



**HAL**  
open science

# Étude comparative de la croissance et des propriétés physiques et chimiques d'arbres issus de systèmes agroforestiers et forestiers pour une valorisation dans la filière bois : cas du peuplier, du noyer et du robinier

Lucie Heim

► **To cite this version:**

Lucie Heim. Étude comparative de la croissance et des propriétés physiques et chimiques d'arbres issus de systèmes agroforestiers et forestiers pour une valorisation dans la filière bois : cas du peuplier, du noyer et du robinier. Matériaux. HESAM Université, 2023. Français. NNT : 2023HESAE043 . tel-04472702

**HAL Id: tel-04472702**

**<https://pastel.hal.science/tel-04472702>**

Submitted on 22 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**  
**Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés (LaBoMaP) –**  
**Campus de Cluny**

# THÈSE

présentée par : **Lucie HEIM**

soutenue le : **14 juin 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Sciences pour l'ingénieur spécialité Matériaux**

**Étude comparative de la croissance et des propriétés physiques et chimiques d'arbres issus de systèmes agroforestiers et forestiers pour une valorisation dans la filière bois : cas du peuplier, du noyer et du robinier**

THÈSE dirigée par :  
**M. Louis DENAUD**

et co-encadrée par :  
**M. Éric BADEL**  
**M. Kévin CANDELIER**  
**M. Rémy MARCHAL**

**M. Bertrand CHARRIER**, Professeur des universités, IPREM, UPPA  
**M. Joris VAN ACKER**, Professeur des universités, Woodlab, Ghent University  
**M. Antolino GALLEGRO**, Professeur des universités, IDIE, University of Granada  
**M. Louis DENAUD**, Professeur des universités, LaBoMaP, Arts et Métiers  
**M. Éric BADEL**, Chargé de recherche (HDR), PIAF, INRAE  
**M. Kévin CANDELIER**, Chargé de recherche, BioWooEB, Cirad  
**M. Rémy MARCHAL**, Professeur émérite, LaBoMaP, Arts et Métiers  
**M. Joffrey VIGUIER**, Maître de conférences, LaBoMaP, Arts et Métiers

Jury  
Rapporteur  
Rapporteur  
Président du jury  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur  
Invité  
Invité

T  
H  
È  
S  
E



# Remerciements

Les premiers remerciements que j'adresse vont naturellement à mon équipe d'encadrement. Louis DENAUD en premier lieu, pour son soutien sans faille au quotidien, sa bienveillance et son aide précieuse à chacune des étapes de cette thèse. Je le remercie pour toutes les connaissances qu'il a pris le temps de me transmettre, je ne pouvais espérer meilleur directeur de thèse. Je remercie également Éric BADEL, qui fut également mon tuteur de stage de fin d'étude pour tout ce qu'il m'a appris d'un point de vue scientifique mais également de m'avoir intégrée dans la communauté scientifique du bois. Un grand merci à Kévin CANDELIER, pour sa disponibilité, sa patience et les heures qu'il a passées à m'aider dans la compréhension et les analyses biochimiques ainsi que pour sa contribution efficace à tous les travaux que j'ai réalisés. Enfin, merci à Rémy MARCHAL pour sa sagesse, son aide sur le terrain et tout l'apport scientifique qu'il m'a apporté au cours de ma thèse. Je lui souhaite une merveilleuse retraite auprès de ses arbres agroforestiers. Les avoir tous les quatre à mes côtés durant ces trois années a été un réel confort pour moi, grâce à leur complémentarité sur les différentes problématiques abordées dans mon travail, mais surtout grâce à leur soutien au jour le jour. Ils m'ont permis de trouver ma place dans le monde de la recherche, de m'épanouir et de gagner la confiance nécessaire pour mener ma thèse dans les meilleures conditions possibles.

J'exprime toute ma gratitude à l'ensemble de mon jury de thèse. Merci à Joris VAN ACKER et Bertrand CHARRIER d'avoir accepté de juger et d'évaluer mon travail en tant que rapporteurs ainsi qu'à Antolino GALLEGO d'avoir présidé ce jury. Je suis honorée de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et je les remercie pour les discussions constructives et enrichissantes que nous avons eues lors de ma soutenance.

Je remercie la Fondation de France pour le financement de ces travaux de thèse ainsi que la Région Occitanie pour le soutien financier des travaux menés sur le noyer agroforestier. J'adresse également mes remerciements à l'ADEME pour le financement du projet AGROBRANCHE dans lequel s'ancre une partie de mon travail.

## REMERCIEMENTS

---

J'ai eu la chance au cours de ces trois années de thèse de faire partie de trois laboratoires. Je remercie ainsi tous les membres de l'UR BioWooEB pour leur accueil chaleureux au sein de leur équipe. Les moments passés auprès d'eux furent très enrichissants grâce à la diversité des projets de l'équipe, et la convivialité et l'entraide qui régnaient au quotidien m'ont permis de commencer ma thèse dans les meilleures conditions possibles. J'adresse un grand merci en particulier à Marie-France THÉVENON, Nabila BOUTAHAR, Charline LANVIN, Luc PIGNOLET, Daniel GUIBAL et Sylvain LOTTE pour leur aide lors de mes expérimentations ainsi qu'à Jérémy VALETTE pour les nombreuses réparations du broyeur bleu lors de la préparation de mes échantillons. Une grande partie de mon travail n'aurait pu se faire sans les analyses de Loïc BRANCHERIAU, je le remercie pour le temps précieux qu'il m'a accordé. Enfin, un grand merci à Isabelle CHALON.

Je remercie profondément l'ensemble de l'équipe MUB du LaBoMaP pour son accueil et pour la place qu'ils m'ont faite au sein de leur groupe soudé à mon arrivée. La bonne ambiance qui règne au sein de la Halle bois, les moments de convivialité et l'intérêt de chacun pour le travail des autres ont largement contribué à mon épanouissement durant la deuxième partie de ma thèse. J'adresse mes sincères remerciements à Joffrey VIGUIER, pour sa bonne humeur et son rire légendaire, mais également pour ses nombreux conseils et pour m'avoir laissée jouer avec la dérouleuse. Je remercie Jean-Claude BUTAUD, pour sa générosité, son ingéniosité qui a permis d'améliorer mes expérimentations à de nombreuses reprises et pour son soutien lors des enseignements que j'ai pu dispenser. Un grand merci à l'atout charme de l'équipe Fabrice COTTIN, ainsi qu'à Roger LETOURNEAU pour leur aide et leur force lorsque mes bras ne suffisaient pas pour déplacer mes billons. Je souhaite à Roger ainsi qu'à Jean-Claude la meilleure des retraites. J'exprime toute ma gratitude à Bertrand MARCON pour son aide lors de mes expérimentations ainsi que pour ses conseils pertinents et ses recommandations lors de la préparation de ma soutenance. Je tiens également à remercier chaleureusement Stéphane GIRARDON, Guillaume POT, Guillaume LACONDEMINE, Mariem YAICH, Hélène PENVERN et Benjamin ROUX, ce fut un plaisir de travailler à leurs côtés. Enfin, j'adresse une pensée particulière à Robert COLLET, mannequin bûcheron à ses heures perdues, pour tout ce qu'il apporte à l'équipe au quotidien. Je salue également l'ensemble du personnel du campus de Cluny avec qui ce fut un plaisir de travailler.

Bien entendu je salue tous les membres du PIAF de l'INRAE de Clermont-Ferrand, à qui je n'ai malheureusement pas eu le temps de rendre visite.

Tout ce travail n'aurait pas été possible sans l'implication de nombreuses personnes. Je tiens à remercier les membres de l'UMR Absyss, notamment Christian DUPRAZ pour l'accès au dispositif RAP, Lydie DUFOUR pour son aide et ses connaissances précieuses sur ce dispositif agroforestier, ainsi que tous ceux qui ont participé à la campagne d'abattage des noyers sur lesquels j'ai travaillé, en particulier Jean-François BOURDONCLE. Mes sincères remerciements

## REMERCIEMENTS

---

vont également à l'UMR Eco&Sols, qui m'a laissée travailler sur leur nouveau dispositif DIAMs. Je les remercie pour la liberté qu'ils m'ont laissée dans l'échantillonnage des arbres au cœur de mon étude, mais aussi pour leur aide et le partage de leurs données à l'issue des longues campagnes de mesures de la croissance des robiniers. Un grand merci en particulier à Isabelle BERTRAND, Jérôme NGAO et Rémi DUGUÉ (IRD). J'adresse mes plus grands remerciements à Julien RUELLE de la Platerforme Sylvatech, Karima MEGHAR de l'UMR QualiSud ainsi qu'à l'ensemble des membres du projet AGROBRANCHE avec qui j'ai été en relation dans le cadre de cette thèse, particulièrement Stéphane DUMARÇAIS et Philippe GÉRARDIN pour les analyses LC-MS menées au LERMAB. Ces dernières ont été rendues possible grâce à la générosité du GDR Bois.

Je souhaite également remercier la SCOOP AGROOF, et plus précisément Fabien LIAGRE et Antoine MARIN grâce à qui nous avons pu identifier le dispositif agroforestier de peuplier sur lequel j'ai travaillé. Je remercie Hervé VINCENT, propriétaire de ce dispositif, pour nous avoir permis de prélever des peupliers dans ses parcelles.

Bien évidemment cette thèse n'aurait pas été la même sans les trois membres éminents du dindodrôme, Leyne DEMOULIN, Juliette BOIVIN et Caroline MARC que je remercie pour leur présence au quotidien et pour avoir supporté mes nombreuses crises de larmes. Merci à elles ainsi qu'à Flore GUEVEL pour tous les bons moments passés au labo mais aussi en dehors. Je leur envoie tout mon soutien pour leur dernière année. Pour le véritable pilier qu'il a été tout au long de ma thèse, je remercie profondément Robin DURIOT. Merci également à l'ensemble des doctorants et stagiaires des différentes équipes que j'ai rencontrés ces trois dernières années. Une partie de mon travail n'aurait pu se faire sans leur contribution, aussi j'exprime toute ma gratitude aux nombreux stagiaires que j'ai eu le plaisir d'encadrer : Adélaïde GARTILI, Roxane DODELER, Delphine RICHER, Julia CHAMBERY, Julian LAFOURCADE et Gaspard DEWAELE. Je remercie également tous les élèves des Arts et Métiers de m'avoir aussi bien intégrée dans leur vie étudiante.

Merci également aux copines du PIAF - Lise, Marine, Lia et Marylou, à la meute de Montpellier - Clara, Tom, Valentin et Hélène - pour tous les moments incroyables passés à leurs côtés, et à Lysa pour son soutien même lorsqu'elle était à l'autre bout du monde.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux à ma famille, à mes parents Elisabeth et Philippe pour leur patience et leur aide à toutes les étapes de ma thèse. Merci à eux et à mes grands-parents pour leur gentillesse, leurs nombreuses visites et leur présence à mes côtés pendant ces trois longues années. Je remercie également ma sœur Zoé et mes frères Joseph et Antoine, ainsi qu'Océane et le petit Jolan. Enfin, je remercie plus que tout Brahim, pour la force et l'équilibre qu'il me donne et qui m'ont permis de terminer cette aventure dans les meilleures conditions possibles mais surtout pour tout le bonheur qu'il m'apporte jour après jour.



# Résumé

Dans le but d'allier agroécologie et augmentation de la production de biomasse, en réponse à la transition écologique, l'agroforesterie connaît un nouvel essor en zone tempérée depuis ces vingt dernières années. Cependant, l'arbre agroforestier reste encore considéré comme étant un auxiliaire de culture ou d'élevage et fait rarement l'objet d'études permettant de caractériser son bois pour ensuite mieux le valoriser. Évoluant dans des spatialisations éloignées de celles de la foresterie plus conventionnelle, notamment en raison de plus faibles densités d'arbre à l'hectare, les arbres agroforestiers sont soumis à des expositions accrues aux vents et à la lumière, auxquelles s'ajoutent des interactions fortes avec les cultures annuelles et de nombreuses interventions humaines réalisées au niveau du houppier et du système racinaire. Les dynamiques de croissance de trois essences feuillues tempérées (noyer hybride, peuplier et robinier) provenant de systèmes agroforestiers et de parcelles forestières témoins ont été comparées, essence par essence. La croissance secondaire des arbres agroforestiers s'est révélée être plus rapide que celle des témoins forestiers, et ce pour les trois essences, traduisant la présence d'un phénomène de thigmomorphogénèse plus important lié au régime de vent subis par les arbres agroforestiers. L'influence des conditions de croissances sur les propriétés physico-chimiques des noyers et des peupliers (agroforestiers et forestiers) a ensuite été analysée. Si la teneur en composés extractibles du bois des noyers ne diffère pas en fonction du traitement sylvicole, des analyses réalisées par imagerie hyperspectrale NIR ont mis en évidence des différences de composition chimique entre les noyers agroforestiers et forestiers, notamment en terme d'extractibles et de teneur en lignine. Chez le peuplier, un taux de lignine plus faible a été observé dans les bois issus de la parcelle agroforestière comparé à celui des bois du témoin forestier, ce qui est assimilé à une présence plus importante de bois de flexion chez les peupliers agroforestiers. Par la suite, des analyses comparatives de certaines propriétés physiques, entre les peupliers agroforestiers et les peupliers forestiers témoins, ont montré que les peupliers agroforestiers présentent des taux d'humidité moyens et une proportion d'aubier et de bois de faux-cœur plus faibles que pour les peupliers témoins. Par ailleurs, la densité moyenne du bois ne diffère pas en fonction du traitement

## RESUME

---

sylvicole. Pour finir, la qualité du bois de peuplier agroforestier vis-à-vis du déroulage et de sa valorisation dans la filière des produits techniques bois a été évaluée. Les peuplier agroforestiers et forestiers ont été déroulés. Les placages obtenus ont été caractérisés et comparés en fonction de la provenance des bois. Pour chaque provenance, des panneaux de Lamibois ont ensuite été conçus, puis caractérisés mécaniquement par des essais de flexion 4-points. Les résultats obtenus, mis en relation avec certaines propriétés physiques du bois telles que l'angle des microfibrilles des parois cellulaires et la densité du bois, ont montré que les peupliers agroforestiers possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles des peupliers forestiers. Les peupliers agroforestiers s'étant adaptés à la flexion induite par le vent au cours de leur croissance, ils ont produit un bois de plus gros diamètre avec des propriétés mécaniques plus élevées que celles des bois issus du système forestier témoin. Ces caractéristiques singulières font du bois agroforestier une ressource à fort potentiel pour une valorisation sous forme de produits techniques issu du déroulage. Ainsi, ce travail de doctorat apporte des connaissances nouvelles, contribuant à une meilleure compréhension vis-à-vis du développement et de la croissance des arbres en milieu agroforestier et sur les propriétés de leur bois. Les résultats obtenus sont prometteurs et permettent une première approche en terme de voie de valorisation des arbres agroforestiers au sein de la filière bois.

