats de Zhang, Fang et coll. (2022) pour les peupliers. Tout comme la teneur en hémicelluloses ($p > 0,05$). Cela rejoint les résultats de Li, Deng et coll. (2019) pour les espèces de *Cunninghamia*, avec une légère variation qui diminue puis augmente de l'aubier vers le duramen. Cet aspect apparaît dans nos clones, qui contenaient environ 15,5 % d'hémicellulose dans l'aubier et 15,3 % dans le bois de cœur.

3.2.5 Corrélation entre les propriétés chimiques

Dans les programmes de sélection des arbres, la connaissance des corrélations des propriétés du bois est avantageuse pour définir les traits qui seront les plus importants à long terme avant de les inclure dans ces programmes. Dans ce but, le Tableau 3.5 présente une étude de corrélation entre les propriétés étudiées.

La teneur en extractibles est faiblement corrélé avec celui de la lignine, cette corrélation a été observée dans les résultats de Poke, Potts et coll. (2006) pour *Eucalyptus globulus* avec un niveau de significativité élevé. Les mêmes observations ont été publiées sur le peuplier blanc de Chine (Zhang, Wu et coll. 2015). D'autre part, une corrélation négative faible existe entre les extractibles et les holocelluloses, comme observé dans diverses recherches qui considèrent ce rapport significatif et négatif (Poke, Potts et coll. 2006, Zhang, Wu et coll. 2015). Les résultats de corrélation entre la lignine et la cellulose rejoint les résultats de Du, Xu et coll. (2014) pour le peuplier blanc, qui rapportent une corrélation négative et significative. Similairement, une corrélation négative et significative à 99% entre la lignine et l'hémicellulose. La même constatation est obtenue par Yang, Weng et coll. (2018) pour les hybrides d'Eucalyptus, et par Du, Xu et coll. (2014) pour le peuplier blanc de Chine. D'autres travaux estiment que la teneur en lignine est exprimée par un fort rapport syringyle (syringyle / (syringyle + guaiacyl)), et celle en hémicellulose par le ratio xylane/mannane. Ils ont conclu que ces deux rapports sont fortement corrélés (Huang, Wang et coll. 2016). D'après Min, Yang et coll. (2013) la baisse de la lignine entraîne une hausse des polysaccharides. Certains

auteurs voient dans cette corrélation une compétition entre la lignine et les holocelluloses pour capter les molécules de carbone (Novaes, Kirst et coll. 2010).

Tableau 3.5 : Coefficients de corrélation de Pearson entre les propriétés chimiques des clones de peuplier hybride

Variable	Extractibles	Lignine	Cellulose
Lignine	0,18		
Cellulose	-0,14	-0,26*	
Hémicellulose	-0,17	-0,66**	-0,54**

** : corrélation significative à 0,01, * : corrélation significative à 0,05

3.3 Modèles de prédiction par spectroscopie infrarouge proche

3.3.1 Spectre

La Figure 3.10 illustre les spectres des deux types de bois (aubier et bois de cœur) dans la région d'infrarouge proche à courte longueur d'onde (3500 cm^{-1} - 8000 cm^{-1}). Il est évident que le premier et le plus fort ensemble de bandes combinées apparaît dans l'infrarouge proche, dans la région entre 5200 cm^{-1} et 3700 cm^{-1} . La présence d'étirements C-H₂ et d'une combinaison entre les groupes C-H et les étirements C-O est observée dans cette région, à 3850 cm^{-1} , sont assimilées à la cellulose. En outre, une forte absorption à 4500 cm^{-1} attribuée aux étirements C-H₂ combinés aux déformations C-H₂ permet de quantifier la cellulose et les hémicelluloses, de même nous observons un pic à 5250 cm^{-1} dû à la présence des groupes C-H et C=O, qui sont utilisés pour prédire les hémicelluloses (Via, Zhou et coll. 2014). Le taux de lignine a été mesuré au moyen de l'absorption des combinaisons d'étirement des groupes O-H et C-O à 4470 cm^{-1} (Rammal 2016). Les liaisons C-O et O-H présentes dans les pics entre 5800 cm^{-1} et 6500 cm^{-1} sont utilisées pour prédire la teneur en extractibles (Schwanninger, Rodrigues et coll. 2011).

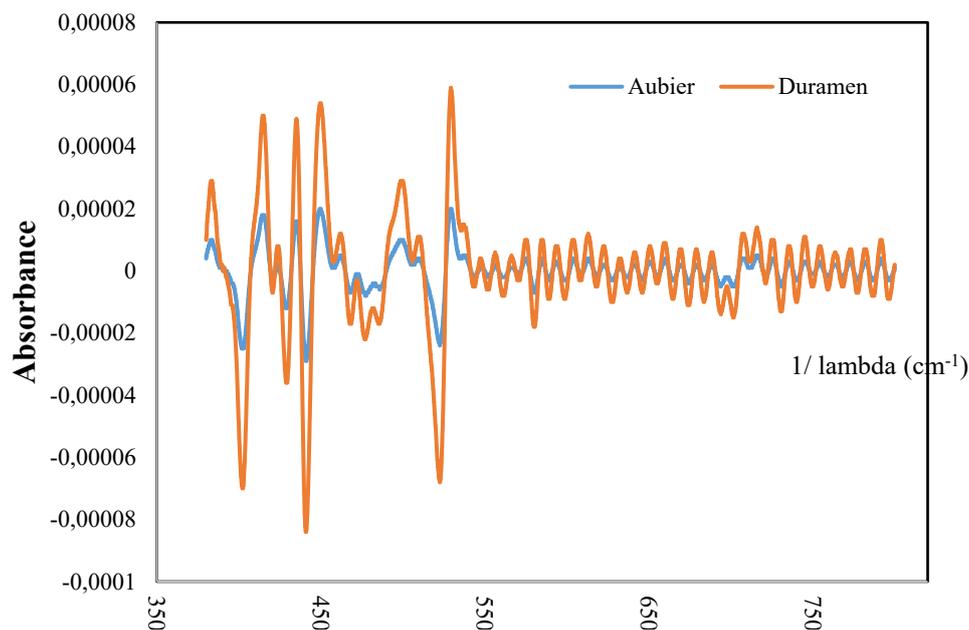


Figure 3.10 : Spectre infrarouge proche d'un échantillon pour l'aubier et le duramen

3.3.2 Prédiction des propriétés chimiques

Les performances et la précision des modèles étaient exprimées par le coefficient de détermination (R^2). La Figure 3.11, résume les modèles de prédictions des propriétés chimiques. Les extractibles ont donné le meilleur coefficient de détermination $R^2 = 0.75$ avec l'erreur standard de prédiction $SEP = 0.45$. Le modèle de prédiction de la lignine avait un coefficient de détermination $R^2 = 0,67$. Au sujet de la cellulose, la prédiction affiche un $R^2 = 0,66$, associé à un $SEP = 0,59$. Dans le cas de l'hémicellulose, le modèle obtenu présente un coefficient de détermination $R^2 = 0,64$ avec $SEP = 0,59$.

Afin de confirmer l'importance des facteurs pour les prédictions, on a créé des modèles de prédictions pour chaque facteur (site, clone, type de bois) des différents constituants, et on a remarqué que la diminution du nombre de facteurs diminue le coefficient de détermination R^2 (Figures : 3.12, 3.13, 3.14, 3.15), ceci rejoint les résultats de Park, Kim et coll. (2018), dans le cadre des modèles de prédiction de la lignine et de la cellulose, ils ont tout d'abord construit des modèles spécifiques pour

chaque espèce, en prenant en compte les variations propres à chaque espèce. Ensuite, ils ont développé un modèle global qui englobe toutes les espèces, permettant d'améliorer les prédictions à partir de la diversité des échantillons. De même dans les modèles des propriétés chimiques d'eucalyptus créent par Hodge, Acosta et coll. (2018) et ceux pour les peupliers hybrides (Schimleck, Payne et coll. 2005). En conclusion, ces facteurs sont importants pour avoir une bonne corrélation entre les valeurs prédites et mesurées