Mots-clés : Agroforesterie, peuplier, noyer, robinier, qualité du bois, thigmomorphogénèse





# Abstract

In order to combine agroecology and increased biomass production, in response to the ecological transition, agroforestry has undergone a new rise in temperate areas over the last twenty years. However, the agroforestry tree is still often considered as a crop or livestock auxiliary and is rarely the purpose of researches to better characterize its wood in order to improve its valorization. Since they evolve in spatial conditions that are far removed from those prevailing in conventional forestry, particularly due to low planting tree densities per hectare, they are subject to higher exposure to wind and light, and to strong interactions with annual crops and numerous human interventions at the level of the branches and root system. The growth dynamics of three tree temperate wood species (hybrid walnut, poplar and black locust) developed under agroforestry (AF) conditions were compared to those of the same species from control forest plots (FC). The secondary growth of the agroforestry trees was found to be faster than that of the forest controls, reflecting a significant thigmomorphogenesis phenomenon related to the wind regime applied to the trees. The influence of growth conditions on the chemical and physical properties of walnut and poplar trees in agroforestry and forestry systems was then analyzed. Although the content of extractive compounds in walnut wood did not differ according to silvicultural treatment, the analyses performed by NIR hyperspectral imaging revealed some differences in chemical composition between agroforestry and forestry walnut trees, particularly in terms of extractives composition compounds and lignin content. In poplar, a lower lignin content was observed in wood from the agroforestry plot compared to wood from the forestry control, which is assimilated to a higher presence of flexure wood in agroforestry poplars. Afterwards, comparative analyses of some physical properties of the AF and FC poplars highlighted that the agroforestry poplars had lower average moisture contents and a lower proportion of sapwood and wet heartwood in their trunks than the control poplars. Moreover, the average density of the wood does not differ according to the silvicultural treatment. Finally, the quality of agroforestry poplar wood with respect to peeling process and its valorization in the technical wood products industry was assessed. AF and FC poplars were peeled. The veneers obtained were characteri-

## ABSTRACT

---

zed and compared according to the origin of the wood. For each provenance, LVL panels were produced and mechanically characterized by 4-point bending tests. The results obtained were related to some physical properties of the wood such as the angle of the microfibrils in the cell walls or its density and they indicated that AF poplars have higher mechanical properties to those of control poplars. AF poplars that have adapted to wind-induced bending during their growth have produced larger diameter wood with higher mechanical properties than wood from the control forest system, making it a good resource for recovery as reconstituted material from peeling process. To conclude, this PhD thesis work bring new knowledge and contributes to the better understanding towards the development and the growing of trees in agroforestry system and on the properties of the wood that they produced. All the results obtained are very promising and allow a first approach in terms of the valorization ways of agroforestry trees in the wood sector.

Keywords : Agroforestry, poplar, walnut, black locust, wood Quality, thigmomorphogenesis

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>3</b>
<b>Résumé</b>	<b>7</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>
<b>Introduction</b>	<b>17</b>
Contexte de la thèse . . . . .	17
Problématiques et objectifs de la thèse . . . . .	20
<b>1 Synthèse bibliographique</b>	<b>25</b>
1.1 L'agroforesterie . . . . .	25
1.1.1 Les avantages de l'agroforesterie . . . . .	26
1.1.1.1 Production de biomasse et intérêts économiques . . . . .	27
1.1.1.2 Services écosystémiques rendus par les systèmes agroforestiers . . . . .	28
1.1.2 Les conditions de croissance des arbres en milieu agroforestier . . . . .	29
1.1.3 Conclusion sur les principes de l'agroforesterie . . . . .	31
1.2 Les essences ciblées . . . . .	31
1.2.1 Le peuplier . . . . .	31
1.2.2 Le noyer hybride . . . . .	33
1.2.3 Le robinier . . . . .	34
1.3 Généralités sur la structure et la croissance de l'arbre . . . . .	35
1.3.1 Structure générale de l'arbre . . . . .	35
1.3.2 Croissance et formation du bois . . . . .	35
1.3.2.1 Le phénomène de croissance . . . . .	35
1.3.2.2 La formation du bois . . . . .	36
1.3.2.3 Le plan ligneux . . . . .	37

## TABLE DES MATIÈRES

---

1.3.3	Structure microscopique du bois . . . . .	39
1.3.3.1	La paroi cellulaire . . . . .	39
1.3.3.2	Les composants chimiques du bois . . . . .	41
1.3.3.2.a	La cellulose . . . . .	41
1.3.3.2.b	Les hémicelluloses . . . . .	42
1.3.3.2.c	La lignine . . . . .	42
1.3.3.2.d	Les extractibles . . . . .	42
1.4	Le comportement mécanique du bois . . . . .	43
1.4.1	Paramètres influençant le comportement mécanique du bois . . . . .	45
1.4.1.1	L'humidité . . . . .	45
1.4.1.2	La masse volumique . . . . .	45
1.4.1.3	L'angle des microfibrilles . . . . .	46
1.4.1.4	La pente de fil . . . . .	46
1.4.1.5	Le bois juvénile et le bois mature . . . . .	47
1.4.1.6	Le bois de réaction . . . . .	48
1.4.1.7	Le phénomène de thigmomorphogénèse . . . . .	49
1.5	Conclusion de la synthèse bibliographique . . . . .	51
<b>2</b>	<b>Dispositifs étudiés au cours de la thèse</b>	<b>53</b>
2.1	État des lieux des dispositifs expérimentaux agroforestiers en France . . . . .	53
2.2	Descriptif des dispositifs ciblés . . . . .	54
2.2.1	Le dispositif expérimental de Restinclières - Noyers hybrides . . . . .	54
2.2.2	Le dispositif Peuplier de Lent - Peupliers Koster . . . . .	57
2.2.3	La plateforme DIAMs - Robiniers . . . . .	58
2.3	Forces et faiblesses des dispositifs expérimentaux . . . . .	60
2.4	Expérimentations durant la thèse . . . . .	62
2.4.1	Méthodologie . . . . .	62
2.4.2	Échantillonnage des arbres . . . . .	65
2.4.2.1	Échantillonnage des noyers . . . . .	65
2.4.2.2	Échantillonnage des peupliers du dispositif Peuplier de Lent . . . . .	66
2.4.2.3	Échantillonnage des robiniers . . . . .	67
2.5	Synthèse . . . . .	69
<b>3</b>	<b>Croissance des arbres agroforestiers</b>	<b>71</b>
3.1	Introduction . . . . .	71
3.2	Croissance des noyers agroforestiers . . . . .	72
3.2.1	Matériels et méthodes . . . . .	72
3.2.1.1	Bref descriptif des parcelles . . . . .	72

## TABLE DES MATIÈRES

---

3.2.1.2	Mesures de la croissance des noyers AF et FC . . . . .	74
3.2.2	Analyses statistiques . . . . .	75
3.2.3	Résultats . . . . .	75
3.2.3.1	Dimensions des arbres . . . . .	75
3.2.3.2	Effets de la distance à la rivière Lez et de la hauteur de la nappe phréatique . . . . .	78
3.2.4	Discussion . . . . .	80
3.2.5	Conclusion sur la croissance des noyers en milieu agroforestier . . . . .	82
3.3	Croissance du peuplier agroforestier . . . . .	83
3.3.1	Matériels et méthodes . . . . .	83
3.3.2	Résultats et discussions . . . . .	84
3.3.3	Conclusion sur la croissance des peupliers en milieu agroforestier . . . . .	87
3.4	Croissance du robinier agroforestier . . . . .	87
3.4.1	Matériels et méthodes . . . . .	87
3.4.2	Résultats . . . . .	88
3.4.2.1	Croissance des robiniers taillés . . . . .	88
3.4.2.2	Croissance des robiniers non taillés . . . . .	89
3.4.3	Discussion . . . . .	91
3.4.4	Conclusion sur la croissance des robiniers en milieu agroforestier . . . . .	93
3.5	Synthèse . . . . .	94
<b>4</b>	<b>Propriétés physiques et chimiques</b>	<b>95</b>
4.1	Introduction . . . . .	95
4.1	Démarche de l'étude . . . . .	96
4.2	Composition biochimique du noyer agroforestier . . . . .	97
4.2.1	Valorisation du bois des branches d'arbres agroforestiers . . . . .	97
4.2.2	Variations radiales des taux d'extractibles par spectroscopie NIR des noyers agroforestiers et forestiers à l'échelle du tronc . . . . .	106
4.3	Composition biochimique du bois de peupliers agroforestiers . . . . .	118
4.4	Taux d'humidité et faux-cœur . . . . .	133
4.4.1	Matériels et méthodes . . . . .	134
4.4.1.1	Proportion de faux-cœur dans le tronc des peupliers . . . . .	134
4.4.1.2	Mesure du taux d'humidité . . . . .	134
4.4.1.3	Estimation du taux d'humidité moyen de l'aubier et du faux-cœur	135
4.4.2	Résultats & Discussions . . . . .	135
4.4.2.1	Proportion Aubier/Faux-cœur . . . . .	135
4.4.2.2	Taux d'humidité dans le tronc . . . . .	137
4.5	Densité du bois des peupliers . . . . .	141

## TABLE DES MATIÈRES

---

4.5.1	Matériels et méthodes . . . . .	142
4.5.2	Résultats . . . . .	143
4.5.2.1	Paramètres de densité par arbre et par traitement . . . . .	143
4.5.2.2	Étude de la structure du cerne . . . . .	149
4.5.3	Discussions . . . . .	150
4.6	Angle des microfibrilles chez le peuplier . . . . .	151
4.7	Synthèse . . . . .	151
<b>5</b>	<b>Valorisation du peuplier agroforestier</b>	<b>155</b>
5.1	Introduction . . . . .	155
5.2	Complément bibliographique . . . . .	156
5.2.1	Le déroulage . . . . .	156
5.2.2	Le LVL . . . . .	157
5.3	Déroulage et propriétés mécaniques des LVL de peuplier . . . . .	158
5.4	Caractérisation de l'ondulation des placages . . . . .	180
5.4.1	Matériels et Méthodes . . . . .	180
5.4.1.1	Déroulage et préparation des placages . . . . .	180
5.4.1.2	Mesure de l'ondulation . . . . .	181
5.4.1.3	Analyses statistiques . . . . .	183
5.4.2	Résultats . . . . .	183
5.4.2.1	Cartographie des ondulations . . . . .	183
5.4.2.2	Comparatif général des paramètres d'ondulations entre les parcelles	184
5.4.2.3	Influence de la distance à la moelle . . . . .	185
5.4.2.4	Influence de la présence de faux-coeur . . . . .	186
5.4.3	Discussion . . . . .	188
5.5	Synthèse . . . . .	189
	<b>Conclusions générales et perspectives</b>	<b>191</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>197</b>
	<b>Liste des tableaux</b>	<b>214</b>
	<b>Liste des figures</b>	<b>218</b>
	<b>Liste des abréviations</b>	<b>219</b>



# Introduction

## Contexte de la thèse

Pendant des siècles, les systèmes agroforestiers ont constitué une part importante de l'agriculture européenne et une partie intégrante du paysage. Ces systèmes ont progressivement décliné avec l'intensification des pratiques agricoles de l'après guerre : les arbres et les haies ont progressivement perdu leur place dans les modèles agricoles (BARR et GILLESPIE, 2000 ; BAZIN et SCHMUTZ, 1994 ; POINTEREAU, 2002 ; POINTEREAU et COULON, 2006). Les nombreuses opérations de remembrement, la mécanisation, la simplification des assolements et l'utilisation massive d'intrants au cours du 20<sup>ème</sup> siècle ont alors placé l'arbre en tant que concurrent des cultures alimentaires, le faisant ainsi disparaître complètement des systèmes agricoles. Mais dès les années 1970, les nouveaux modèles d'agriculture intensive ont présenté des faiblesses économiques, environnementales et sociales (NAIR, 1993), conduisant les scientifiques et une partie des agriculteurs à redéfinir et mettre en œuvre des modèles agricoles alternatifs intégrant les questions environnementales et sociales dans le développement économique (REID et al., 2005). L'arbre, qui n'avait alors plus sa place dans les systèmes agricoles, est à nouveau intégré dans les modèles de production agroécologiques et réapparaît progressivement dans les territoires.

Ainsi, la transition agroécologique de l'agriculture qui s'inscrit aujourd'hui dans le contexte des changements climatiques et du renforcement de la biodiversité doit répondre à l'un des défis majeurs du 21<sup>ème</sup> siècle : mettre en place de nouveaux modèles agricoles permettant à la fois d'augmenter la production de biomasse à l'hectare et d'assurer des rendements agricoles permettant de subvenir aux besoins alimentaires d'une population grandissante, tout en prenant en compte les contraintes environnementales et le respect des écosystèmes. De nouveaux modèles agricoles ont alors été développés en opposition aux modèles intensifs, telle que l'agroécologie, qui intègre les enjeux écologiques et la préservation des ressources naturelles dans les systèmes de production tout en minimisant le recours aux intrants (engrais et pesticides) (GUILLOU et al., 2013 ; SCHALLER, 2013 ; STASSART et al., 2012). Cette évolution des méthodes de production

## INTRODUCTION

---

conduit parfois à la réapparition de pratiques qui avaient alors disparu lors de l'intensification de l'agriculture au cours des siècles précédents. C'est le cas de l'agroforesterie, pratiquée depuis des millénaires à travers le monde et qui associe sur une même parcelle agricole, une composante arborée à une culture et/ou à du bétail. Le rapport spécial du GIEC sur l'usage des terres considère notamment ces pratiques comme un levier possible permettant de lutter contre les changements climatiques et d'assurer la sécurité alimentaire (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2019).

En conséquence, des politiques et des stratégies ont été mises en place avec pour objectif de replanter des arbres et des haies dans les champs tout en prenant en considération les questions environnementales, sociales et économiques qui sont au cœur de la production agricole et des besoins alimentaires. En Europe, les surfaces agroforestières, incluant l'agrosylviculture, le sylvopastoralisme et l'agrosylvopastoralisme, restent difficiles à dénombrer. Elles ont été estimées à 19,77 Mha (MOSQUERA-LOSADA et al., 2018). La base de données LUCAS (*Land Use and Land Cover data*) estime quant à elle ce nombre à 15,4 Mha pour les 27 pays de l'Union Européenne (den HERDER et al., 2017). À l'échelle mondiale, les surfaces de cultures agroforestières ont tendance à augmenter progressivement (FAO, 2019; ZOMER et al., 2014). Zomer et al. ont estimé une augmentation de ces surfaces de 1,6% entre 2000 et 2010 (ZOMER et al., 2014). Cependant, d'après l'enquête TERUTI-LUCAS (organisée par Agreste, service statistique du Ministère de l'Agriculture) une tendance contraire est observée à l'échelle de la France, avec des surfaces agroforestières de 1,003 Mha en 2007, 0,96 Mha en 2012 et 0,944 Mha en 2014.