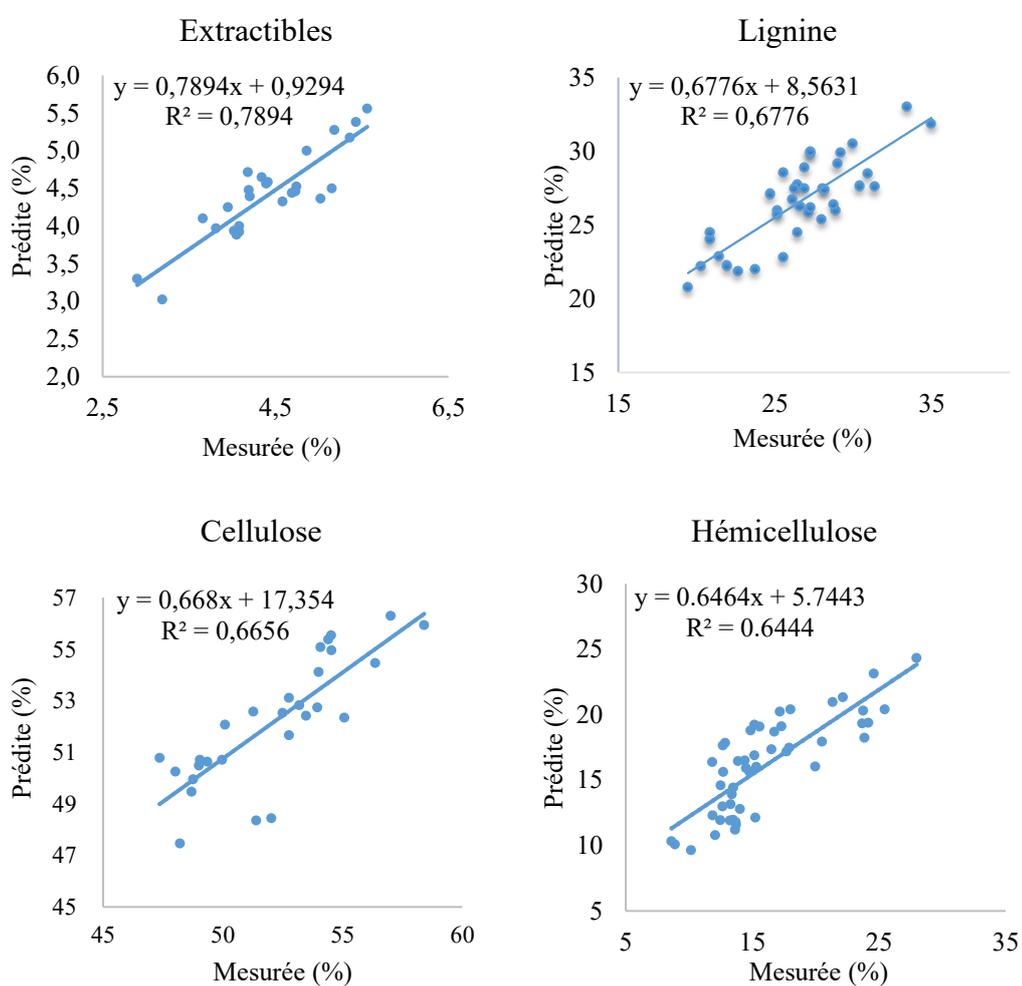


Figure 3.11 : Les modèles de prédictions des propriétés chimiques

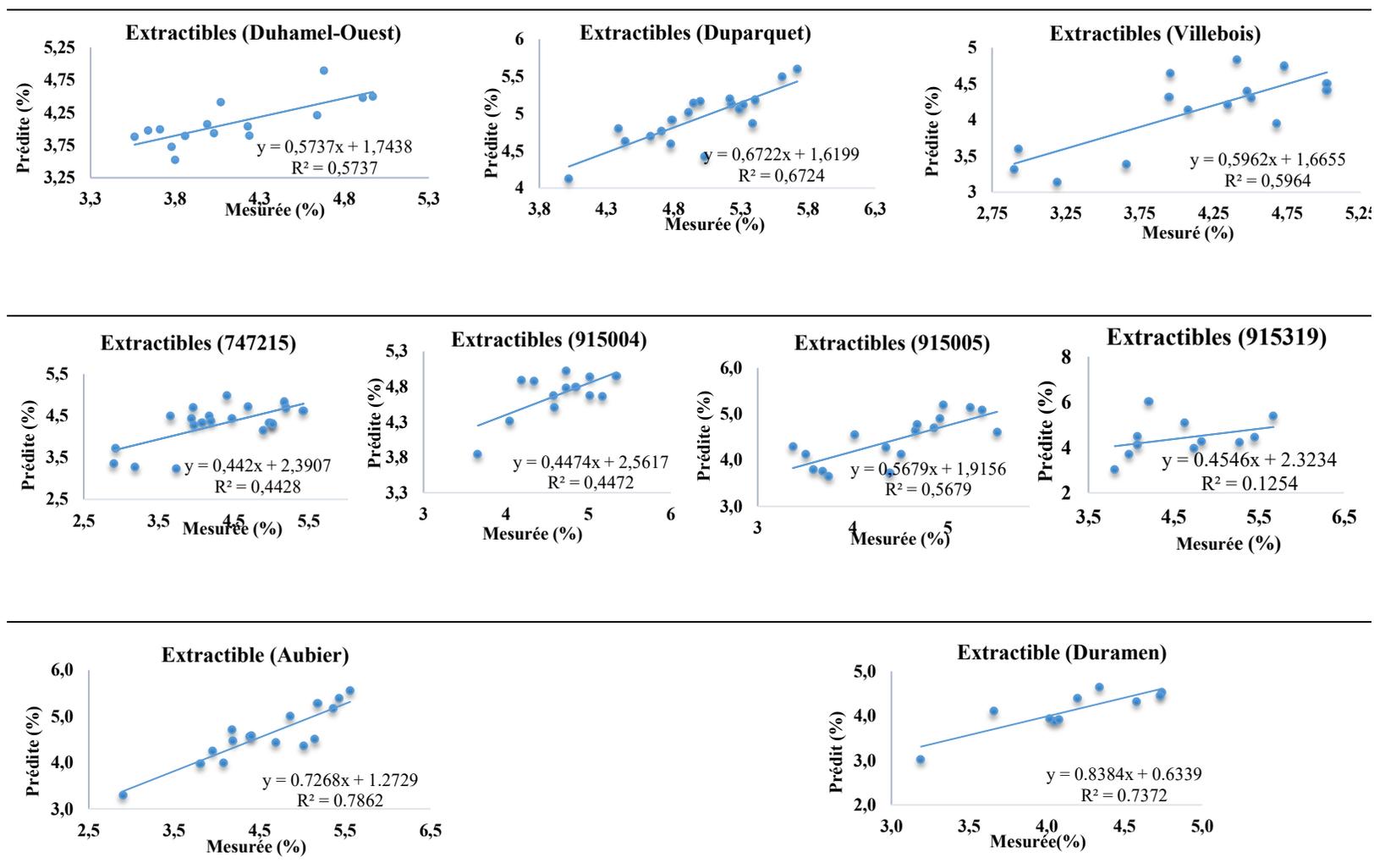


Figure 3.12 : Modèles de prédiction des extractibles pour chaque facteur.

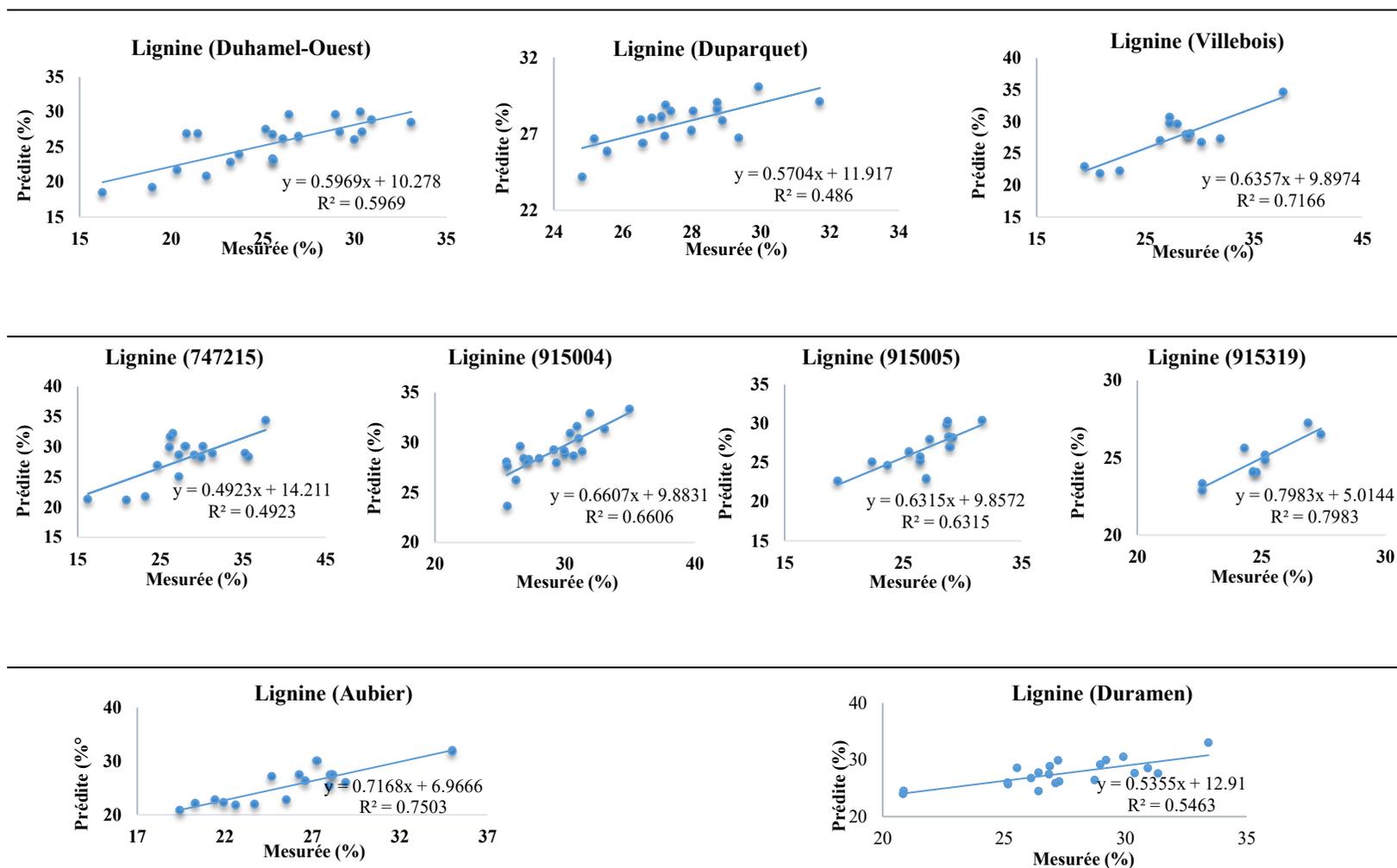


Figure 3.13 : Modèles de prédiction des lignines pour chaque facteur.