La France reste cependant un pays pionnier en Europe en termes de développement de l'agroforesterie, où de nombreuses actions sont mises en place afin de faciliter cette transition agroécologique auprès des agriculteurs. L'évolution des dernières Politiques Agricoles Communes (PAC 2007 - 2013 et 2014 - 2020) est à l'origine de plusieurs mesures destinées à encourager les membres de la filière dans le maintien, l'entretien et la replantation d'arbres et de haies. Des initiatives à l'échelle locale émergent également, soutenues financièrement par des Fondations, des entreprises ou des collectivités. En 2015, le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt a mis en place un plan de développement de l'agroforesterie sur la période 2015-2020, divisé en cinq axes principaux avec pour objectifs de dynamiser la filière et d'améliorer les pratiques au sein des exploitations agricoles (Plan de développement de l'agroforesterie - Pour le développement et la gestion durable de tous les systèmes agroforestiers, 2016). L'axe 1 en particulier relevait une absence de suivi et de connaissances des systèmes agroforestiers d'un point de vue qualitatif et quantitatif en France et visait à améliorer la compréhension du fonctionnement de ces écosystèmes et à augmenter les thématiques de recherches sur l'agroforesterie. L'axe 4 quant à lui prévoyait l'amélioration de la valorisation économique des produits et co-produits ligneux issus de l'agroforesterie, le tout de manière durable. Ces volets n'avaient pas encore été abordés jusqu'ici. L'évaluation de ce plan de développement en juin 2021 a mis en lumière que

## INTRODUCTION

---

de nombreux objectifs fixés n'avaient pas été encore atteints malgré les nombreuses avancées et les importantes réalisations (DROUILLAT et al., 2021). Hormis pour la haie et le bocage, très peu de travaux ont été menés sur la valorisation des filières agroforestières. Les arbres issus de ces systèmes de culture sont encore peu considérés comme des ressources valorisables à part entière dans les systèmes agroforestiers. Les freins administratifs et réglementaires auxquels ils sont confrontés constituent des verrous pour les agriculteurs ce qui ne les encourage pas à faire évoluer leurs pratiques en faveur de l'agroforesterie en considérant l'arbre comme une ressource en tant que telle. De ce fait, la valorisation et l'intégration des arbres agroforestiers dans les filières bois et industrielles peinent à être mises en place et les arbres agroforestiers sont souvent destinés à être utilisés en bois de chauffage, bois énergie ou paillage mais fort peu en tant que matériaux d'ingénierie.

Ainsi, afin d'améliorer le modèle et la résilience économique de ces nouveaux systèmes agricoles, l'arbre agroforestier devrait être considéré comme une ressource à part entière valorisable sous forme de matériau, d'énergie et de molécules d'intérêt, comme le sont les arbres cultivés dans des systèmes forestiers plus traditionnels. Ces considérations permettraient d'intégrer l'agroforesterie au champ social économique (LABANT, 2017) et d'inclure progressivement l'arbre agroforestier dans la filière bois.

Dans ce contexte, une meilleure compréhension de leur dynamique de croissance et de développement est essentielle pour décrire et prédire la qualité du bois et en optimiser à la fois la valorisation et la transformation des bois. Cependant, si les systèmes agroforestiers tropicaux ont été largement étudiés jusqu'à présent, ce n'est pas le cas des systèmes agroforestiers des régions tempérées, que ce soit en Europe ou en Amérique du Nord. En général, les études sur ces systèmes se concentrent davantage sur l'impact des arbres sur les cultures et il existe très peu d'informations sur l'impact de ce système cultural particulier sur le développement des arbres (CUTTER et GARRETT, 1993), leur dynamique et sur la qualité du bois qu'ils produisent.

Or, l'arbre agroforestier évolue dans un environnement dont les spatialisations sont assez éloignées de celles rencontrées dans les stations forestières et les plantations ligneuses conventionnelles. Les densités de plantation y sont notamment beaucoup plus faibles (entre 30 et 200 arbres/ha), exposant davantage les arbres à la lumière et au vent, tout en modifiant son accès à l'eau en fonction des cultures intercalaires. La compétition habituellement observée dans les parcelles forestières est remplacée par des interactions avec le bétail et/ou les cultures auxquelles ils sont associés. À cela viennent s'ajouter de nombreuses interventions humaines, d'élagage par exemple, ou de réductions racinaires. L'ensemble de ces conditions de croissance conditionnent le développement de l'arbre et la formation de son bois, modifiant ainsi la quantité et la qualité de biomasse produite.

### Problématiques et objectifs de la thèse

Ce travail de thèse cherche ainsi à apporter les premières réponses vis-à-vis du développement, des cinétiques de croissance et de production de biomasses, et de la qualité des bois d'arbres agroforestiers, en comparaison à celles des arbres provenant de systèmes forestiers plus conventionnels. Étant donné le fait que cette thématique a encore été très peu étudiée par la communauté scientifique, aussi bien dans les domaines de recherche centrés sur l'agroforesterie que forestiers, ce travail de thèse couvre les trois problématiques suivantes, allant de la croissance des arbres, leurs propriétés physiques et biochimiques, et leurs voies de valorisation potentielles :

1. Quelle est l'influence des spatialisations très ouvertes des systèmes agroforestiers sur les croissances primaire et secondaire des arbres agroforestiers? Comment ces arbres agroforestiers allouent-ils leur biomasse dans ces systèmes? Les réponses d'acclimatation thigmomorphogénétiques, liées à l'exposition au vent et observées dans les milieux forestiers peu denses et en laboratoire s'applique-t-elles aux milieux agroforestiers? Les arbres agroforestiers produisent-ils davantage de bois de réaction en réponse aux sollicitations mécaniques induites par l'environnement venteux dans lequel ils évoluent? Cette acclimatation des arbres implique-t-elle une modification de la transition de leur bois juvénile en bois mature?
2. Comment les conditions de croissance en milieu agroforestier modifient-elles les propriétés physiques et chimiques du bois? Ces propriétés des arbres agroforestiers sont-elles similaires à celles des arbres issus de plantations conventionnelles et forestières?
3. Les arbres agroforestiers peuvent-ils être intégrés dans la filière bois, utilisés et valorisés de la même manière que les arbres issus de plantations conventionnelles et forestières? La qualité des arbres agroforestiers en terme d'usage est-elle proche de celles des arbres forestiers?

Ce travail a été conduit sur trois essences : le noyer hybride, le peuplier Koster et le robinier. Le noyer est particulièrement apprécié en ébénisterie pour sa haute valeur esthétique mais la filière européenne souffre actuellement de sous-production. Son architecture et son autécologie font de lui une essence particulièrement adaptée aux pratiques agroforestières. C'est par ailleurs une essence que l'on rencontre déjà dans ce domaine, les plus vieux dispositifs agroforestiers français étant notamment composés de noyers mis en association avec des cultures annuelles. Son étude est donc pertinente puisqu'elle permettra d'établir une première approche en vue de valoriser ces derniers lorsqu'ils seront en mesure d'être exploités.

La filière populicole française représente à ce jour 26% de la ressource feuillue exploitée en France et alimente des filières industrielles porteuses et en constante augmentation telles que les industries du contreplaqué, de la construction et de l'emballage léger. Son approvisionnement

marque cependant le pas depuis quelques années notamment en raison d'une diminution importante de la dynamique de plantation en fond de vallée et de fragilités sanitaires de cultivars très exigeants en eau. Dans ce contexte, l'agroforesterie est de plus en plus envisagée comme solution complémentaire aux plantations conventionnelles afin de participer à la pérennisation de la ressource. L'introduction de peupliers comme espèce brise-vent à croissance rapide ou comme source de revenu supplémentaire pour les agriculteurs dans les systèmes agroforestiers est une pratique relativement courante, et la diversité des cultivars de peupliers promet une bonne adaptation aux conditions environnementales de ces dispositifs. Mais afin d'être intégré dans la filière populicole, il convient de déterminer les caractéristiques des peupliers agroforestiers issus de cultivars supportant les sols drainés en terme de production de biomasse mais également les qualités liées à leurs propriétés mécaniques.

Le robinier est quant à lui une essence particulièrement intéressante pour un usage en agroforesterie, sa capacité de fixation de l'azote dans le sol faisant de lui un atout pour les cultures agricoles en participant à la fertilisation naturelle des sols. Sa résistance à la sécheresse et son adaptation à un large champ de conditions environnementales en font un bon candidat pour l'agroforesterie, en particulier dans les parcelles où les essences ligneuses aux exigences écologiques élevées ne peuvent être envisagées. La très bonne durabilité de son bois et sa résistance mécanique sont particulièrement appréciées dans la fabrication des piquets pour les pâtures mais également pour les éléments de structures, de meubles extérieurs et de parquet.

Ce projet, financé par la Fondation de France, regroupe trois laboratoires de recherche dont la complémentarité des thématiques de recherche et des compétences permettent de répondre à l'ensemble des problématiques soulevées précédemment :

- Le LaBoMaP (EA 3633, ENSAM, Campus de Cluny) : l'équipe MUB (Matériaux et Usinage Bois), à l'interface entre la forêt et l'industrie, se consacre à la maîtrise des procédés de première transformation tout comme à la maîtrise des propriétés mécaniques des produits techniques bois. Les études qui y sont menées portent principalement sur la valorisation des essences locales à croissance rapide et des feuillus de qualité secondaire.
- L'UPR BioWooEB (Biomass Wood Energy Bioproducts, UPR 114 du CIRAD, Montpellier) : cette unité de recherche a pour objectif la valorisation des biomasses végétales et co-produits de transformation issus de systèmes agricoles méditerranéens et tropicaux. Elle participe à la durabilité et à l'efficacité des systèmes agroforestiers par la valorisation non-alimentaire de leurs produits et sous-produits. Elle développe des compétences en termes d'analyses de compositions chimique et biochimique, associées à la durabilité naturelle des bois, ainsi que des outils et des modèles basés sur de la spectrométrie Infra-rouge et proche Infrarouge pour caractériser ces propriétés rapidement et sans détruire la matière.

- L'UMR PIAF (UMR 547 PIAF, UCA-INRAE, Clermont Ferrand) : les thématiques de recherche sont menées sur les réponses physiologiques des arbres aux facteurs de l'environnement (hydrique, lumineux, mécanique. . .). L'équipe MECA se consacre notamment aux processus d'acclimatation aux stress mécaniques imposés par le vent.

Ce mémoire de thèse se divise en 6 grandes parties. Compte tenu de l'interdisciplinarité de ce travail, combinant des analyses sur la croissance, les propriétés physiques, chimiques et mécaniques ainsi que sur des procédés de première transformation des grumes, nous proposons dans un premier chapitre de familiariser le lecteur avec les différentes notions abordées dans la suite de ce manuscrit. Si certains éléments ne sont pas décrits dans cette partie, ils le seront dans les compléments bibliographiques en début de chaque chapitre. Cette synthèse bibliographique abordera dans un premier temps les bases de la structure de l'arbre, de sa croissance et de son développement. Nous évoquerons les différentes caractéristiques environnementales pouvant affecter les propriétés et la croissance des arbres. La deuxième partie de cet état de l'art dressera un rapide portrait de l'agroforesterie en France et des différents bénéfices apportés par cette pratique agroécologique. Enfin, un focus sur les trois essences étudiées au cours de cette thèse sera réalisé et clôturera cette synthèse bibliographique.

Le deuxième chapitre sera ensuite consacré à la description des trois dispositifs expérimentaux sur lesquels les travaux ont été réalisés. Il permettra d'identifier les différentes études menées sur les trois essences et d'expliquer le choix de ces dispositifs particuliers.

Le troisième chapitre sera axé sur la comparaison des croissances en hauteur et en diamètre des noyers hybrides, des peupliers et des robiniers ayant poussé en conditions agroforestières à celles de leurs témoins issus de plantations conventionnelles. Le travail réalisé sur le noyer permettra un suivi de la croissance des arbres depuis leur plantation en 1995. L'analyse menée sur le peuplier évaluera le comportement d'un des cultivars ciblés pour une utilisation en système agroforestier, le Koster, dont la hauteur et le diamètre seront comparés à ceux des témoins forestiers. Enfin un focus sur le phénomène de thigmomorphogénèse en milieu agroforestier sera effectué dans le cas du robinier.

Après avoir étudié leur croissance, nous déterminerons dans le chapitre 4 l'influence des conditions de développement dans les systèmes agroforestiers sur certaines propriétés chimiques et physiques des noyers et des peupliers de nos dispositifs. Dans la première partie consacrée aux propriétés chimiques, la teneur en molécules d'intérêt présentes dans les différents compartiments de l'arbre (tronc, branches, noeuds, écorce) sera quantifiée et certaines d'entre elles seront identifiées chez le noyer. La spectroscopie NIR sera au coeur des expérimentations de ce volet, et permettra notamment d'évaluer la proportion de lignine présente dans le tronc des peupliers agroforestiers, macromolécule majeure présente dans le bois et dont la variation peut traduire la présence de certains bois de réaction dans l'arbre. La seconde partie, consacrée aux les pro-

## INTRODUCTION

---

priétés physiques du bois agroforestier, sera axée sur le bois de peuplier à travers la description du taux d'humidité du tronc en relation avec la présence de faux-cœur, la densité et l'angle des microfibrilles de cellulose. Toutes les propriétés des arbres agroforestiers seront comparées à celles de leurs témoins forestiers.

Ce travail permettra d'appréhender le cinquième et dernier chapitre de cette thèse dont l'objectif sera d'évaluer la qualité du bois de peuplier agroforestier en vue d'une valorisation appliquée au cas du déroulage. L'évaluation des propriétés mécaniques (résistance et rigidité) de produits techniques bois sera réalisée sur des panneaux de LVL (Laminated Veneer Lumber, ou Lamibois) obtenus après déroulage de peupliers agroforestiers et forestiers. L'ondulation des placages de ces mêmes peupliers sera également caractérisée, ce paramètre influençant la qualité finale des placages destinés à l'emballage léger et des panneaux de contreplaqués et de LVL.

Enfin, une conclusion générale viendra clore ce mémoire de thèse en rappelant les principaux résultats obtenus, ainsi que les perspectives de travaux complémentaires envisagés.