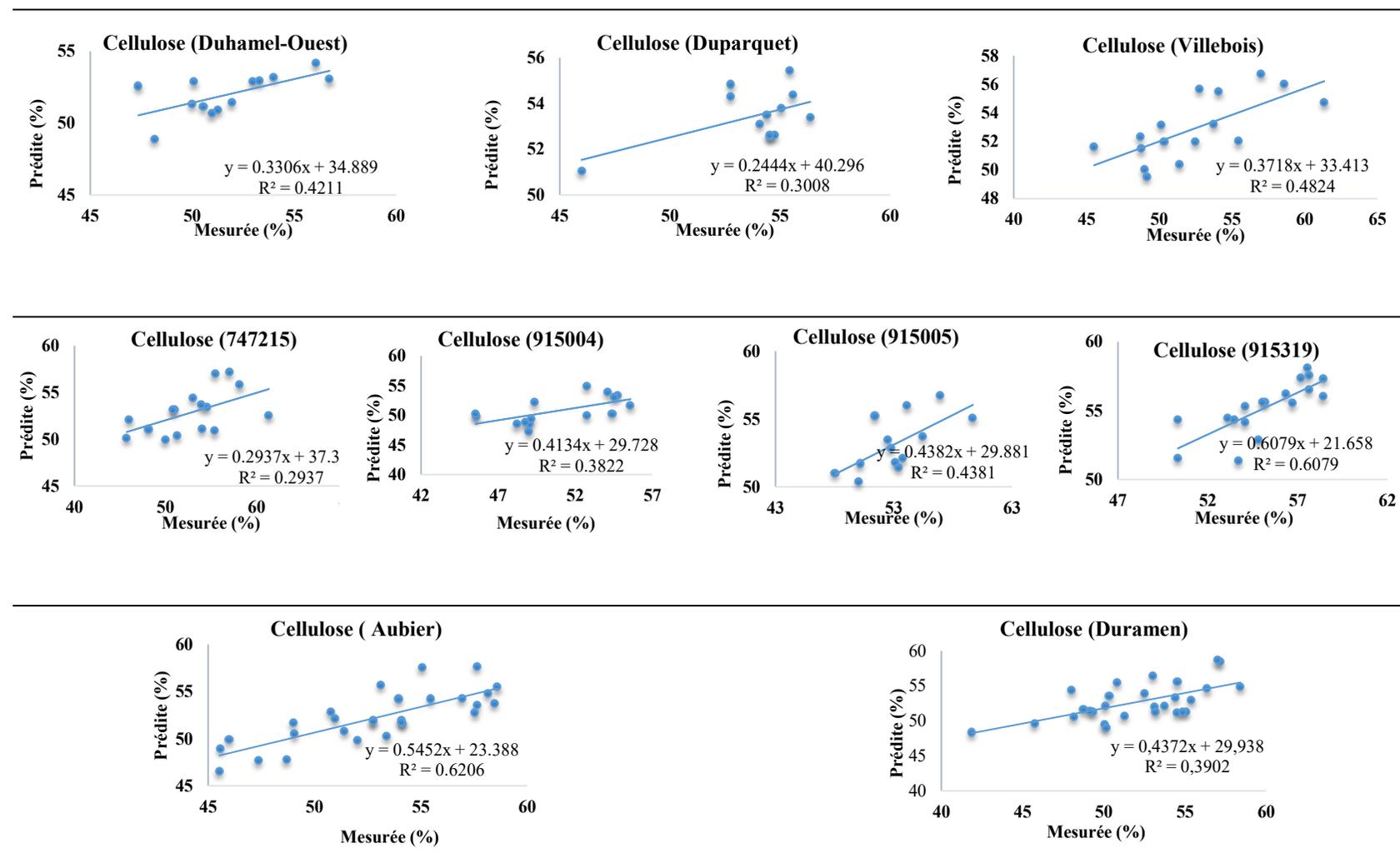


Figure 3.14 : Modèles de prédiction des celluloses pour chaque facteur.

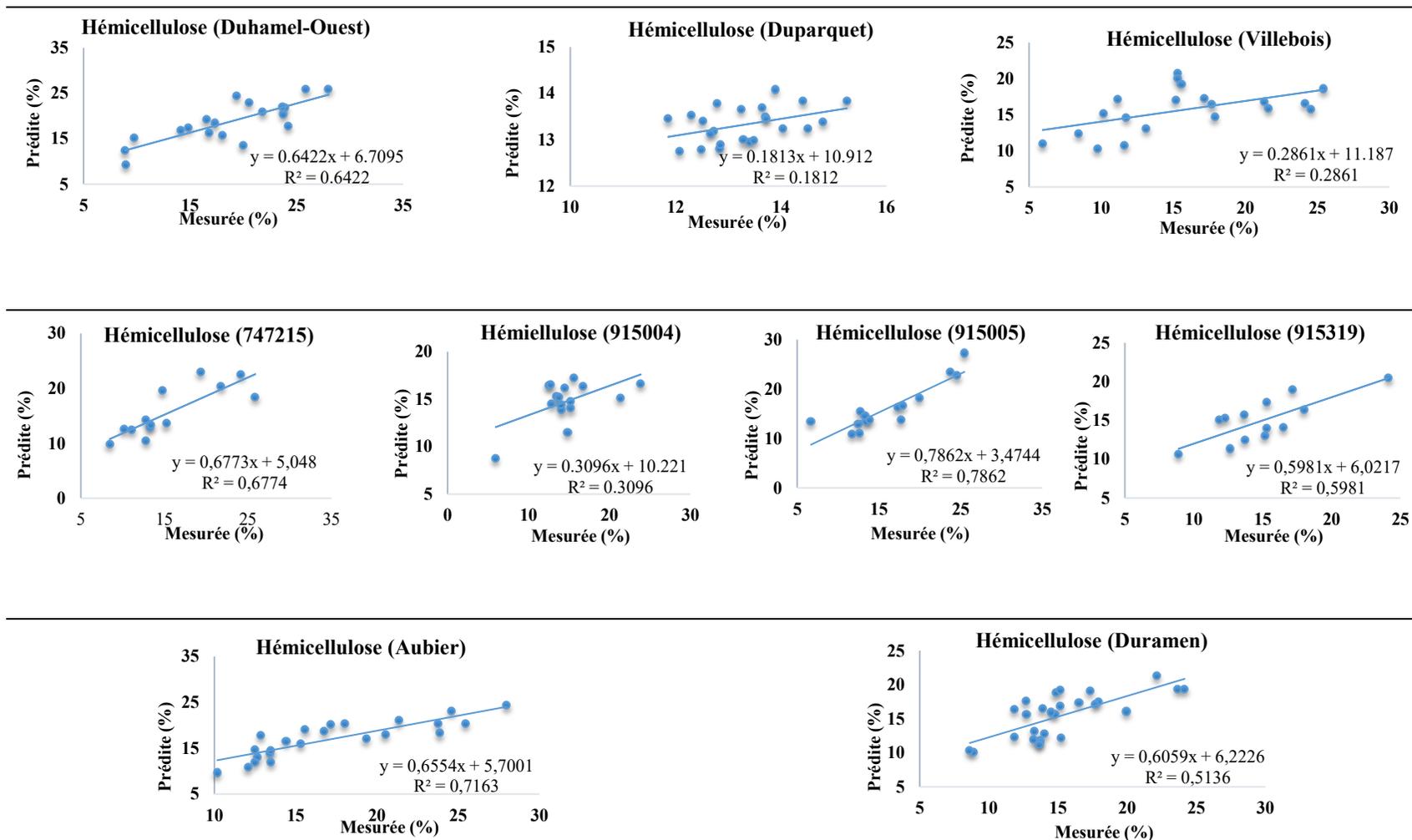


Figure 3.15 : Modèles de prédiction des hémicelluloses pour chaque facteur.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce projet était destiné à la caractérisation de la composition chimique de la biomasse des clones de peupliers hybrides, afin de développer des modèles prédictifs de ses constituants qui seront ensuite utilisés pour évaluer rapidement les propriétés d'échantillons inconnus en utilisant les données SPIR. Dans ce but, ce projet suit le déroulement suivant :

En premier lieu, on a commencé par une étude bibliographique qui débute par une généralité sur les peupliers hybrides, ensuite une deuxième partie qui détaille les étapes de formation du bois, ainsi que la composition chimique de la paroi cellulaire, puis une troisième partie détaillant les propriétés du bois de peuplier ainsi que leurs potentiels d'utilisation, et on clôture par un aperçu de la littérature sur l'historique d'utilisation de la spectroscopie infrarouge proche et la diversité des modèles de prédictions pour différentes propriétés du bois.

En second lieu, on a défini les objectifs ainsi que les hypothèses du projet, ensuite on a précisé les sites d'étude et la stratégie d'échantillonnage (3 sites x 4 clones x 3 espacements), pour arriver à une description détaillée du protocole expérimental. Donc le scénario méthodologique commence tout d'abord par la mesure de surface de l'aubier, du duramen et de l'écorce pour les 6 niveaux de hauteur de l'arbre. Ensuite, on a procédé à la préparation des échantillons de la rondelle du 1^{er} niveau ; des plaquettes sont découpées pour la mesure de la densité basale et pour le reste on a fait de l'écorçage, la séparation de l'aubier et du duramen, le broyage et le tamisage. La farine du bois obtenu a été analysée par différentes méthodes de caractérisation chimique destructive (méthodes conventionnelles) et non destructive (spectroscopie infrarouge proche). Finalement la collecte des données nous a permis de développer des modèles de prédiction des propriétés chimiques avec la méthode de régression partielle des moindres carrés

En dernier lieu, une analyse de variance nous a montré l'effet significatif du site et clones sur la variation des propriétés physiques, et chimiques ce qui s'explique par l'intervention de plusieurs paramètres, notamment le climat, le type de sol, et la localisation du site, contribuent au développement de caractéristiques chez les arbres. Au sujet de l'effet du clone et de l'interaction clone x site, dans le cas de certaines propriétés physiques, la performance du clone est garantie sur n'importe quel site, tandis que pour les propriétés chimiques, le choix adéquat de la plantation des clones sur des sites sélectionnés est important. L'espacement aussi, est l'un des facteurs qu'il faut tenir en compte, mais dans notre étude ça n'a affecté que les teneurs en extractibles. À noter aussi que la variation des propriétés chimiques de l'aubier au bois de cœur ne constitue pas un facteur déterminant qui affecte les propriétés étudiées.

Après avoir quantifié les teneurs des constituants chimiques, des corrélations ont été établies pour comprendre la relation entre eux, d'où il ressort une corrélation négative significative de la lignine avec la cellulose et l'hémicellulose et entre la cellulose et l'hémicellulose.

Finalement, les informations collectées (spectres dans le proche infrarouge et valeurs mesurées) ont été traitées par un logiciel de quantification permettant de développer des modèles de prédiction ayant de bons coefficients de détermination. Toutefois, en développant des modèles spécifiques adaptés au site, clone, et type de bois on a remarqué que le coefficient de détermination diminuait, et ceci est dû à la diminution du nombre de facteurs.

Quant aux perspectives de poursuite de cette recherche, il est recommandé de continuer la détermination des polysaccharides. De plus, compte tenu des modèles de prédiction obtenue, il faut noter que le nombre d'échantillons était limité pour assurer la validation. Par conséquent, afin d'accroître la précision de nos prévisions, il est impératif de poursuivre d'autres études en élargissant notre échantillonnage, ce qui permettra d'améliorer et de valider les modèles existants.

En outre, il serait judicieux d'envisager l'intégration de nouveaux sites et de clones supplémentaires afin de renforcer la robustesse de nos modèles de prédiction, tout en obtenant une perspective plus complète de la diversité des peupliers hybrides.

Enfin, il est crucial de suivre l'évolution de la composition chimique des arbres sur plusieurs saisons ou années, dans le but de mieux comprendre comment elle varie en fonction du temps et des conditions climatiques changeantes. Cette démarche nous permettra d'acquérir des connaissances plus approfondies sur ce sujet.

RÉFÉRENCES

- Abdolzadeh, H., Doosthoseini, K., Karimi, A. N., et Enayati, A. A. (2011). "The effect of acetylated particle distribution and type of resin on physical and mechanical properties of poplar particleboard." *European Journal of Wood and Wood Products* 69(1): 3-10
- Agriculture and Agri-food Canada, 2012. Soil Landscapes of Canada. . Accessed October 2012
- Ahmed, A. K. M., Fu, Z., Ding, C., Jiang, L., Han, X., Yang, A., ... & Zhao, X. (2020). Growth and wood properties of a 38-year-old *Populus simonii* × *P. nigra* plantation established with different densities in semi-arid areas of northeastern China. *Journal of Forestry Research*, 31(2), 497-506.
- Ai, J. and U. Tschirner (2010). "Fiber length and pulping characteristics of switchgrass, alfalfa stems, hybrid poplar and willow biomasses." *Bioresource Technology* 101(1): 215-221.
- Al-Mefarrej, H. A., Abdel-Aal, M. A., Nasser, R. A., et Shetta, N. D. (2011). "Impact of initial tree spacing and stem height level on chemical composition of *Leucaena Leucocephala* trees grown in Riyadh region." *World Applied Sciences*. J 12(7)
- Alves, A., Simões, R., Stackpole, D. J., Vaillancourt, R. E., Potts, B. M., Schwanninger, M., et Rodrigues, J. (2011). "Determination of the syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus globulus* wood lignin by near infrared-based partial least squares regression models using analytical pyrolysis as the reference method." *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 19(5): 343-348.

- Andrade, C. R., Trugilho, P. F., Napoli, A., Vieira, R. D. S., Lima, J. T., et Sousa, L. C. D. (2010). "Estimation of the mechanical properties of wood from *Eucalyptus urophylla* using near infrared spectroscopy." *Cerne* 16: 291-298.
- Arriel, T. G., Ramalho, F. M. G., Lima, R. A. B., Sousa, K. I. R. D., Hein, P. R. G., et Trugilho, P. F. (2019). "Developing near infrared spectroscopic models for predicting density of *Eucalyptus* wood based on indirect measurement." *Cerne* 25: 294-300.
- Arseneau, C., & Chiu, M. (2003, March). Canada—A land of plantations. In *UNFF Intersessional Experts Meeting. Maximising the role of planted forests in sustainable forest management. New Zealand* (pp. 24-30).
- Balatinecz, J. J., Kretschmann, D. E., et Leclercq, A. (2001). Achievements in the utilization of poplar wood—guideposts for the future. *The Forestry Chronicle*, 77(2), 265-269.
- Bektaş, İ., Tutuş, A., et Gültekin, G. (2020). "The effect of sapwood and heartwood differences on mechanical properties of fast-growing tree species." *Drvena Industrija* 71(3): 261-269.
- Berthier, S., Kokutse, A. D., Stokes, A., et Fourcaud, T. (2001). Irregular heartwood formation in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait): consequences for biomechanical and hydraulic tree functioning. *Annals of Botany*, 87(1), 19-25.
- Blankenhorn, P. R., Bowersox, T. W., Kuklewski, K. M., Stimely, G. L., et Murphey, W. K. (1985). "Comparison of selected fuel and chemical content values for seven *Populus* hybrid clones." *Wood and Fiber Science* 17(2): 148-158.
- Bon, P. V., Harwood, C. E., Chi, N. Q., Thinh, H. H., et Kien, N. D. (2020). "Comparing wood density, heartwood proportion and bark thickness of diploid and triploid *Acacia* hybrid clones in Vietnam." *Journal of Tropical Forest Science* 32(2): 206-216.

- Bremer, M., Oktaee, J., Einer, D., Fischer, S., & Wagenführ, A. (2021). Investigation on the potential of poplar bark from short-rotation coppices as bio-based fungicidal additives. *BioEnergy Research*, 14, 482-491.
- Brito, A. S., Vidaurre, G. B., Oliveira, J. T. D. S., Missia da Silva, J. G., Rodrigues, B. P., et Carneiro, A. D. C. O. (2019). "Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of *Eucalyptus* wood." *Floresta e Ambiente* 26, p. 1-9.
- Browning, B. L. (1967). "Methods of wood chemistry. Volume II, Interscience, New York. 498 p.
- Brunner, G. (2014). Processing of biomass with hydrothermal and supercritical water. *Supercritical Fluid Science and Technology*, Elsevier. 5: 395-509.
- Buchman, D., Jackson, J., Berguson, W. E., McMahon, B. G., Nelson, N. D., DuPlissis, J., et Host, G. E. (2020). "Grower's Guide for Hybrid Poplar Plantations for Biomass Production." *Natural Resources Research Institute Technical Report*, p. 1.
- Calvo-Flores, F. G., et Dobado, J. A. (2010). Lignin as renewable raw material. *ChemSusChem*, 3(11), 1227-1235. Cavalaris, C. (2017). "Effects of row spacing on growth, yield and quality parameters of sweet sorghum." *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 34(1): 229-237.
- Câmara, A. P., Vidaurre, G. B., De Oliveira, J. C. L., Moulin, J. C., De Almeida, M. N. F., Teodoro, P. E., et Campoe, O. C. (2023). Rainfall exclusion changes the sapwood of eucalyptus wood in humid and dry sites. *European Journal of Forest Research*, p. 1-14.
- Cheng, R. M., Liu, Z. B., Feng, X. H., et Xiao, W. F. (2015). Advances in research on the effect of climatic change on xylem growth of trees. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(6), 147-154.