# Chapitre 1

## Synthèse bibliographique

Cette synthèse bibliographique apporte une approche globale du principe de l'agroforesterie et des Sciences du bois, permettant ainsi de comprendre les enjeux et le fonctionnement des pratiques agroforestières tout en se familiarisant avec le développement général de l'arbre et la formation de son bois. Des détails plus spécifiques au niveau de la bibliographie sont inclus dans les différents chapitres du manuscrit et dans les publications citées.

### 1.1 L'agroforesterie

L'agroforesterie est pratiquée par des millions d'agriculteurs à travers le monde et fait partie intégrante de l'agriculture depuis des millénaires. En 1993, P.K.R. Nair, l'une des références de l'agroforesterie en tant qu'objet d'étude, donnait la définition suivante : "l'agroforesterie consiste en l'association délibérée d'arbres à des cultures végétales et ou à des élevages, sur une même parcelle ou sous toute autre forme d'arrangement spatial ou temporel, et dont les interactions (écologiques et ou économiques) entre les composantes arborées et non arborées sont significatives" (NAIR, 1993). Cette définition a par la suite été officiellement adoptée par le World Agroforestry Centre. L'agroforesterie englobe un ensemble de pratiques d'utilisation des terres qui visent à tirer parti des avantages de la culture combinée d'espèces ligneuses et herbacées, généralement par l'ajout d'arbres aux terres déjà utilisées pour le pâturage ou pour la culture de plantes annuelles (ANDERSON et S. SINCLAIR, 1993). Les configurations des systèmes agroforestiers sont multiples et prennent de nombreuses formes en fonction de la diversité des situations climatiques et environnementales. Les différentes combinaisons d'arbres, d'animaux et des composants herbacés sont adaptées aux contraintes locales et aux objectifs visés par l'agriculteur. L'existence d'un système agroforestier dans une zone est principalement déterminée par le potentiel écologique de la zone, mais les facteurs socio-économiques déterminent la complexité du système et du degré d'intensification de sa gestion. Ces systèmes complexes ont été regroupés

## 1.1. L'AGROFORESTERIE

---

en différentes catégories reposant sur l'association des trois grands composants gérés dans les systèmes agroforestiers : les plantes vivaces ligneuses (les arbres), les plantes herbacées dont de petites vivaces comme les plantes aromatiques (les cultures) et les animaux (le bétail). On considère ainsi qu'en Europe il existe trois systèmes agroforestiers de base :

- L'agrosylviculture : association de cultures et d'arbres ;
- L'agrosylvopastoralisme : association de cultures, de bétail et d'arbres ;
- Le sylvopastoralisme : association de bétail (pâturage) et d'arbres.

La configuration des arbres au sein des parcelles est très diversifiée. En France, le linéaire bocager (sous forme de haies bocagères, environ 810 000 ha en 2012) est le plus représenté (BALNY et al., 2015)(Figure 1.1b). Les arbres, fruitiers ou forestiers, peuvent également être introduits au sein de la parcelle, on parle alors de systèmes intraparcéllaires (Figure 1.1a), qui regroupent les alignements et les bosquets. Ces systèmes sont conduits en prairies ou associés à des grandes cultures ou à du maraîchage. Ces arbres sont essentiellement des feuillus, et leurs surfaces en France étaient estimées en 2012 à 150 000 ha (BALNY et al., 2015).



(a)



(b)

FIGURE 1.1 – (a) Pâturage sous une plantation de noyers hybrides (Crédit : E. Juarez ; source : agroforesterie.fr) - (b) Linéaire bocager (Crédit : Air Papillon).

### 1.1.1 Les avantages de l'agroforesterie

Les bénéfices de l'association d'arbres à une composante agricole ne sont aujourd'hui plus à démontrer : lutte contre l'érosion des sols, régulations microclimatiques et hydriques, accroissement et préservation de la biodiversité, limitation des intrants de synthèse dans les champs, augmentation et diversification de la production de biomasse au sein d'une parcelle et stockage de carbone (Figure 1.2). L'arbre assure ainsi à la fois une fonction écologique et économique (Plan de développement de l'agroforesterie - Pour le développement et la gestion durable de tous les systèmes agroforestiers, 2016).

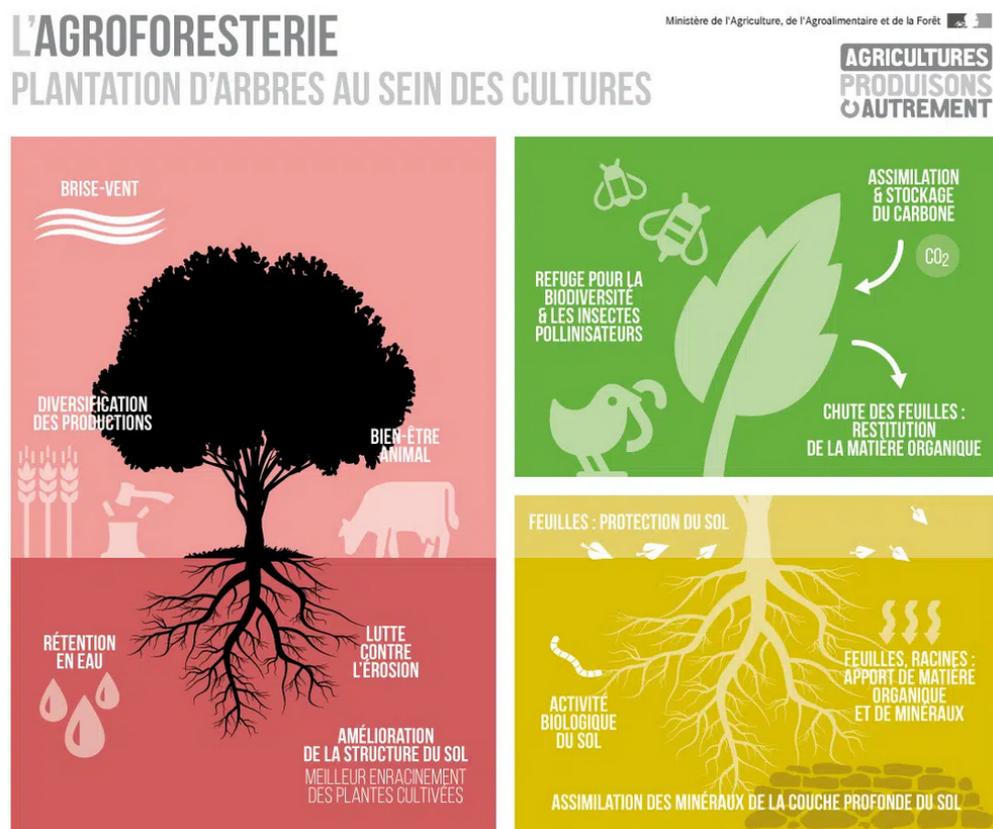


FIGURE 1.2 – Les bénéfices de l'agroforesterie (Infographie : Plan de développement de l'agroforesterie - Pour le développement et la gestion durable de tous les systèmes agroforestiers, 2016)

### 1.1.1.1 Production de biomasse et intérêts économiques

Sur le plan agricole, l'agroforesterie offre une diversification des activités et des revenus pour l'agriculteur en lui assurant à la fois un revenu sur le court terme (cultures, élevage) et sur le moyen à long terme (bois). De plus, l'association arbres/cultures semble souvent plus productive que lorsque les cultures et les arbres sont cultivés séparément (DUPRAZ et CAPILLON, 2005 ; VARAH, 2015). Dupraz (2005) estime qu'une parcelle agroforestière peut produire jusqu'à 60% de biomasse supplémentaire (en volume) qu'un assolement de cultures pures (DUPRAZ et CAPILLON, 2005). En ce qui concerne la valorisation ligneuse de ces systèmes agroforestiers, LIAGRE et al., 2012 estiment qu'avec une cinquantaine d'arbres par hectare, l'agriculteur dispose à terme d'un potentiel de 40 m<sup>3</sup> de bois d'oeuvre valorisable entre 10 000 et 20 000€ en fonction des essences et de la qualité d'entretien des arbres qui leur a été prodigué pendant leur croissance (élagage, taille), permettant ainsi une rentabilité sur le long terme du système supérieure à celle d'une parcelle agricole pure (DUPRAZ et al., 2005). En prenant en compte les tensions d'approvisionnement de certaines filières françaises (la filière populicole ou la filière noix à titre

d'exemple), et de la demande grandissante en matériaux renouvelables et en matériaux biocomposites pour la chimie et l'industrie, la ressource ligneuse agroforestière, bien qu'encore marginale, peut apporter un soutien à la filière bois française et aux besoins de proximité (circuits courts).

### 1.1.1.2 Services écosystémiques rendus par les systèmes agroforestiers

Au-delà de l'avantage économique qu'ils représentent, le rôle des arbres agroforestiers au sein des systèmes dans lesquels ils se développent est essentiel et favorise le fonctionnement agroécologique de la parcelle. Les nombreux services écosystémiques rendus par ces systèmes sont présentés ci-dessous :

— **Amélioration de la fertilité du sol**

Les arbres agroforestiers interviennent dans la formation des sols et dans l'amélioration de leur fertilité biologique. Leur enracinement profond permet l'infiltration de l'air et de l'eau en profondeur, altérant ainsi la roche mère qui libère les nutriments qui y sont stockés. Leur biomasse en décomposition au sol fournit également un apport supplémentaire de nutriments disponibles. De plus, en fixant l'azote du sol, les arbres assurent une meilleure disponibilité de cette ressource essentielle pour le développement des végétaux cultivés. La présence d'arbres profondément enracinés dans le système peut contribuer à améliorer les conditions physiques du sol et ses activités microbiologiques, améliorant ainsi la fertilité des sols agroforestiers (NAIR et al., 2008).

— **Qualité de l'eau**

L'enracinement profond des racines des arbres intervient également dans la régulation hydraulique des sols cultivés : la compétition dans le premier horizon avec les racines des espèces herbacées cultivées stimule les racines des arbres agroforestiers à se développer plus profondément dans le sol (DUPRAZ et al., 1995 ; DUPRAZ et LIAGRE, 2008). De plus, la redistribution hydraulique induite par les arbres, notamment grâce à l'évaporation (Y. LIU et al., 2021), joue un rôle essentiel dans le stockage et l'utilisation de l'eau du sol, permettant ainsi aux plantes voisines à racines peu profondes d'accéder lors des périodes de sécheresse à l'eau prélevée en profondeur (LEE et al., 2018 ; LUDWIG et al., 2004). En plus de puiser les éléments nutritifs du sol, les racines des arbres vont permettre l'interception des polluants qui y sont présents. À maturité, ces arbres ont créé ce qu'on appelle un filet racinaire qui capte les polluants mais qui évite également la fuite de l'azote dans l'atmosphère (LIAGRE et al., 2012 ; NAIR, 2011).

— **Protection de la biodiversité**

La multiplication des strates de végétaux cultivés sur une même parcelle permet la diversification de la flore et de la faune, notamment des insectes rampants mais surtout

## 1.1. L'AGROFORESTERIE

---

volants qui jouent un rôle majeur dans la pollinisation des cultures. Une étude menée par Varah en 2015 comparant la biodiversité dans des parcelles agroforestières et des monocultures a montré que l'on retrouvait 3,6 fois plus d'insectes pollinisateurs dans des parcelles agroforestières que dans des monocultures (VARAH, 2015). De plus, les arbres offrent des ressources et le refuge à des espèces auxiliaires indispensables dans le contrôle des ravageurs. L'équilibre entre auxiliaires et ravageurs permet ainsi de limiter l'utilisation de pesticides, néfastes pour l'environnement et qui posent de nombreux problèmes sanitaires.

### — **Atténuation des changements climatiques**

Les arbres contribuent à la réduction des émissions de carbone. Une parcelle agroforestière en milieu tempéré permettrait de stocker 1,5 à 4 tonnes de carbone par hectare par an (P. SCHROEDER, 1994). L'agroforesterie n'est donc pas à négliger dans les objectifs fixés pour lutter contre les changements climatiques dans le cadre des objectifs de développement durable fixés par les Nations-Unies.

### — **Protection des cultures et bien-être animal**

En améliorant le bilan hydrique, en limitant le dessèchement et en protégeant les cultures et le bétail des hauts rayonnements solaires lors des canicules estivales, du vent et de la pluie, l'agroforesterie influence positivement les microclimats (CRAAQ, 2020) et assure une protection des cultures et du bétail face aux aléas climatiques.

### 1.1.2 Les conditions de croissance des arbres en milieu agroforestier

Dans les systèmes agroforestiers tempérés, les arbres se développent dans des conditions éloignées de celles des plantations forestières conventionnelles ou même des plantations de type populiculture. Parmi les paramètres spatiaux variant le plus dans ces systèmes, on retrouve une densité de plantation, nettement inférieure à celles observées en milieu forestier. En France, ces dernières varient en fonction des essences mais oscillent entre 1 100 plants/ha à 2000 plants/ha dans le cas de peuplements à forte densité, et entre 400 à 600 plants/ha dans le cas de peuplements à faible densité pour certains feuillus comme le noyer ou le peuplier (IGN, 2017). Dans les systèmes agroforestiers, cette densité est largement réduite et se situe entre 30 et 200 arbres/ha. Dans le cas de systèmes en alignement intraparcellaire, cette augmentation de la distance entre les arbres au sein des parcelles agroforestières a pour conséquence d'une part de modifier la quantité de lumière à laquelle ils sont exposés et d'autre part de les exposer davantage au vent. En plus de ces modifications spatiales, d'autres facteurs interviennent dans le développement des arbres agroforestiers : les interactions avec les cultures et/ou le bétail auxquels ils sont associés, mais également les interventions humaines d'entretien auxquelles ils sont soumis, telles que l'élagage, la taille et les réductions racinaires peuvent impacter le développement des arbres

## 1.1. L'AGROFORESTERIE

---

agroforestiers. Ces opérations sont cependant indispensables au bon développement du tronc, du houppier et des cultures intercalaires : la taille, qui permet d'obtenir un tronc le plus rectiligne possible et l'élagage, qui permet une gestion fine de l'accès à la lumière des cultures tout en limitant les nœuds et les défauts liés aux branches (MONTAGU et al., 2003).