- Climent, J., Chambel, M. R., Gil, L., et Pardos, J. A. (2003). Vertical heartwood variation patterns and prediction of heartwood volume in *Pinus canariensis* Sm. *Forest Ecology and Management*, 174(1-3), 203-211.
- Claisse, N. (2012). *Préparation et modification d'oligosaccharides de cellulose par chimie douce bio-inspirée*. Tèse de doctorat, École doctorale chimie et science du vivant (Grenoble), p. 34-35.
- Cobas, A. C., Felissia, F. E., Monteoliva, S., & Area, M. C. (2013). Optimization of the properties of poplar and willow chemimechanical pulps by a mixture design of juvenile and mature wood. *BioResources*, 8(2), 1646-1656.
- Coelho, J., Fidalgo, B., Crisóstomo, M. M., Salas-González, R., Coimbra, A. P., et Mendes, M. (2021). Non-destructive fast estimation of tree stem height and volume using image processing. *Symmetry*, 13(3), 374.
- Costa, R., Lourenço, A., Oliveira, V., et Pereira, H. (2019). "Chemical characterization of cork, phloem and wood from different *Quercus suber* provenances and trees." *Heliyon* 5(12): e02910.
- Cronk, Q. (2005). "Plant eco-devo: the potential of poplar as a model organism." *New Phytologist* 166(1): 39-48.
- Cuny, H. E., et Rathgeber, C. B. (2021). "Une synthèse sur le fonctionnement et la régulation des processus cellulaires de la formation du bois." *Rev For. Fr.*, 2014, vol. 67, no. 6, pp. 761–777.
- Dahlen, J., Diaz, I., Schimleck, L., et Jones, P. D. (2017). "Near-infrared spectroscopy prediction of southern pine No. 2 lumber physical and mechanical properties." *Wood Science and Technology* 51(2): 309-322.
- Daugaviete, M., Makovskis, K., Lazdins, A., & Lazdina, D. (2022). Suitability of Fast-Growing Tree Species (*Salix* spp., *Populus* spp., *Alnus* spp.) for the Establishment of Economic Agroforestry Zones for Biomass Energy in the Baltic Sea Region. *Sustainability*, 14(24), 16564.

- de Almeida, M. N. F., Vidaurre, G. B., Pezzopane, J. E. M., Lousada, J. L. P. C., Silva, M. E. C. M., Câmara, A. P., ... et Oliveira, R. F. (2020). "Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions." *Forest Ecology and Management* 458: 117743.
- De Boever, L., Vansteenkiste, D., Van Acker, J., et Stevens, M. (2007). "End-use related physical and mechanical properties of selected fast-growing poplar hybrids (*Populus trichocarpa* × *P. deltoides*)." *Annals of Forest Science* 64(6): 621-630.
- de Paula Protásio, T., Lima, M. D. R., Teixeira, R. A. C., do Rosário, F. S., de Araújo, A. C. C., de Assis, M. R., et Trugilho, P. F. (2021). "Influence of extractives content and lignin quality of *Eucalyptus* wood in the mass balance of pyrolysis process." *BioEnergy Research* 14(1): 175-189.
- DeMartini, J. D. et C. E. Wyman (2011). "Changes in composition and sugar release across the annual rings of *Populus* wood and implications on recalcitrance." *Bioresource Technology* 102(2): 1352-1358.
- Derbowka, D. R., Andersen, S., Lee-Andersen, S., et Stenberg, C. (2012). "Poplar and willow cultivation and utilization in Canada. 2008–2011 *Canadian Country Progress Report*." *Canadian Report to the 24th IPC Session, Dehradun, India—International Poplar Commis.*
- Dickmann, D. I. (2001). "An overview of the genus *Populus*". In: Dickman, D. I., Isebrands, J. G., JE Eckenwalder, J. E., and Richardson, J. (eds) *Poplar Culture in North America*. part A, Chapter 1. NRC Research Press, Ottawa, ON, Canada, pp. 1-42.
- Downes, G. M., Harwood, C. E., Wiedemann, J., Ebdon, N., Bond, H., et Meder, R. (2012). "Radial variation in Kraft pulp yield and cellulose content in *Eucalyptus globulus* wood across three contrasting sites predicted by near infrared spectroscopy." *Canadian journal of Forest Research* 42(8): 1577-1586.

- Du, Q., Xu, B., Gong, C., Yang, X., Pan, W., Tian, J., ... et Zhang, D. (2014). "Variation in growth, leaf, and wood property traits of Chinese white poplar (*Populus tomentosa*), a major industrial tree species in Northern China." *Canadian Journal of Forest Research* 44(4): 326-339.
- Eloy E, Caron BO, Silva DA, Schmidt D, Trevisan R, Behling A et coll. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. *Revista Árvore* 2014; 38(3): 551-559
- Fajardo, A. (2018). Insights into intraspecific wood density variation and its relationship to growth, height and elevation in a treeline species. *Plant Biology*, 20(3), 456-464.
- Fan, J., Ding, C., Wang, S., Ma, C., Zhang, C., Li, Y., ... et Su, X. (2023). Effects of site conditions on growth and wood properties of *Populus × euramericana* cv. '74/76'. *Journal of Forestry Research*, 34(2), 401-414.
- Fang, S., Liu, Y., Yue, J., Tian, Y., et Xu, X. (2021). "Assessments of growth performance, crown structure, stem form and wood property of introduced poplar clones: Results from a long-term field experiment at a lowland site." *Forest Ecology and Management* 479: 118586.
- FAO (2022) The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. FAO, Rome. <https://doi.org/10.4060/cb9360>
- Farrar, J. L. (1995). *Trees in Canada*. National Resources of Canada, Canadian Forestry Service, Ottawa, Ontario, 502
- Ferreira, G. W., Roque, J. V., Soares, E. M., Silva, I. R., Silva, E. F., Vasconcelos, A. A., et Teófilo, R. F. (2018). "Temporal decomposition sampling and chemical characterization of eucalyptus harvest residues using NIR spectroscopy and chemometric methods." *Talanta* 188: 168-177.

- Fichtler, E., & Worbes, M. (2012). Wood anatomical variables in tropical trees and their relation to site conditions and individual tree morphology. *Iawa Journal*, 33(2), 119-140.
- Fortier, J., Truax, B., Gagnon, D., et Lambert, F. (2012). "Hybrid poplar yields in Québec: Implications for a sustainable forest zoning management system." *The Forestry Chronicle* 88(4): 391-407.
- Frassoldati, A., & Ranzi, E. (2019). Modeling of Thermochemical Conversion of Biomasses. In *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* (pp. 1-10). Elsevier.
- Freitas, T. P., Oliveira, J. T. D. S., Paes, J. B., Vidaurre, G. B., et Lima, J. L. (2019). "Environmental effect on growth and characteristics of Eucalyptus wood." *Floresta e Ambiente* 26. p. 1–10.
- Fujimoto, T., Yamamoto, H., et Tsuchikawa, S. (2007). "Estimation of wood stiffness and strength properties of hybrid larch by near-infrared spectroscopy." *Applied Spectroscopy* 61(8): 882-888.
- Gao, S., Wang, X., Wiemann, M. C., Brashaw, B. K., Ross, R. J., et Wang, L. (2017). "A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees." *Annals of Forest Science* 74(2): 1-13.
- Gao, W., Shu, T., Liu, Q., Ling, S., Guan, Y., Liu, S., et Zhou, L. (2021). "Predictive modeling of lignin content for the screening of suitable poplar genotypes based on fourier transform–raman spectrometry." *ACS omega* 6(12): 8578-8587
- Gebreselassie, M. N., Ader, K., Boizot, N., Millier, F., Charpentier, J. P., Alves, A., et Segura, V. (2017). "Near-infrared spectroscopy enables the genetic analysis of chemical properties in a large set of wood samples from *Populus nigra* (L.) natural populations." *Industrial Crops and Products* 107: 159-171.