Ainsi, ces conditions de croissance particulières conditionnent le développement architectural de l'arbre agroforestier ainsi que la formation de son bois tant sur la quantité de biomasse produite que sur ses propriétés. Toutefois, la majorité des études portant sur les systèmes agroforestiers concernent les effets des arbres sur les cultures. Dans les cas où l'arbre est placé au cœur de la problématique, les études concernent souvent davantage sa productivité (LAMERRE et al., 2015) que ses dynamiques de croissance et la qualité de son bois. Quelques études se sont cependant intéressées à ce sujet (CUTTER et GARRETT, 1993 ; SHANAVAS et KUMAR, 2006 ; SHUKLA et VISWANATH, 2014 ; TAGHIYARI et EFHAMI SISI, 2012). En 1993 par exemple, Cutter et al. se sont intéressés au développement et à la qualité du bois de noyers agroforestiers (CUTTER et GARRETT, 1993). La longueur des fibres, l'infradensité et le taux de croissance ont été mesurés chez de jeunes noyers âgés de 15 ans. Leur conclusion est telle que l'effet du traitement agroforestier est bénéfique pour ces trois paramètres mais aucune comparaison n'a été faite avec des noyers témoins ayant poussé en plantation conventionnelle. Shanavas et Kumar (2006) ont quant à eux évalué les propriétés mécaniques et physiques de trois essences feuillues (*Acacia auriculiformis*, *Acacia mangium*, et *Grevillea robusta*) s'étant développées en milieu agroforestier. Entre autres, le module de rupture, le module d'élasticité et l'infradensité ont été mesurés. Si les auteurs suggèrent que les pratiques agroforestières n'ont pas d'effets négatifs sur ces propriétés, les valeurs obtenues ont été comparées entre les trois essences sans être confrontées à d'autres données provenant du bois d'éventuels témoins issus de parcelles forestières conventionnelles (SHANAVAS et KUMAR, 2006). Dans l'étude de Shukla et Viswanath (2014), les propriétés mécaniques et physiques du bois de teck (*Tectona grandis* L.f.) issu de trois systèmes agroforestiers différents (plantations en blocs non gérés, en lignes non gérées à la limite de l'exploitation et en blocs gérés de manière intensive) ont été comparées entre elles puis à des valeurs de référence du bois de teck forestier. Ils ont notamment constaté un effet du traitement sylvicole entre les trois parcelles agroforestières mais ont également remarqué que les tecks agroforestiers présentaient des propriétés mécaniques et physiques inférieures à celles de référence obtenues pour les tecks forestiers (SHUKLA et VISWANATH, 2014). En revanche, cette étude a été faite sur une essence tropicale et les valeurs de propriétés physiques et mécaniques des tecks forestiers utilisées comme référence sont issues d'une étude beaucoup plus ancienne (SEKHAR, 1966) impliquant que les tecks agroforestiers et forestiers n'ont pas poussé dans des conditions de croissance similaires. D'autres études ont été menées, en particulier sur les effets de l'agroforesterie sur l'anatomie du bois des arbres issus de ces systèmes. Le peuplier noir (*Populus nigra* var. *betulifolia*) a été au cœur de l'étude de Efhami Sisi et al (2010) dans laquelle l'influence de différentes modalités

## 1.2. LES ESSENCES CIBLÉES

---

de spatialisations agroforestières sur le diamètre des vaisseaux et leur fréquence a été analysée. Ils rapportent notamment que l'association avec une culture intercalaire de luzerne ainsi que l'augmentation de l'espacement initial entre les arbres ont eu un effet positif sur le taux de croissance qui, à son tour, a affecté le diamètre et la fréquence des vaisseaux mais à nouveau, aucun comparatif avec des arbres témoins forestiers n'a été réalisé (EFHAMI SISI et al., 2010). Ainsi, les connaissances sur le développement des arbres en milieu agroforestier et sur les propriétés de leur bois sont encore peu nombreuses. Les quelques études mentionnées ci-dessus démontrent que le sujet commence peu à peu à être évoqué au sein des problématiques de recherche sur l'agroforesterie mais la plupart concernent des essences à croissance rapide, évoluant dans des milieux très contrastés et à relativement forte densité de plantation (supérieure à 200 arbres/ha) et sans réel comparatif avec leurs équivalents forestiers, faute de dispositifs expérimentaux permettant une telle comparaison.

### 1.1.3 Conclusion sur les principes de l'agroforesterie

Cette première partie a permis une première approche des grands principes de l'agroforesterie en France. Après avoir présenté les principaux types d'agroforesterie (systèmes intra et inter-parcellaires), elle a notamment mis en lumière les nombreux bénéfices de cette pratique agroécologique et présenté les enjeux de l'intégration de la valorisation des arbres agroforestiers au sein de la filière bois. Dans le cadre de cette thèse, l'intra-parcellaire sera favorisé, les trois dispositifs étudiés relevant de cette catégorie. Les principales différences entre les parcelles agroforestières en terme de spatialisation et d'interactions entre les différentes composantes de ces systèmes ont été exposées, et les lacunes en terme de recherches ciblées sur le développement de l'arbre en milieu agroforestier ont été soulevées, permettant ainsi de comprendre l'intérêt de réaliser des études fines de la croissance de ces arbres et le processus de formation de son bois.

Avant d'aborder la dernière partie de ce chapitre bibliographique consacrée au développement de l'arbre, à la structure de son bois et aux différents paramètres influençant sa formation et les propriétés mécaniques résultantes, les différentes essences étudiées au cours de cette thèse sont présentées ci-après.

## 1.2 Les essences ciblées

### 1.2.1 Le peuplier

Le genre *Populus* regroupe environ 30 espèces de peupliers dont l'aire naturelle se situe majoritairement dans l'hémisphère nord (États-Unis, Canada, Europe, Russie, Chine, Japon et Afrique du Nord). C'est une essence héliophile (qui apprécie l'exposition au soleil et à ses rayonnements (lumière, ultra-violet, chaleur)) qui se développe naturellement au bord des cours d'eau

## 1.2. LES ESSENCES CIBLÉES

---

et dans les zones humides. Sa croissance extrêmement rapide lui vaut d'être très cultivé dans des plantations, souvent en ligne, sous le terme de populiculture (BROSSE, 2000). La majorité des plantations situées en France se base sur l'utilisation de quelques cultivars issus d'une hybridation interspécifique. Ces derniers sont sélectionnés en fonction de la station correspondante au terrain (type de sol, climat local), des conditions de taille et d'élagage, des risques sanitaires auxquels les cultivars peuvent être exposés et de la qualité du bois produit qui est étroitement liée au cultivar (CNP, 2018). La plupart de ces cultivars sont issus de deux croisements : le premier est un croisement entre deux espèces nord-américaines (*Populus. deltoïdes* × *Populus trichocarpa* ; peupliers interaméricains), le second un croisement entre une espèce nord-américaine et une espèce eurasiatique (*Populus. deltoïdes* × *Populus. nigra*). En 2015, les cultivars les plus vendus en France étaient le Koster (avec une part de marché de 22%), I45-51 (15%) et Polargo (10 à 9%)(BASTIEN et al., 2015).

Le peuplier représente 26% de la récolte de feuillus en France, il est la deuxième essence feuillue la plus exploitée dans le pays où il occupe une surface d'environ 200 000 hectares (2% de la surface). Sa récolte est en constante évolution, avec une augmentation de 13,6% ces dernières années pour atteindre 1,4 Mm<sup>3</sup> de bois en 2017. Résistant, très léger et facile à travailler, le bois de peuplier est principalement utilisé dans deux industries : le déroulage (2/3 de la production) et le sciage (1/3 de la production), pour la fabrication de contreplaqués, d'emballages légers, de palettes et de caisses. Les contreplaqués représentent 32 % des utilisations finales du bois de peuplier et leurs productions sont en forte augmentation depuis 2015 (+ 40%). Cependant, la ressource française en peuplier a largement diminué depuis les années 1990 notamment du fait d'une forte diminution du nombre d'arbres replantés, passant de 2,3 millions d'arbres plantés par an à 800 000 plants/an en 2017 (CODIFAB, 2016, mis à jour en 2019). Cette baisse s'explique par plusieurs facteurs : les contraintes structurelles, les facteurs humains ou naturels, le prix du bois et la concurrence avec les terres agricoles en sont des exemples (BADEL et al., 2021). La situation est telle qu'un tiers des surfaces exploitées n'est pas reboisé aujourd'hui. Si l'on considère qu'un plant produit 1 m<sup>3</sup> en 18 ans, le rythme actuel de replantation ne permettra pas de couvrir la demande future des industries en peupliers. De plus, si l'on estime que la consommation de peuplier restera relativement stable dans les années à venir, certaines tendances comme l'augmentation significative de l'utilisation du contreplaqué ou l'utilisation du bois de peuplier en substitution de plastique (emballage), d'essences tropicales ou locales comme le pin. Cela laisse présager d'une augmentation des besoins (CODIFAB, 2016, mis à jour en 2019). Plus récemment, la guerre en Ukraine a totalement disloqué le marché du contreplaqué en Europe au moins et pour de nombreuses applications, le contreplaqué de peuplier peut convenir comme un bon substitut au contreplaqué de bouleau. Cette augmentation de la consommation combinée à une diminution nette de la ressource disponible a fait craindre en 2016 de fortes tensions de reconstitution au sein du secteur dans les années à venir. Ces tensions sont aujourd'hui confirmées

## 1.2. LES ESSENCES CIBLÉES

---

et la filière française du peuplier se mobilise pour augmenter le rythme de replantation. De plus, ce contexte n'est pas seulement critique en France puisque de grandes entreprises comme Garnica (Espagne) recherchent la ressource française. Une nouvelle usine importante (350 000 m<sup>3</sup>) vient d'être mise en service à Troyes (LE BOIS INTERNATIONAL, 2018).

À ce jour, l'agroforesterie est une alternative de plus en plus crédible pour contribuer à la pérennité, voire à l'augmentation de la ressource en bois de peuplier. Son utilisation dans les systèmes agroforestiers est une pratique relativement courante, sa croissance rapide le rendant favorable à une utilisation comme espèce brise-vent et assure une source de revenu supplémentaire pour l'exploitant rapidement mobilisable (environ 18 ans entre la plantation et la récolte, voire plus tôt pour les applications d'emballage léger). La diversité de ses cultivars permet une bonne adaptation de l'essence à la diversité des systèmes agroforestiers et cette espèce est particulièrement bien adaptée à l'association avec d'autres cultures en raison de son faible ombrage et de sa bonne compatibilité avec de nombreuses cultures intercalaires courantes telles que le blé ou le maïs (CHAHAL et al., 2012).

### 1.2.2 Le noyer hybride

Le noyer commun (*Juglans regia L*), originaire d'Eurasie et le noyer noir (*Juglans nigra L*), originaire d'Amérique du Nord, sont des espèces de noyer appartenant à la famille des Juglandacées capables de s'hybrider entre elles. En plus de fournir des fruits comestibles, les noix, les noyers produisent du bois de haute qualité. Si le noyer commun est cultivé à travers le monde pour la production de fruits et de bois d'œuvre, le noyer noir est utilisé pour son bois de qualité mais également comme porte greffe pour les variétés fruitières (LESLIE et MCGRANAHAN, 1998). Depuis plusieurs décennies, des espèces hybrides basées sur ces deux espèces (*Juglans x regia x nigra*) ont été créées afin d'améliorer le comportement des arbres avec une meilleure résistance vis-à-vis des pathogènes et des maladies, de réduire la sensibilité au phototropisme et enfin d'augmenter les résistances à la sécheresse et au gel printanier. Ils sont également plus vigoureux et la dominance de leur couronne leur confère une bonne aptitude pour la production de bois bien conformés (BERITOGNOLO, 2001). Les espèces de noyers hybrides préfèrent un climat bien arrosé, sans période de sécheresse, et un sol bien drainé (COELLO et al., 2008). La valeur commerciale des bois de noyer dépend de plusieurs facteurs. En ce qui concerne la qualité des troncs qui affectent le rendement de la transformation en bois utilisable, ce sont leur taille ainsi que la présence de défauts tels que les nœuds ou les fentes qui impactent leur valeur. Pour ce qui est des produits issus du noyer, tels que les sciages (avivés, planches, etc.) et les placages utilisés en ébénisterie par exemple, c'est essentiellement la couleur, le grain du bois et la présence de défauts qui interviennent dans leur valeur marchande (GIANNINI et MERCURIO, 1997). En fonction de l'utilisation finale, les préférences pour du bois clair ou du bois figuré varient. Par exemple, le bois clair, c'est-à-dire provenant de noyer jeune avec peu de bois de cœur, une couleur

## 1.2. LES ESSENCES CIBLÉES

---

claire et une veinure homogène, est particulièrement apprécié en Italie. En France et dans le nord de l'Europe en revanche, c'est le bois figuré, issus d'arbres âgés avec beaucoup de bois de cœur, une couleur foncée et des veinures contrastées, que l'on retrouve majoritairement sur les marchés. Toutefois, la production européenne de noyers ne suffit pas à couvrir la demande industrielle pour un bois d'œuvre de qualité. Pour combler cette sous-production, en plus d'importer du bois de noyers issus d'autres pays, la France favorise l'installation de nombreuses plantations (BECQUEY, 1997). Le noyer ne pousse habituellement pas en forêt mais plutôt dans des plantations de faibles densités. Grâce à leur débourrement tardif (DUFOUR et al., 2013), qui retarde la compétition pour la lumière avec les cultures arables voisines, leur héliophilie et leur couronne assez étroite, les noyers sont bien adaptés à une utilisation dans des modèles agroforestiers tempérés dont l'un des objectifs économiques est la production de bois d'œuvre de haute qualité.

### 1.2.3 Le robinier

Le robinier (*Robinia pseudoacacia*), fait partie de la famille des légumineuses originaires d'Amérique du Nord, introduite en Europe au début du XVIIème siècle. C'est une essence pionnière particulièrement cultivée en Europe Centrale, et notamment en Hongrie. En France, il recouvre environ 100 000 ha mais sa présence reste tout de même marginale ; on le retrouve en forêt généralement mélangé avec d'autres essences ou sur des terrains en friche. C'est un arbre à croissance rapide qui se régénère très facilement par semis, rejet de souche ou drageonnement (FOURBISSEUR et al., 2003 ; JOUREZ, 1998). Son développement nécessite des conditions de pleine lumière mais c'est un arbre à grande amplitude écologique qui ne tolère cependant pas l'engorgement récurrent du sol (ABGRALL, 2019). Les utilisations du robinier sont nombreuses. Du fait de sa capacité à fixer l'azote atmosphérique et à enrichir les sols, il est très largement utilisé pour le reboisement de talus. Son enracinement traçant permet de lutter contre l'érosion des sols. Ses nombreuses fleurs, qui produisent du nectar en abondance, lui confèrent des propriétés mellifères très appréciées. Ces mêmes fleurs lui apportent une esthétique ornementale exploitée dans les parcs et jardins. C'est un arbre dont le bois possède une très bonne durabilité naturelle (classe de durabilité fongique 1-2 et classe de durabilité termites : D, CERRE et al., 2017) et une bonne aptitude au déroulage. Les bois issus des premières éclaircies sont principalement utilisés dans la fabrication de piquets de clôtures, de tuteurs, et de manches d'outils par exemple, tandis que les bois issus d'arbres âgés sont utilisés dans la fabrication d'éléments de structures, de meubles extérieurs et de parquets (FOURBISSEUR et al., 2003). Appartenant aux Fabacées, c'est un des rares arbres à pouvoir fixer l'azote atmosphérique en milieu tempéré, permettant de produire une fertilisation naturelle du sol et de limiter l'utilisation d'intrants. Ajouté à cela, sa foliaison tardive en fait un bon candidat en agroforesterie. De plus, son développement nécessitant beaucoup de lumière est particulièrement bien adapté aux conditions d'ensoleillement apportées par les cultures intercalaires dans les systèmes agroforestiers (PATARIN, 2006). Toutefois, le robinier

### 1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LA STRUCTURE ET LA CROISSANCE DE L'ARBRE

possède une grande capacité à drageonner et du fait de sa grande amplitude écologique, il peut être responsable de problèmes d'invasion dans certains écosystèmes (PATARIN, 2006). Son développement, racinaire notamment, est donc particulièrement surveillé lorsqu'il est cultivé en milieu agricole. Pour finir, son adaptation à de nombreuses conditions environnementales permet d'envisager son intégration dans un vaste panel de systèmes agroforestiers, en particulier ceux où d'autres essences plus exigeantes ne sont pas adaptées.

## **1.3 Généralités sur la structure et la croissance de l'arbre**

Avant d'aborder la question des modifications engendrées par les pratiques agroforestières sur le bois et la croissance des arbres dans ces milieux particuliers, il convient de rappeler quelques notions de base concernant sa formation et son fonctionnement. Les arbres sont des plantes classées en deux sous-embranchements : les angiospermes, qui regroupent les essences feuillues, et les gymnospermes, couramment appelés résineux, dont la structure générale et le fonctionnement diffèrent de celles des feuillus. Les essences qui ont été présentées ci-dessous sont trois espèces d'angiospermes, c'est pourquoi cette synthèse bibliographique ne traitera pas du cas des gymnospermes.

### **1.3.1 Structure générale de l'arbre**

L'arbre est un organisme vivant dont la structure peut être divisée en deux parties. La première, souterraine, est composée de racines qui permettent d'une part l'absorption des minéraux et de l'eau qui seront distribués à l'ensemble de la structure sous forme de sève brute d'autre part qui assurent la fixation mécanique de l'arbre dans le sol. La seconde partie est aérienne, constituée du tronc et d'un ensemble composé des branches et du feuillage que l'on appelle le houppier. C'est dans cette partie que sont synthétisés les composants organiques nécessaires à la croissance de l'arbre et distribués sous forme de sève élaborée. Au cours de sa croissance, l'arbre produit du bois, matériau cellulaire complexe lui permettant d'assurer trois de ses principales fonctions vitales : le stockage des réserves nutritives et le système de protection et de défense face à des agressions extérieures, la conduction de la sève brute, et le soutien mécanique couplé au contrôle de la posture.

### **1.3.2 Croissance et formation du bois**

#### **1.3.2.1 Le phénomène de croissance**

Le développement des axes (tige et branches) de l'arbre en longueur et en diamètre ne résulte pas des mêmes processus et il existe deux types de croissance : une croissance primaire assurant la croissance en longueur des axes et une croissance secondaire responsable de la croissance en

### 1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LA STRUCTURE ET LA CROISSANCE DE L'ARBRE

---

diamètre. La croissance primaire est assurée par des méristèmes primaires situés aux extrémités des organes qui permettent l'allongement des branches et des racines. La croissance secondaire est quant à elle assurée par la présence d'un méristème secondaire, appelé cambium, et qui existe sous deux formes : le cambium vasculaire à travers les divisions et les multiplications cellulaires, conduit à la formation de l'aubier (ou xylème secondaire) vers l'intérieur du tronc qui conduit la sève brute, et du liber (ou phloème secondaire) vers l'extérieur conduisant la sève élaborée. Le second est le cambium cortical, ou phellogène qui forme le suber, connu également sous le nom de liège, vers l'extérieur et parfois du phelloderme vers l'intérieur, qui constitue un parenchyme de réserve (Figure 1.3).

#### 1.3.2.2 La formation du bois

La formation d'une cellule de xylème fonctionnelle débute toujours par la division d'une cellule cambiale en deux cellules filles. Ces cellules s'élargissent puis la paroi secondaire vient s'ajouter à la première par dépôt de cellulose et d'hémicelluloses. La paroi cellulaire s'imprègne ensuite de lignine qui, en limitant les échanges intercellulaires, entraîne la mort de la cellule (RATHGEBER et al., 2016).

Dans les régions tempérées, la croissance du cambium est périodique. Elle conduit à la formation de cernes annuels visibles en coupe transversale dans lesquels on distingue deux types de bois : le bois initial et le bois final. Le bois initial est celui qui se forme au printemps après la période de dormance en automne et en hiver. Le bois formé favorise la conductance de la sève nécessaire à la reprise de la croissance de l'arbre et à la formation des ses feuilles et de ses fruits. Le bois final est celui formé en été, lorsque que les besoins en eau diminuent et que la croissance ralentit alors qu'en même temps l'arbre a besoin de se renforcer mécaniquement. Les cellules du bois final ont pour rôle majeur le soutien mécanique de l'arbre. La largeur d'un cerne et la proportion de bois initial/bois final dépendent des conditions de croissance de l'arbre, notamment de sa vitesse de croissance, une année de croissance rapide conduisant à des cernes larges et inversement. La transition entre bois initial et bois final se fait progressivement au cours de la croissance des essences à bois homogène ou semi-poreux, elle est plus brutale chez les arbres à zone initiale poreuse. Cette variation de la structure est visible sur le plan ligneux des angiospermes présenté sur la figure 1.4.

Le bois formé dans les branches est similaire à celui du tronc, il se divise en plusieurs parties distinctes dont les proportions varient selon l'essence et les conditions de croissance de l'arbre. De l'intérieur vers l'extérieur, on distingue : la moelle, le duramen (ou bois de coeur), l'aubier, le cambium, le liber et l'écorce (ou suber)(Figure 1.3).

L'aubier est la partie en périphérie du tronc dans laquelle une partie des cellules créées par le cambium vasculaire sont encore vivantes. Il assure la conduction de la sève brute dans les

### 1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LA STRUCTURE ET LA CROISSANCE DE L'ARBRE

cernes les plus externes. Le bois formé est au départ dans un état très visqueux, il ne prend sa structure définitive qu'au bout de quelques semaines. Lors de ce processus, dit de maturation, la paroi de la cellule, alors mince et composée de cellulose peu cristalline, s'épaissit, se rigidifie et se lignifie. La fin de cette lignification entraîne la mort de la cellule et conduit ainsi progressivement à la formation du duramen dans lequel s'accumulent généralement des métabolites secondaires appelés extractibles. Le duramen se situe dans la partie interne du tronc, il correspond aux cernes les plus anciens et ne contient plus de cellules vivantes. Chez certaines essences, le duramen se colore, se distinguant alors de l'aubier par sa couleur plus foncée mais aussi par ses propriétés et sa durabilité. Toutefois, la limite entre aubier et duramen n'est pas toujours visible en fonction des essences, c'est souvent le cas des "bois clairs", ou "bois à aubier non différencié" comme le peuplier. Les propriétés de leur aubier diffèrent tout de même de celles de leur duramen mais leur durabilité naturelle reste faible. Chez d'autres essences, comme le noyer par exemple, la limite entre l'aubier et le duramen est très distincte grâce aux extractibles qui colorent le bois. Chez ces arbres, les propriétés entre aubier et duramen sont très différentes, le bois de duramen étant généralement plus intéressant d'un point de vue technologique du fait de sa meilleure durabilité.

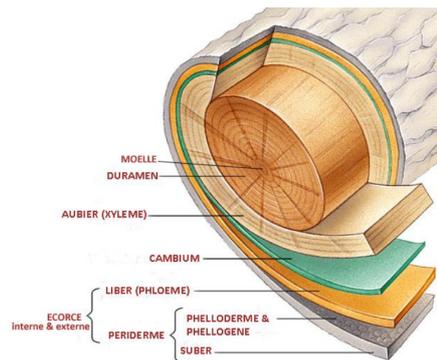


FIGURE 1.3 – Structure générale du tronc (Source GARRETT, 2007 )

#### 1.3.2.3 Le plan ligneux

Chez les angiospermes et notamment chez les feuillus, la structure anatomique est plus complexe que celle des gymnospermes en raison de la spécialisation des cellules. Chaque fonction est assurée par un type de cellules spécifiques ce qui implique une anatomie cellulaire particulière et adaptée à chacune. Cette spécialisation est à l'origine de la forte hétérogénéité du bois des feuillus que l'on qualifie d'hétéroxylé. La conduction de la sève est opérée par les éléments de vaisseau qui sont les cellules les plus larges du bois et le soutien mécanique est assuré par les fibres de plus faible diamètre mais dont la paroi cellulaire est plus épaisse. On retrouve également d'autres cellules, telles que les cellules de parenchyme qui servent de tissus de réserve (Figure 1.4).

### 1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LA STRUCTURE ET LA CROISSANCE DE L'ARBRE

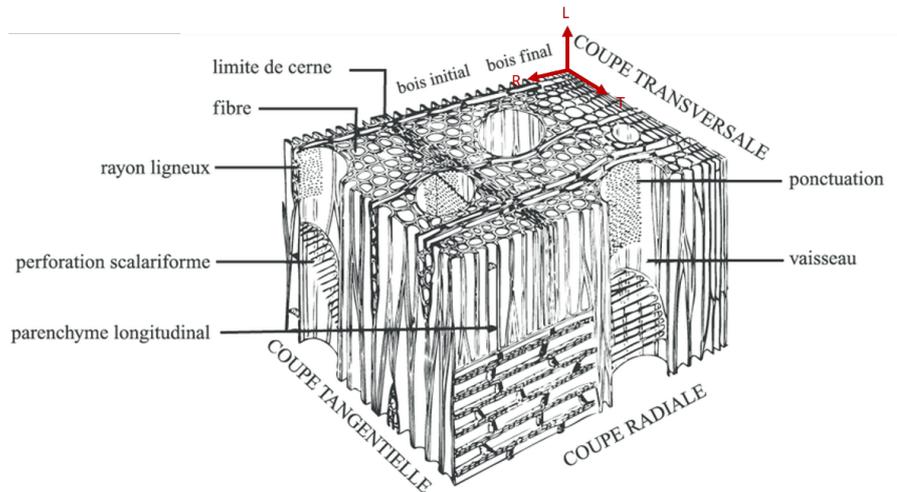


FIGURE 1.4 – Structure anatomique du bois des angiospermes (d’après de GROSSER, 1977)

La répartition des vaisseaux dans le cerne de croissance n’est pas aléatoire et varie d’une essence à l’autre. La base de données INSIDEWOOD classe ainsi les feuillus en trois catégories :

- Les bois à zone initiale poreuse : ils présentent de très gros vaisseaux en forte concentration en début de cerne (bois de printemps), puis le diamètre des vaisseaux diminue fortement dans le bois final (1.5a).
- Les bois à pores diffus : également appelés bois homogènes, dont les vaisseaux sont répartis de manière homogène à l’intérieur du cerne et présentent un diamètre relativement uniforme entre le bois de printemps et le bois d’été (1.5b).
- Les bois à zone semi-poreuse : le diamètre de leurs vaisseaux reste constant dans le cerne mais on distingue une plus forte concentration des vaisseaux dans le bois initial que dans le bois final. Les limites entre les groupes de feuillus n’est cependant pas stricte, certaines essences comme le peuplier, classé comme feuillu à pore diffus, présentent souvent une légère tendance semi-poreuse (1.5c).

### 1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LA STRUCTURE ET LA CROISSANCE DE L'ARBRE

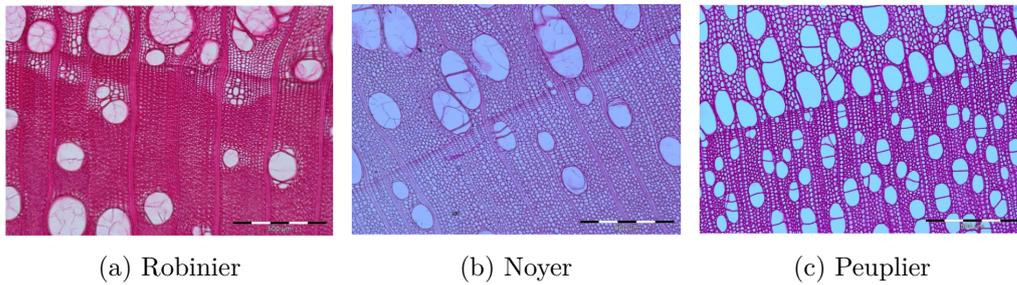


FIGURE 1.5 – Coupe anatomique du bois d'angiospermes. (a) Bois à zone initiale poreuse (Robinier, *Robinia pseudoacacia*); (b) Bois à zone semi-poreuse (Noyer, *Juglans sp*); (c) Bois pores diffus (Peuplier, *Populus sp*). TROUY, 2017

Le mode de croissance des axes fait du bois un matériau orienté, i.e. anisotrope, caractérisé par trois directions orthogonales de référence : la direction longitudinale L, la direction tangentielle T et la direction radiale R, qui forment alors trois plans de référence : le plan transversal (RT), le plan radial (LR) et le plan tangentiel (LT) (Figure 1.6). On qualifie alors le bois de matériau orthotrope.

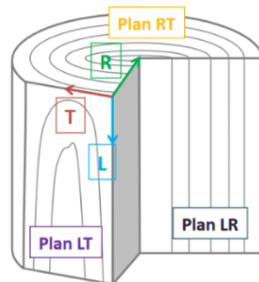


FIGURE 1.6 – Directions et plans de référence dans le bois (TROUY, 2015)

#### 1.3.3 Structure microscopique du bois

##### 1.3.3.1 La paroi cellulaire

Le bois est un matériau composé de cellules vides dans lesquelles ne subsistent que les parois cellulaires. Cette paroi cellulaire est un matériau composite multicouches, composée d'une lamelle moyenne (d'une épaisseur de 0.5 à 1.5  $\mu\text{m}$  environ), d'une paroi primaire (0.1  $\mu\text{m}$ ) et d'une paroi secondaire qui est déposée par la cellule lorsqu'elle a atteint ses dimensions finales et qui est composée de trois sous couches S1, S2 et S3 (Figure 1.7a). La paroi cellulaire est constituée de trois principaux polymères : la cellulose (40 à 50%), les hémicelluloses (20 à 25%) et la lignine (20 à 30%). Les proportions de ces polymères varient en fonction des couches de la paroi dans lesquelles on se situe et de la nature de l'essence concernée (NAVI et HEGER, 2005)(Figure 1.7b). La cellulose sous forme de microfibrilles constitue l'armature de la paroi cellulaire, les

### 1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LA STRUCTURE ET LA CROISSANCE DE L'ARBRE

hémicelluloses et la lignine forment quant à elles la matrice contenant cette armature cellulosique.