- Ghalia, M. A., & Dahman, Y. (2017). Synthesis and utilization of natural fiber-reinforced poly (lactic acid) bionanocomposites. In *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials* (pp. 313-345). Woodhead Publishing.
- Giannotas, G., Kamperidou, V., & Barboutis, I. (2021). Tree bark utilization in insulating bio-aggregates: a review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(6), 1989-1999.
- González, O. M., Velín, A., García, A., Arroyo, C. R., Barrigas, H. L., Vizuite, K., et Debut, A. (2020). Representative Hardwood and Softwood Green Tissue-Microstructure Transitions per Age Group and Their Inherent Relationships with Physical–Mechanical Properties and Potential Applications. *Forests*, 11(5), 569.
- Grondin, P., Anseau, C., Bélanger, L., Bergeron, J. F., Bergeron, Y., Bouchard, A., et Lessard, G. (1996). Écologie forestière dans Manuel de foresterie. *Québec: Québec Press de l'Université Laval*. p, 135-279.
- Guidi, W., Tozzini, C., et Bonari, E. (2009). "Estimation of chemical traits in poplar short-rotation coppice at stand level." *Biomass and Bioenergy* 33(12): 1703-1709.
- Habibi, Y., Lucia, L. A., et Rojas, O. J. (2010). "Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications." *Chemical Reviews* 110(6): 3479-3500.
- Hein, P. R., Pakkanen, H., et Santos, A. A. D. (2017). "Challenges in the use of Near Infrared Spectroscopy for improving wood quality: A review." *Forest Systems* 26(3), p. 10.
- Hein, P. R. G. (2012). "Estimating shrinkage, microfibril angle and density of Eucalyptus wood using near infrared spectroscopy." *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 20(4): 427-436.

- Hein, P. R. G., Campos, A. C. M., Mendes, R. F., Mendes, L. M., et Chaix, G. (2011). "Estimation of physical and mechanical properties of agro-based particleboards by near infrared spectroscopy." *European Journal of Wood and Wood Products* 69(3): 431-442.
- Heinze, T. (2016). Cellulose: structure and properties. *Cellulose chemistry and properties: fibers, nanocelluloses and advanced materials*, 1-52.
- Himes, A., Leavengood, S., et Polinko, A. (2021). "Variation in wood properties of hybrid poplar lumber by radial and vertical position in stem: a case study from Boardman, Oregon." *Wood Fiber Sci.* 53: 161-177.
- Hodge, G. R., Acosta, J. J., Unda, F., Woodbridge, W. C., et Mansfield, S. D. (2018). "Global chemical properties of Eucalyptus." *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(2): 117-132.
- Hu, L., Fang, X., Du, M., Luo, F., et Guo, S. (2020). "Hemicellulose-based polymers processing and application." *American Journal of Plant Sciences*, 11(12): 2066-2079.
- Huang, A., Li, G., Fu, F., and Fei, B. (2008) Use of visible and near infrared spectroscopy to predict Klason Lignin content of bamboo, Chinese Fir, Paulownia, and Poplar. *Journal of wood chemistry and technology*, 28 (3): 194–206.
- Huang, Y., Wang, L., Chao, Y., Nawawi, D. S., Akiyama, T., Yokoyama, T., et Matsumoto, Y. (2016). "Relationships between hemicellulose composition and lignin structure in woods." *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 36(1): 9-15.
- Huda, A. A., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R. E., et Fortin, Y. (2014). "Variation of the physical and mechanical properties of hybrid poplar clones." *BioResources* 9(1): 1456-1471.

- Huda, A. A., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R. E., et Périnet, P. (2012). "Anatomical properties of selected hybrid poplar clones grown in southern Quebec." *BioResources* 7(3): 3779-3799.
- Huda, A. A., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R. E., Périnet, P., et Fortin, Y. (2018). "Phenotypic and genotypic correlations for wood properties of hybrid poplar clones of southern Quebec." *Forests*, 9(3): 140.
- Hytönen, J., Beuker, E., et Viherä-Aarnio, A. (2018). "Clonal variation in basic density, moisture content and heating value of wood, bark and branches in hybrid aspen." *Silva Fenn.* 52, 1–15
- Inagaki, T., Schwanninger, M., Kato, R., Kurata, Y., Thanapase, W., Puthson, P., et Tsuchikawa, S. (2012). "Eucalyptus camaldulensis density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy." *Wood Science and Technology* 46(1): 143-155.
- Isebrands, J. G., Aronsson, P., Carlson, M., et coll. Environmental applications of poplars and willows. In : *Poplars and willows: trees for society and the environment*. Wallingford UK : CABI, 2014. p. 258-336.
- Ištok, I., Sedlar, T., Šefc, B., Sinković, T., et Perković, T. (2016). Physical properties of wood in poplar clones' I-214'and'S1-8'. *Drvna industrija*, 67(2), 163-170
- Jia, R., Wang, Y., Wang, R., et Chen, X. (2021). "Physical and mechanical properties of poplar clones and rapid prediction of the properties by near infrared spectroscopy." *Forests* 12(2): 206.
- Jin, W., Singh, K., et Zondlo, J. (2013). "Pyrolysis kinetics of physical components of wood and wood-polymers using isoconversion method." *Agriculture* 3(1): 12-32.

- Jin, X.-J. et D. Pascal Kamdem (2009). "Chemical composition, crystallinity and crystallite cellulose size in populus hybrids and aspen." *Cellulose Chemistry & Technology* 43(7): 229.
- Johansson, T., et Hjelm, B. (2013). Frequency of false heartwood of stems of poplar growing on farmland in Sweden. *Forests*, 4(1), 28-42.
- Kačík, F., Ďurkovič, J., et Kačíková, D. (2012). "Chemical profiles of wood components of poplar clones for their energy utilization." *Energies* 5(12): 5243-5256.
- Kampe, A., et Magel, E. (2013). New insights into heartwood and heartwood formation. *Cellular aspects of wood formation*, 2013, p. 71-95.
- Kircher, M. (2022). Economic trends in the transition into a circular bioeconomy. *Journal of Risk and Financial Management*, 15(2), 44.
- Kramer, A., Barbosa, A. R., et Sinha, A. (2014). "Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross-laminated timber applications." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(7): 06014009.
- Kreuzwieser, J., et Rennenberg, H. (2014). Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. *Plant, cell & environment*, 37(10), 2245-2259.
- Krutul, D., Antczak, A., Radomski, A., Drożdżek, M., Kłosińska, T., et Zawadzki, J. (2019). "The chemical composition of poplar wood in relation to the species and age of trees." *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW Forestry and Wood Technology*, 107: 131-138.
- Lachaud, S., Catesson, A. M., et Bonnemain, J. L. (1999). "Structure and functions of the vascular cambium." *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*, 322(8): 633-650.
- Lehnebach, R., Morel, H., Bossu, J., Le Moguédec, G., Amusant, N., Beauchêne, J., et Nicolini, E. (2017). "Heartwood/sapwood profile and the tradeoff

between trunk and crown increment in a natural forest: the case study of a tropical tree (*Dicorynia guianensis* Amsh., Fabaceae)." *Trees*, 31(1): 199-214.

Leopold, B. et McIntosh D.C (1961). "Chemical composition and physical properties of wood fibers. III. Tensile strength of individual fibers from alkali extracted loblolly pine holocellulose." *Tappi J* 44(3): 235-240.

Li, Y., Deng, X., Zhang, Y., Huang, Y., Wang, C., Xiang, W. et Wei, X. (2019). "Chemical characteristics of heartwood and sapwood of red-heart Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*)." *Forest Products Journal* 69(2): 103-109.

Liang, L., Fang, G., Deng, Y., Xiong, Z., et Wu, T. (2019). "Determination of moisture content and basic density of poplar wood chips under various moisture conditions by near-infrared spectroscopy." *Forest Science* 65(5): 548-555.

Lim, K. J., Paasela, T., Harju, A., Venäläinen, M., Paulin, L., Auvinen, P., et Teeri, T. H. (2016). "Developmental changes in Scots pine transcriptome during heartwood formation." *Plant Physiology* 172(3): 1403-1417.

Lukmandaru, G. et K. Takahashi (2008). "Variation in the natural termite resistance of teak (*Tectona grandis* Linn. fil.) wood as a function of tree age." *Annals of Forest Science* 65(7), p.1.

Machmudah, S., Kanda, H., et Goto, M. (2017). Hydrolysis of biopolymers in near-critical and subcritical water. In *Water Extraction of Bioactive Compounds*. Elsevier. p. 69-107.

Makouanzi Ekomono, C. G., Rambolarimanana, T., et Bouvet, J. M. (2022). "Preponderance of additive and non-additive variances for growth, ecophysiological and wood traits in Eucalyptus hybrid genotype-by-spacing interaction." *Tree Genetics & Genomes* 18(4): 1-12.

- Maranan, M. C., et Laborie, M. P. G. (2008). "Rapid prediction of the chemical traits of hybrid poplar with near infrared spectroscopy." *Journal of Biobased Materials and Bioenergy* 2(1): 57-63.
- Marques, I., Draper, D., Riofrío, L., et Naranjo, C. (2014). "Multiple hybridization events, polyploidy and low postmating isolation entangle the evolution of neotropical species of Epidendrum (Orchidaceae)." *BMC Evolutionary Biology* 14(1): 1-14.
- Marshall, H. D., Murphy, G. E., et Lachenbruch, B. (2006). "Effects of bark thickness estimates on optimal log merchandising." *For Prod J* 56:87–92
- Mattos, B. D., Lourençon, T. V., Gatto, D. A., Serrano, L., et Labidi, J. (2016). "Chemical characterization of wood and extractives of fast-growing *Schizolobium parahyba* and *Pinus taeda*." *Wood Material Science & Engineering* 11(4): 209-216.
- Min, D., Yang, C., Shi, R., Jameel, H., Chiang, V., et Chang, H. (2013). "The elucidation of the lignin structure effect on the cellulase-mediated saccharification by genetic engineering poplars (*Populus nigra* L. × *Populus maximowiczii* A.)." *Biomass and Bioenergy* 58: 52-57.
- Miranda, I., Sousa, V., Ferreira, J., et Pereira, H. (2017). "Chemical characterization and extractives composition of heartwood and sapwood from *Quercus faginea*." *PLoS One* 12(6): e0179268.
- Moya, R., Bond, B., & Quesada, H. (2014). A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. *Wood Science and Technology*, 48, 411-433.
- Murphey, W. K., Bowersox, T. W., et Blankenhorn, P. R. (1979). "Selected wood properties of young *Populus* hybrids." *Wood Science*. 11(4):263–267..