Dans la paroi primaire, les microfibrilles de cellulose forment un réseau lâche, permettant ainsi la croissance de la cellule. Dans les sous-couches de la paroi secondaire, les microfibrilles de cellulose sont enroulées en hélices régulières et orientées à un angle fixe par rapport à la direction longitudinale. Cet angle fixe joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique du bois (Figure 1.7a) :

- Dans la couche S1, directement au contact de la paroi primaire, les microfibrilles sont presque perpendiculaires à l'axe principal de la cellule, avec un changement du sens d'enroulement par rapport à cet axe. Leur angle est compris entre 60 et 80°.
- Dans la couche S2, les microfibrilles de cellulose sont presque alignées avec l'axe principal de la cellule. S2 étant la sous-couche la plus épaisse de la paroi secondaire, elle joue un rôle primordial dans les propriétés mécaniques et physiques du bois. L'angle de ces microfibrilles, appelé AMF, varie entre 0° et 30°. Une augmentation de l'AMF se traduit par une réduction des propriétés mécaniques longitudinales (et une augmentation dans les directions R et T) ainsi qu'une augmentation du retrait hydrique (ou du gonflement) dans la direction longitudinale (et une diminution dans les directions R et T).
- La couche S3 quant à elle, est souvent qualifiée de tertiaire et est similaire à S1, bien que plus mince.

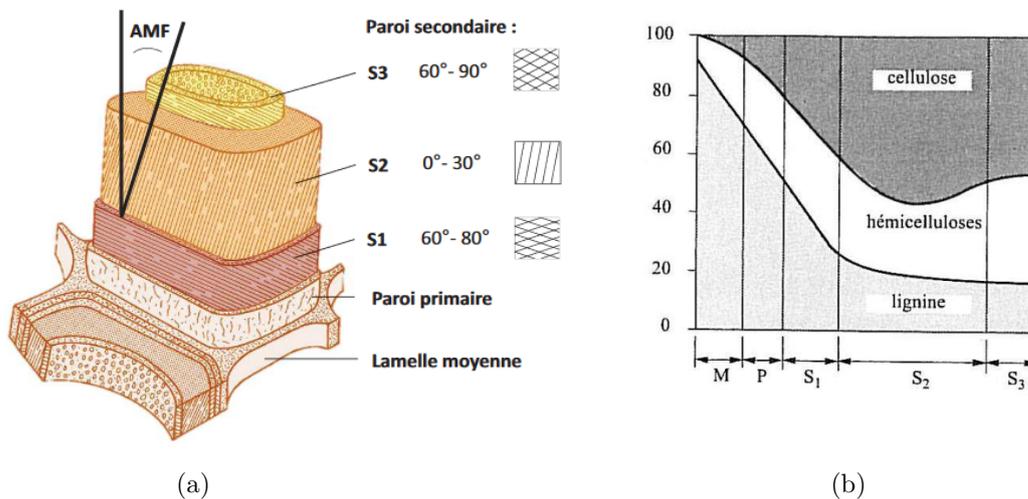


FIGURE 1.7 – (a) Couches constitutives de la paroi cellulaire et angles des microfibrilles de cellulose (BURGERS, 2016) et (b) distribution des principaux polymères de la paroi (M correspond à la lamelle moyenne, P à la paroi primaire et S1, S2 et S3 aux différentes couches de la paroi secondaire)(PANSWIN et ZEEUW, 1970).

### 1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LA STRUCTURE ET LA CROISSANCE DE L'ARBRE

Lors de la phase de maturation, les principales cellules constituant le bois sont vidées de leur contenu et ne subsistent alors que leurs parois cellulaires. De nombreuses propriétés physiques et mécaniques du bois sont étroitement liées aux caractéristiques de ces parois. Ainsi, des changements au niveau de la paroi comme c'est le cas dans le bois de réaction par exemple, peuvent entraîner d'importantes modifications des propriétés du bois.

#### 1.3.3.2 Les composants chimiques du bois

Les constituants chimiques du bois peuvent être répartis en deux catégories : les constituants structuraux macromoléculaires (la cellulose, les hémicelluloses et la lignine) et les constituants mineurs, de faible poids moléculaire, soit organiques (les extractibles, de 0 à 10%, cette proportion pouvant augmenter pour les essences tropicales) ou minéraux (les cendres, généralement moins de 1%)(TROUY, 2015).

##### 1.3.3.2.a La cellulose

La cellulose est un homopolymère linéaire de glucopyranose de configuration  $\beta^5$ , c'est à dire qu'elle se construit par répétition d'un seul monomère sans ramification (Figure 1.8). Les molécules de cellulose liées entre elles forment ce qu'on appelle des microfibrilles, de diamètre compris entre 10 et 20 nm et qui présentent des zones cristallines, ordonnées, et des zones amorphes dans lesquelles les macro-polymères de cellulose sont non linéaires et donc désordonnés, permettant ainsi des liaisons avec d'autres molécules telles que l'eau.

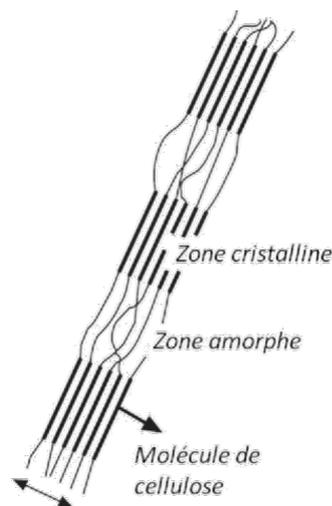


FIGURE 1.8 – Représentation schématique d'une microfibrille de cellulose (d'après Bailli 2004)

## 1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LA STRUCTURE ET LA CROISSANCE DE L'ARBRE

---

### 1.3.3.2.b Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des hétéropolymères ramifiés de différents sucres. Il en existe plusieurs types, (glucuronoxylanes, glucomannanes, arabinoglucuronoxylanes, galactoglucomannanes, arabinogalactanes), composés par plus de 200 polysaccharides. Dans la paroi, les hémicelluloses sont étroitement liées à la cellulose, assurant les liaisons chimiques entre l'armature de cellulose et la matrice constituée de lignine.

### 1.3.3.2.c La lignine

La lignine est un polymère tridimensionnel de nature phénolique principalement localisés dans les couches externes de la cellule, notamment au niveau de la lamelle moyenne, sa teneur diminuant à mesure que l'on se rapproche de la face interne de la paroi (NAVI et HEGER, 2005). Elle se dépose en dernier lors de la formation de la cellule, constituant avec les hémicelluloses la matrice de la paroi cellulaire tandis que la cellulose en constitue l'armature. Cette lignification conduit à la mort programmée de la cellule. La paroi primaire est davantage lignifiée que la paroi secondaire en raison de la disposition plus irrégulière des microfibrilles de cellulose qui laisse plus de vides dans lesquels la lignine peut venir se déposer. Son rôle dans l'arbre est par ailleurs essentiel : rigide et hydrophobe, elle améliore les performances hydrauliques des cellules conductrices et assure le soutien mécanique de l'arbre en augmentant la résistance mécanique des cellules du xylème.

### 1.3.3.2.d Les extractibles

Les extractibles sont des molécules de faible poids moléculaire qui ne sont pas liées à la paroi cellulaire mais que l'on retrouve dans la structure poreuse du bois et qui se déposent généralement lors du processus de duraminisation. Hydrophiles ou lipophiles, ils sont facilement extrayables grâce à leur solubilité dans l'eau et/ou dans différents solvants organiques en fonction de leur nature. La teneur et la composition en extractibles dans un arbre varient en fonction de nombreux facteurs tels que l'essence, l'âge, la partie de l'arbre (tronc, branches, nœuds...), le site géographique et la saison (HAUPT et al., 2003 ; TOSHIKI, 2001). En fonction de l'essence, ils peuvent représenter jusqu'à 10% de la masse sèche du bois et dans les régions tempérées, les bois de résineux contiennent généralement davantage de composés extractibles que les feuillus (FENGEL et WEGENER, 1983).

Ils peuvent être regroupés en trois grandes familles (HILLIS, 1971) : les terpènes et terpénoïdes, les composés phénoliques et les cires et les graisses. Parmi les composés phénoliques on retrouve notamment les lignanes, les tanins condensés ou hydrolysables et les flavanoïdes. Les graisses et les cires regroupent quant à elles les acides gras (saturés et insaturés), les alcools gras et les alcanes. Le rôle des extractibles dans l'arbre est essentiel puisqu'ils confèrent au bois

## 1.4. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS

---

de nombreuses propriétés telles que sa couleur, son odeur, son hygroscopie, son hydrophobie, sa durabilité et sa résistance aux agents de dégradation biologique (AMUSANT et al., 2007 ; T. P. SCHULTZ et NICHOLAS, 2000 ; T. SCHULTZ et al., 1995). Ils participent également à l'acoustique du bois pour la confection d'instruments de musique, interviennent dans certains procédés de transformation (collage, finition et mise en pâte)(ALLOUI et al., 2004 ; GIERLINGER et al., 2004) et présentent un intérêt particulier dans de nombreuses firmes industrielles telles que les industries pharmaceutique, cosmétique et agroalimentaire.

### 1.4 Le comportement mécanique du bois

Pour se développer, l'arbre doit être en capacité d'assurer l'une de ses principales fonctions : le soutien mécanique. Ce soutien est à la fois passif lui permettant de supporter son propre poids, et actif afin de moduler et maintenir sa posture, y compris face aux vents. Ce soutien est rendu possible grâce à la mise en place de la structure cellulaire complexe de son bois. Cette structure s'apparente à celle d'un matériau composite multicouches et son hétérogénéité est en grande partie expliquée par les variations structurelles au sein d'un cerne, en particulier entre le bois initial et le bois final. Chez les angiospermes cette hétérogénéité est accentuée par les différentes stratégies mises en place par les différentes essences dans la répartition des vaisseaux situés dans la zone d'accroissement annuel (cf partie 1.3.2.3). À l'échelle de la paroi, la succession de couches déposées lors de la maturation de la cellule participe également à l'hétérogénéité structurelle du bois. Nous l'avons vu précédemment, l'organisation structurelle de ces couches pariétales est très différente de l'une à l'autre, notamment en raison de l'organisation des microfibrilles de cellulose dont l'angle par rapport à l'axe longitudinal de l'arbre joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique du bois.

## 1.4. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS

Deux propriétés mécaniques majeures sont généralement étudiées : le module d'élasticité (ou module d'Young, MOE) et la contrainte de rupture (MOR). Ces deux caractéristiques sont fortement corrélées à une troisième : la masse volumique. Le module d'élasticité relie la contrainte mécanique  $\sigma$  (en traction ou en compression) et la déformation  $\varepsilon$  d'un matériau élastique. Lors d'un essai de traction, le module d'élasticité correspond au facteur de proportionnalité entre la contrainte et la déformation dans la zone élastique (Figure 1.9). Il décrit la rigidité intrinsèque du matériau. Pour une même contrainte, un matériau plus rigide montrera des déformations d'élongation plus faibles. Le module de rupture décrit quand à lui la résistance du matériau. De nombreux travaux rapportent que pour un échantillon de bois sans défaut, le MOE, le MOR et la masse volumique sont étroitement liés ( $R^2 = 0.77$ , JODIN, 1994).

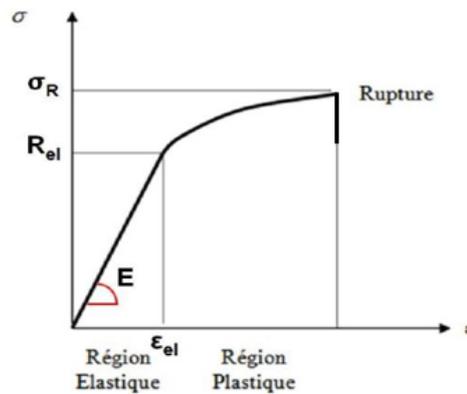


FIGURE 1.9 – Courbe de contrainte-déformation.  $\sigma$  correspond à la contrainte appliquée et  $\varepsilon$  à la déformation. E représente le module d'élasticité du matériau.  $\sigma_R$  est sa contrainte de rupture,  $\sigma_{el}$  la contrainte élastique du matériau et  $\varepsilon_{el}$  sa déformation élastique.

Le comportement du matériau bois se situe dans deux domaines : le domaine élastique et le domaine plastique. Dans le premier, le bois, soumis à une faible contrainte, se déforme et reprend sa forme initiale lorsque cette contrainte lui est retirée. Dans ce domaine, la déformation subie par le bois est réversible et proportionnelle à la contrainte appliquée (MAYA, 2014 ; TIMOSHENKO et GOODIER, 1934). Sur la figure 1.9, le module élastique correspond à la pente située avant la limite élastique du matériau, déterminée par sa contrainte élastique  $\sigma_{el}$  et sa déformation élastique  $\varepsilon_{el}$ . La zone située après la limite élastique correspond à la région plastique du matériau qui aboutit à sa rupture (GIET et GEMINARD, 1997 ; GUITARD et FOURNIER, 1994). Cette zone plastique apparaît lorsque le matériau est soumis à une contrainte plus élevée, ce qui entraîne des déformations irréversibles et l'apparition de dégradations. Dans la région plastique, le comportement du bois n'est pas le même si on le sollicite en traction ou en compression. Dans le premier cas on parle de comportement fragile, et dans le second, de comportement ductile.

## 1.4. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS

---

Les notions abordées ci-dessus décrivent succinctement le comportement mécanique du bois. Ce dernier, nous l'avons vu précédemment, est un matériau hétérogène et anisotrope. Sa grande variabilité au sein de l'arbre, ainsi que de nombreux autres facteurs, environnementaux par exemple, impactent son comportement mécanique. Ces différents paramètres sont détaillés dans la partie suivante.