- Nabais, C., Hansen, J. K., David-Schwartz, R., Klisz, M., Lopez, R., et Rozenberg, P. (2018). "The effect of climate on wood density: what provenance trials tell us?" *Forest Ecology and Management* 408: 148-156.
- Nawrot, M., Pazdrowski, W., et Szymański, M. (2008). Dynamics of heartwood formation and axial and radial distribution of sapwood and heartwood in stems of European larch (*Larix decidua* Mill.). *Journal of Forest Science*, 54(9), 409-417.
- Nie, W., Liu, Y., Tan, C., Wang, Y., Liu, J., Zhao, X., ... et Jia, Z. (2022). Characteristics and factors driving the variations in bark thickness of major woody plants in China. *Ecological Indicators*, 144, 109447.
- Nkansah, K., Dawson-Andoh, B., et Slahor, J. (2010). "Rapid characterization of biomass using near infrared spectroscopy coupled with multivariate data analysis: Part 1 yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera* L.)." *Bioresource Technology* 101(12): 4570-4576.
- Novaes, E., Kirst, M., Chiang, V., Winter-Sederoff, H., et Sederoff, R. (2010). "Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees." *Plant Physiology* 154(2): 555-561.
- Officer, P. (2016). Food and agriculture organization of the United Nations. *FAO, Italy*.
- Ohra-Aho, T., Ghalibaf, M., Alén, R., Lindfors, C., et Oasmaa, A. (2022). Analysis of Lipophilic Extractives from Fast Pyrolysis Bio-Oils. *Energy & Fuels*, 36(11), 5797-5804
- Pappas, C., Bélanger, N., Bastien-Beaudet, G., Couture, C., D'Orangeville, L., Duchesne, L., et Kneeshaw, D. (2022). Xylem porosity, sapwood characteristics, and uncertainties in temperate and boreal forest water use. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109092.

- Paquette, A. et C. Messier (2010). "The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene." *Frontiers in Ecology and the Environment* 8(1): 27-34.
- Park, S. Y., Kim, J. C., Yeon, S., Yang, S. Y., Yeo, H., et Choi, I. G. (2018). "Rapid prediction of the chemical information of wood powder from softwood species using near-infrared spectroscopy." *BioResources* 13(2): 2440-2451.
- Patt, R., Kordsachia, O., et Fehr, J. (2006). "European hardwoods versus Eucalyptus globulus as a raw material for pulping." *Wood Science and Technology* 40(1): 39-48.
- Pažitný, A., Russ, A., Boháček, Š., Stankovská, M., Ihnát, V., & Šutý, Š. (2020). Effect of steam explosion on enzymatic hydrolysis of various parts of poplar tree. *Wood Res*, 65, 579-590.
- Perämäki, M., Vesala, T., et Nikinmaa, E. (2005). Modeling the dynamics of pressure propagation and diameter variation in tree sapwood. *Tree Physiology*, 25(9), 1091-1099.
- Perämäki, M., Vesala, T., et Nikinmaa, E. (2005). Modeling the dynamics of pressure propagation and diameter variation in tree sapwood. *Tree Physiology*, 25(9), 1091-1099.
- Périnet, P. (2007, September). The Poplar breeding program in Québec. In *Poplar culture: a collaborative effort from clone to mill. 2007 Annual Meeting of the Poplar Council of Canada. Field Trip Guide. Riviere-du-Loup and Quebec City, September* (pp. 16-21).
- Périnet, P., Caron, A., Fauchon, H., Gagnon, H., et Morin, S. (2006). "Liste des clones recommandés de peuplier hybride selon les sous-régions écologiques au Québec." *Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière*.
- Pliura, A., Yu, Q., Zhang, S. Y., MacKay, J., Périnet, P., et Bousquet, J. (2005). "Variation in wood density and shrinkage and their relationship to growth of selected young poplar hybrid crosses." *Forest Science* 51(5): 472-482.

- Poke, F. S., Potts, B. M., Vaillancourt, R. E., et Raymond, C. A. (2006). "Genetic parameters for lignin, extractives and decay in *Eucalyptus globulus*." *Ann. For. Sci* 63: 813-821.
- Plomion, C., Leprovost, G., et Stokes, A. (2001). "Wood formation in trees." *Plant Physiology* 127(4): 1513-1523.
- Poplars, F. A. O. (2016). "Other Fast-Growing Trees—Renewable Resources for Future Green Economies. Synthesis of Country Progress Reports." *Proceedings of the 25th Session of the International Poplar Commission, Berlin, Germany*: 13-16.
- Rains, M. K., Caron, C., Regan, S., et Molina, I. (2022). Chemical and Molecular Characterization of Wound-Induced Suberization in Poplar (*Populus alba* × *P. tremula*) Stem Bark. *Plants*, 11(9), 1143.
- Ramalho, F. M. G., Pimenta, E. M., Goulart, C. P., De Almeida, M. N. F., Vidaurre, G. B., et Hein, P. R. G. (2019). Effect of stand density on longitudinal variation of wood and bark growth in fast-growing eucalyptus plantations. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 12(6), 527
- Rammal, A. (2016). *Mathématiques appliquées et traitement du signal pour l'évaluation de la dégradation de la biomasse lignocellulosique*, thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, p. 22.
- Rego, F., Dias, A. P. S., Casquilho, M., Rosa, F. C., et Rodrigues, A. (2019). "Fast determination of lignocellulosic composition of poplar biomass by thermogravimetry." *Biomass and Bioenergy* 122: 375-380.
- Rials, T. G., Kelley, S. S., et So, C. L. (2002). "Use of advanced spectroscopic techniques for predicting the mechanical properties of wood composites." *Wood and Fiber Science* 34 (3): 398-407.

- Richardson, J., Cooke, J. E. K., Isebrands, J. G., Thomas, B. R., et Van Rees, K. C. J. (2007). "Poplar research in Canada—a historical perspective with a view to the future." *Botany* 85(12): 1136-1146
- Richardson, J., Isebrands, J. G., et Ball, J. B. (2014). Ecology and physiology of poplars and willows. *Poplars and willows: Trees for society and the environment*, 92-123.
- Rocha, M. F. V., Vital, B. R., De Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. M. L., Cardoso, M. T., et Hein, P. R. G. (2016). "Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of Eucalyptus wood and bark." *Journal of Tropical Forest Science*: 243-248.
- Rodriguez-Perez, D., Moya, R., et Murillo, O. (2022). Effect of stem height in variation of bark, heartwood, sapwood and physical properties of wood in *Dipteryx panamensis* Pittier in a provenance/progeny test. *Ciência Florestal*, 32:141-162.
- Rodriguez, H. G., Maiti, R., Kumari, A., et Sarkar, N. C. (2016). "Variability in wood density and wood fibre characterization of woody species and their possible utility in northeastern Mexico." *American Journal of Plant Sciences*, 7(7): 1139-1150.
- Rosell, J. A. (2016). "Bark thickness across the angiosperms: more than just fire." *New Phytologist* 211(1): 90-102.
- Ross, R. J. (2010). "Wood handbook: wood as an engineering material." *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190*, 2010: 509 p. 1 v. 190.
- Rowell, R. M., Pettersen, R., Han, J. S., Rowell, J. S., et Tshabalala, M. A. (2005). Cell wall chemistry. *Handbook of wood chemistry and wood composites*, 2005, vol. 2, p. 33-72.

- Rubino, D. L., et McCarthy, B. C. (2003). Evaluation of coarse woody debris and forest vegetation across topographic gradients in a southern Ohio forest. *Forest Ecology and Management*, 183(1-3), 221-238.
- Saha Tchinda, J. B. (2015). *Caractérisation et valorisation des substances extractibles de cinq essences camerounaises majeures de l'industrie du bois: Ayous, Moabi, Movingui, Padouk et Tali* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- Sannigrahi, P., Ragauskas, A. J., et Tuskan, G. A. (2010). "Poplar as a feedstock for biofuels: a review of compositional characteristics." *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 4(2): 209-226.
- Schimleck, L. R., Payne, P., et Wearne, R. H. (2005). "Determination of important pulp properties of hybrid poplar by near infrared spectroscopy." *Wood and Fiber Science* 37(3): 462-471.
- Schoot, M., Kapper, C., van Kollenburg, G. H., Postma, G. J., van Kessel, G., Buydens, L. M., et Jansen, J. J. (2020). "Investigating the need for preprocessing of near-infrared spectroscopic data as a function of sample size." *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 204: 104105.
- Schwanninger, M., Rodrigues, J. C., et Fackler, K. (2011). "A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components." *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 19(5): 287-308.
- Serapiglia, M. J., Cameron, K. D., Stipanovic, A. J., Abrahamson, L. P., Volk, T. A., et Smart, L. B. (2013). "Yield and woody biomass traits of novel shrub willow hybrids at two contrasting sites." *BioEnergy Research* 6(2): 533-546.
- Shen, H., Xing, X., Guan, Y., Zhou, L., Liu, S., et Gao, H. (2021). "Radial Variation Studies on Wood Properties of Populus deltoides Parents and Their Hybrids." *BioResources* 16(3).

- Silva, J. P. M., Fernandes, M. R. D. M., Gonçalves, A. F. A., Silva, G. F. D., et Cabacinha, C. D. (2019). "Estimation of the basic wood density of native species using mixed linear models." *Floresta e Ambiente* 26.
- Smetana, O., Mäkilä, R., Lyu, M., Amiryousefi, A., Sánchez Rodríguez, F., Wu, M. F., et Mähönen, A. P. (2019). High levels of auxin signalling define the stem-cell organizer of the vascular cambium. *Nature*, 565(7740), 485-489.
- Skvaril, J., Kyprianidis, K. G., et Dahlquist, E. (2017). "Applications of near-infrared spectroscopy (NIRS) in biomass energy conversion processes: A review." *Applied Spectroscopy Reviews* 52(8): 675-728.
- Soares Brito, A., Baptista Vidaurre, G., da Silva Oliveira, J. T., Missia da Silva, J. G., Ferreira Oliveira, R., Dias Junior, A. F., et Valverde Zauza, E.A. (2021). "Interaction between planting spacing and wood properties of Eucalyptus clones grown in short rotation." *Iforest-biogeosciences and forestry* 14(1): 12.
- Sözbir, G. D., Bektas, I., et Ak, A. K. (2019). "Influence of combined heat treatment and densification on mechanical properties of poplar wood." *Maderas. Ciencia y Tecnología* 21(4): 481-492.
- Sun, B. L., Chai, Y. B., Huang, A. M., et Liu, J. L. (2011). "Application of NIR spectroscopy to estimate of MFA and fiber length of *Neosinocalamus affinis*." *Spectroscopy and Spectral Analysis* 31(12): 3251-3255.
- Sun, C. (2017). "Competition of wood products with different fiber transformation and import sources." *Forest Policy and Economics* 74: 30-39.
- Swan, E. et R. Kellogg (1986). "Chemical properties of black cottonwood and balsam poplar." *Canadian Journal of Forest Research* 16(3): 497-501.
- Talbot, P. (2011). "*Hybridation naturelle entre les peupliers exotiques et indigènes dans les Prairies canadiennes*." Thèse de doctorat. Université Laval, p. 13.

- Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI). T 222 om-88. Acid-insoluble lignin in wood and pulp." In T APPI test method, Volume 1, T APPI Press, Atlanta, USA.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI). T 258 om-16: Basic Density and Moisture Content of Pulpwood; Tappi Technology Park: Atlanta, GA, USA, 2016.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI). *T 264 cm-97 Preparation of Wood for Chemical Analysis*; Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI): Peachtree Corners, GA, USA, 1997
- Taylor, A. M., Gartner, B. L., et Morrell, J. J. (2002). "Heartwood formation and natural durability-a review". *Wood Fiber Sci* 34:587–611
- Thi, V. D. (2017). *Modélisation du comportement au feu des structures en bois* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- Tsalagkas, D., Börcsök, Z., et Pásztory, Z. (2019). "Thermal, physical and mechanical properties of surface overlaid bark-based insulation panels." *European Journal of Wood and Wood Products* 77(5): 721-730.
- Tsuchikawa, S. et H. Kobori (2015). "A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology." *Journal of Wood Science*, 61(3): 213-220.
- Vallejo-Montesinos, J., Muñoz, U. M., et Gonzalez-Calderon, J. A. (2016). "Mechanical properties, crystallization and degradation of polypropylene due to nucleating agents, fillers and additives." *Properties, Uses and Benefits*: 83.
- Vander Mijnsbrugge, K., Meyermans, H., Van Montagu, M., Bauw, G., et Boerjan, W.. (2000). "Wood formation in poplar: identification, characterization, and seasonal variation of xylem proteins." *Planta* 210(4): 589-598.

- Vangeel, T., Neiva, D. M., Quilho, T., Costa, R. A., Sousa, V., Sels, B. F., & Pereira, H. (2021). Tree bark characterization envisioning an integrated use in a biorefinery. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15
- Via, B. K., Zhou, C., Acquah, G., Jiang, W., et Eckhardt, L. (2014). "Near infrared spectroscopy calibration for wood chemistry: which chemometric technique is best for prediction and interpretation?" *Sensors* 14(8): 13532-13547.
- Wang, Y., Liu, C., Zhao, R., McCord, J., Rials, T., et Wang, S. (2016). "Anatomical characteristics, microfibril angle and micromechanical properties of cottonwood (*Populus deltoides*) and its hybrids." *Biomass and Bioenergy* 93: 72-77.
- Weitner, A. (2007). *Analyse dendrochimique par spectrométrie de rayonnement X: application à l'étude de la nutrition des arbres et des variations spatiales et temporelles de l'environnement*, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 183p.
- Willför, S., Sundberg, A., Hemming, J., et Holmbom, B. (2005). "Polysaccharides in some industrially important softwood species." *Wood Science and Technology* 39(4): 245-257.
- Wu, J., Zhou, Q., Sang, Y., Kang, X., et Zhang, P. (2017). "Genetic variation and genetic gain for energy production, growth traits and wood properties in Eucalyptus hybrid clones in China." *Australian Forestry* 80(1): 57-65.
- Xiao, M. Z., Chen, W. J., Hong, S., Pang, B., Cao, X. F., Wang, Y. Y., et Sun, R. C. (2019). "Structural characterization of lignin in heartwood, sapwood, and bark of eucalyptus." *International Journal of Biological Macromolecules* 138: 519-527.
- Xu, J., Bao, F., Huang, R., Liu, X., Evans, R., et Zhao, Y. (2011). Response of wood density of *Picea crassifolia* to climate change in Qilian Mountains of northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 33(5), 115-121.

- Yang, H., Weng, Q., Li, F., Zhou, C., Li, M., Chen, S., et Gan, S. (2018). "Genotypic variation and genotype-by-environment interactions in growth and wood properties in a cloned *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* family in Southern China." *Forest Science* 64(3): 225-232.
- Yoshihara, H. (2011). "Bending properties of medium-density fiberboard and plywood obtained by compression bending test." *Forest Products Journal* 61(1): 56-63.
- Yu, L., Liang, Y., Zhang, Y., et Cao, J. (2020). "Mechanical properties of wood materials using near-infrared spectroscopy based on correlation local embedding and partial least-squares." *Journal of Forestry Research*, 31(3): 1053-1060.
- Yu, Y., Zhang, F., Zhu, S., et Li, H. (2017). "Effects of high-pressure treatment on poplar wood: Density profile, mechanical properties, strength potential index, and microstructure." *BioResources* 12(3): 6283-6297.
- Zamora, D. S., Wyatt, G. J., Apostol, K. G., et Tschirner, U. (2013). "Biomass yield, energy values, and chemical composition of hybrid poplars in short rotation woody crop production and native perennial grasses in Minnesota, USA." *Biomass and Bioenergy* 49: 222-230.
- Zhang, H., Zhang, S., Chen, S., Xia, D., Yang, C., et Zhao, X. (2022). "Genetic variation and superior provenances selection for wood properties of *Larix olgensis* at four trials." *Journal of Forestry Research* p. 1867–1879
- Zhang, P., Wu, F., et Kang, X. (2013). "Genetic control of fiber properties and growth in triploid hybrid clones of *Populus tomentosa*." *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(7): 621-630.
- Zhang, P., Wu, F., et Kang, X. (2015). "Chemical properties of wood are under stronger genetic control than growth traits in *Populus tomentosa* Carr." *Annals of Forest Science* 72(1): 89-97.

- Zhang, P., Wu, F., Kang, X., Zhao, C., et Li, Y. (2015). "Genotypic variations of biomass feedstock properties for energy in triploid hybrid clones of *Populus tomentosa*." *Bioenergy Research* 8(4): 1705-1713.
- Zhang, S. Y., Yu, Q., Chauret, G., et Koubaa, A. (2003). "Selection for both growth and wood properties in hybrid poplar clones." *Forest Science* 49(6): 901-908.
- Zhang, Y., Fang, S., Tian, Y., Wang, L., et Lv, Y. (2022). "Responses of radial growth, wood density and fiber traits to planting space in poplar plantations at a lowland site." *Journal of Forestry Research* 33(3): 963-976.