### 1.4.1 Paramètres influençant le comportement mécanique du bois

#### 1.4.1.1 L'humidité

En plus de son caractère anisotrope, le bois est également un matériau hygroscopique, c'est-à-dire capable d'absorber ou de désorber l'eau présente dans son environnement. Sa teneur en eau dépend de l'humidité relative et de la température de l'air. L'eau présente dans le bois est de trois natures différentes : la vapeur d'eau, l'eau libre et l'eau liée (hygroscopique). Leur présence dans le bois dépend du taux d'humidité dans l'arbre. Lorsque le bois atteint un taux d'humidité inférieur à environ 25 à 30%, on considère que l'eau libre contenue dans les vides cellulaires a été éliminée. On dit que le taux d'humidité du bois atteint le point de saturation des fibres (PSF). Seules les parois cellulaires du bois sont alors encore saturées d'eau. Lorsque le taux d'humidité diminue en dessous du PSF, c'est l'eau liée qui s'évapore des parois cellulaires, jusqu'à ce que le bois atteigne l'état anhydre. Au dessus du PSF, les variations de taux d'humidité du bois n'impactent pas les propriétés physiques et mécaniques du bois vert en quasi-statique. En revanche, en dessous du PSF, une variation de teneur en eau impacte fortement le comportement mécanique comme le module élastique et la limite à la rupture. Les propriétés mécaniques du bois sont en effet négativement corrélées à sa teneur en eau en dessous du point de saturation des fibres (GERHARDS, 1982). L'augmentation de la teneur en eau entraîne une diminution du module d'élasticité du bois (M. DINWOODIE, 2011).

#### 1.4.1.2 La masse volumique

La masse volumique correspond au rapport entre la masse de la matière ligneuse et le volume qui la contient. Elle influence fortement les propriétés mécaniques du bois et varie selon plusieurs facteurs.

- Au sein d'une même essence, la masse volumique peut varier d'un individu à l'autre. Elle est fortement influencée par les conditions de croissance telles que les conditions climatiques, les propriétés du sol et le traitement sylvicole.
- La masse volumique varie également au sein d'un même arbre. Des différences sont notamment observées entre les différents compartiments de l'arbre. Le bois des noeuds par exemple, est souvent plus dense que le bois "sans défaut". On constate également une diminution de la masse volumique de la base de l'arbre vers le houppier, mais également

## 1.4. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS

---

une variation radiale de la moelle jusqu'à l'écorce, liée notamment au ratio entre bois juvénile et bois mature. (KIMBERLEY et al., 2017).

- Enfin, à l'échelle des cernes d'accroissement, on observe que la masse volumique du bois de printemps est généralement plus faible que celle du bois d'été.

La densité est considérée comme l'un des principaux facteurs influençant les propriétés mécaniques du bois (CLAIR et THIBAUT, 2014). Guitard a notamment démontré en 1987 la corrélation positive entre la masse volumique et la rigidité du bois, ceci s'expliquant simplement par une loi de mélange liée à la porosité du milieu qui traduit la quantité de parois cellulaires par rapport aux vides cellulaires (GUITARD, 1987).

### 1.4.1.3 L'angle des microfibrilles

Les microfibrilles de celluloses cristallines placées dans la matrice amorphe formée par les hémicelluloses et la lignine s'enroulent le long de la paroi cellulaire. L'angle que forme ces microfibrilles par rapport à l'axe longitudinal du tronc est appelé "angle des microfibrilles", ou AMF, et concerne principalement les microfibrilles de la couche S2 de la paroi cellulaire. Leur rigidité longitudinale est plus élevée que celle de la matrice amorphe et conditionne ainsi la rigidité de la paroi et donc du bois (BARNETT et BONHAM, 2004; P. XU et LIU, 2004). Avec la densité, l'AMF est considéré comme l'un des éléments structuraux majeurs influençant le module d'élasticité et le module de rupture du bois sans défaut (EVANS et ILIC, 2001; P. XU et LIU, 2004; YANG et EVANS, 2003). Cet angle, nous l'avons vu précédemment, est généralement compris en 0° et 30° (Figure 1.7a) mais sa valeur peut varier dans le bois de réaction ou dans le bois juvénile par exemple. Bien que la densité et l'AMF soient indépendants (EVANS et ILIC, 2001; FOURNIER et al., 2013), une diminution de l'AMF associée à une augmentation de la densité conduit à la formation d'un bois plus rigide et plus résistant.

### 1.4.1.4 La pente de fil

Lors de la croissance de l'arbre, les cellules cambiales qui se divisent mènent à la formation de deux cellules filles, qui, en fonction de l'inclinaison de la paroi qui les sépare, vont être très légèrement inclinées par rapport à l'axe principal de la tige. Un équilibre entre les cellules inclinées dans les deux directions s'opère, permettant ainsi de maintenir la verticalité des fibres du bois dans le tronc. On considère que les propriétés mécaniques du bois sont maximales dans l'axe d'orthotropie du bois et que toute déviation de la pente de fil entraîne une diminution de ces propriétés. Une déviation de la pente de fil de 15° seulement par rapport à l'axe du tronc par exemple engendre une diminution de moitié du module élastique (HANKINSON, 1921). Il existe différentes anomalies d'orientation du fil, c'est le cas du fil tors, du contre-fil ou du fil ondulé. Si certaines de ces anomalies sont appréciées et ajoutent une valeur esthétique au bois (le bois

## 1.4. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS

---

ondé de l'érable sycomore en lutherie à titre d'exemple), la présence de fil tors ou de contre fil peut entraîner des déformations prononcées et des contraintes mécaniques et physiques dans le matériau (LABORATORY et UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE, 2010) qui conduisent à l'exclusion de l'arbre pour de nombreuses utilisations technologiques. Dans l'arbre, cette pente de fil est naturellement déviée au niveau des noeuds. Cette perturbation résulte de la croissance simultanée du bois du tronc et de celui de la branche à partir de leur moelle qui entraînent une déviation des fibres autour du noeud.

Ainsi, les propriétés mécaniques du bois sont étroitement liées aux variations des paramètres anatomiques et structuraux que nous venons de citer. À l'échelle plus macroscopique de l'arbre, le comportement mécanique est également tributaire d'autres facteurs tels que la présence de bois aux propriétés différentes du "bois normal", comme le bois juvénile, présent naturellement dans l'arbre mais également du bois de réaction ou du bois de flexion dont la formation résulte des différents processus d'acclimatation de l'arbre à son environnement fluctuant. Ces différents bois et leurs impacts sur les propriétés mécaniques de l'arbre dans son intégrité sont abordés ci-dessous.

### 1.4.1.5 Le bois juvénile et le bois mature

Les différents paramètres structuraux et anatomiques présentés ci-dessus ont mis en évidence l'influence qu'ils ont sur les propriétés mécaniques du bois. En plus de la distinction entre l'aubier et le duramen, deux autres types de bois se distinguent dans l'arbre : le bois juvénile et le bois mature. Le bois juvénile est formé par un cambium juvénile à l'échelle de l'Unité de Croissance, à proximité de la moelle. À mesure que le cambium vieillit, sa structure évolue et les nouvelles couches de cellules forment petit à petit le bois mature. Cette transition entre le bois juvénile et le bois mature dans l'arbre n'est pas soudaine. Elle se fait progressivement et conduit à la présence dans le tronc d'une zone de transition entre le bois juvénile et le bois mature. Les propriétés mécaniques du bois juvénile en flexion sont plus faibles que celles du bois mature : son module d'élasticité et son module de rupture sont inférieurs à ceux du bois mature. Le bois formé est ainsi plus flexible et apporte une plus grande souplesse au jeune arbre et aux jeunes branches pour subir les sollicitations mécaniques dues au vent. Cette plus grande flexibilité est notamment due à la structure du bois juvénile qui diffère de celle du bois mature. Les cellules du cambium juvénile sont plus courtes que celles du cambium mature, ce qui conduit à la formation de cellules de bois juvénile plus courtes. De plus, en comparaison au bois mature, l'AMF de la couche S2 est plus élevé, provoquant un retrait et un gonflement plus forts dans la direction longitudinale et plus faibles dans les directions radiale et tangentielle. Le bois juvénile est généralement composé de plus de lignine que le bois mature, et de moins de cellulose (LU et al., 2021 ; MORAIS et al., 2017), les différences sont plus marquées chez les résineux que chez les feuillus (BAO et al., 2001). Ce n'est pas toujours le cas, notamment chez le peuplier, mais les

## 1.4. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS

---

tendances divergent selon les études (BAO et al., 2001).

Chez les feuillus homogènes à pores diffus, la densité du bois juvénile est plus faible que celle du bois mature, mais chez les feuillus à zone initiale poreuse, cette densité peut être plus élevée en raison de la largeur de cerne plus importante et du diamètre et du nombre de vaisseaux plus faible.

D'un point de vue technologique, et notamment chez le peuplier, la présence de bois juvénile altère les propriétés mécaniques des placages et des produits techniques bois dérivés. L'augmentation du retrait longitudinal accentue les déformations des placages après leur séchage (NEPVEU, 1994). La présence de bois juvénile dans les panneaux de Lamibois (LVL) est également responsable d'une diminution de leurs propriétés mécaniques (GABORIK et KACEROVA, 2007 ; GIRARDON et al., 2016). L'âge auquel s'opère la transition juvénile du bois en bois mature n'est pas fixe et varie en fonction de nombreux facteurs. Le peuplier par exemple, est une essence à croissance rapide qui développe généralement une grande proportion de bois juvénile car il est récolté très jeune comparativement aux autres feuillus. L'âge de transition juvénile de son bois dépend des cultivars, des conditions de croissance, en particulier le site (PESZLEN, 1994) et les traitements sylvicoles appliqués. Huang et al. ont notamment mis en évidence le lien entre la disponibilité en eau et la précocité de cette transition chez deux cultivars de peupliers (HUANG et al., 2005).

### 1.4.1.6 Le bois de réaction

L'arbre se développe dans un environnement fluctuant et de nombreux facteurs, tels que la lumière ou la gravité, peuvent moduler l'orientation de ses axes dans l'espace. La lumière est une ressource essentielle à la photosynthèse, processus bioénergétique par lequel les végétaux transforment l'énergie lumineuse en énergie chimique. L'arbre est capable d'une part de percevoir les variations de la qualité de cette lumière mais également de relever des différences d'ensoleillement entre les faces de sa tige et de s'orienter vers la face la plus éclairée. Les phénomènes qui en résultent sont respectivement le phénomène de photomorphogénèse et le phénomène de phototropisme. La gravité intervient également dans le développement morphologique de l'arbre qui parvient à détecter les variations et les stimuli gravitationnels et adapte l'orientation de ses branches et de son tronc. On parle alors de gravitropisme.

Ainsi, afin de maintenir la verticalité de son tronc et de maximiser son ensoleillement, l'arbre met en place un bois dont les caractéristiques anatomiques divergent du "bois normal", appelé "bois de réaction", et dont les contraintes internes lui permettent de modifier son orientation. Chez les angiospermes, ce bois de réaction est appelé "bois de tension".

Pour une tige inclinée qui tend à recouvrir sa verticalité, le bois de tension se forme sur la face supérieure de la tige et des branches, au niveau de la zone de fibres sollicitées en traction

## 1.4. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS

(Figure. 1.10a). D'un point de vue biomécanique, ses fibres se contractent davantage que les fibres du bois opposé lors de leur maturation. Ce différentiel de tension entre les deux faces engendre donc une courbure qui permet ainsi à l'arbre de se redresser. Les fibres du bois de tension, plus nombreuses, sont également plus longues que celles du bois "normal" mais elles possèdent un plus petit diamètre (DÉJARDIN et al., 2010). Le bois de tension se caractérise également par une faible lignification de la paroi cellulaire et la couche S2, plus fine, est souvent associée à une couche supplémentaire gélatineuse appelée couche G (KELLER, 1994)(Figure 1.10b). La cristallinité de la cellulose dans les fibres gélatineuses est plus importante que dans le bois normal et c'est la couche G, composée de cellulose cristalline associée à des polysaccharides particuliers, qui permettrait à la paroi cellulaire de se contracter davantage. L'angle des microfibrilles dans cette couche particulière est très faible (environ 5°). Il est à noter que toutes les essences feuillues ne possèdent pas de couche G. Dans ce cas leurs fibres se déforment lors de leur maturation.

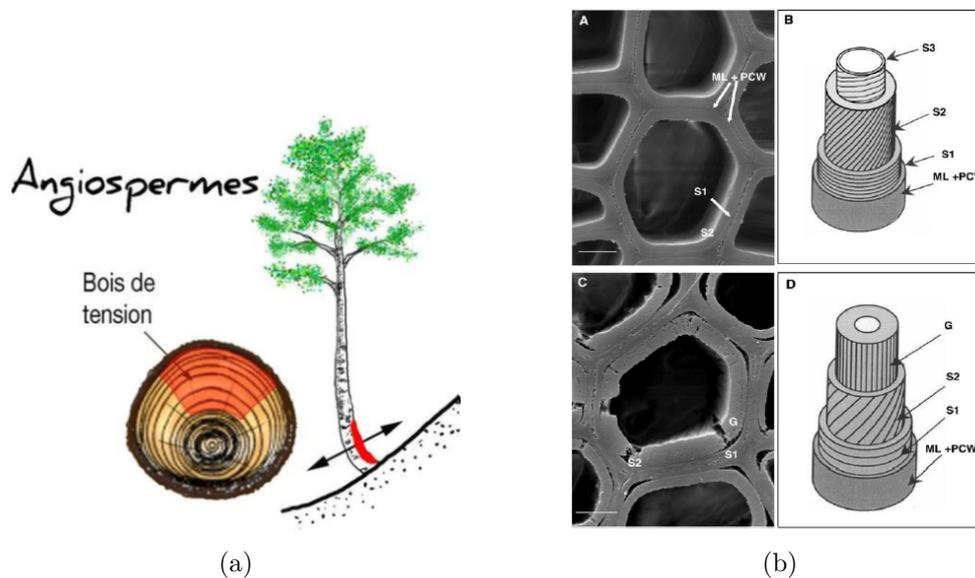


FIGURE 1.10 – (a) Bois de tension (modifié par NIEZ, 2018, d'après de ANSELME, 2012) et (b) Parois cellulaires de fibres de bois "normal" (A) et de bois de tension (C) de peuplier observées par microscopie électronique à balayage, et schémas d'interprétation correspondants (B et D respectivement). ML : lamelle moyenne ; PCW : paroi cellulaire primaire ; S1, S2, S3 : couches de la paroi cellulaire secondaire ; G : couche gélatineuse dans les fibres de bois de tension. La barre d'échelle correspond à  $5\mu\text{m}$ . DÉJARDIN et al., 2010

### 1.4.1.7 Le phénomène de thigmomorphogénèse

Les arbres sont soumis à diverses sollicitations mécaniques externes. Certaines peuvent être dynamiques, c'est le cas du vent ; tandis que d'autres sont dites statiques, comme la présence d'un obstacle ou la gravité terrestre. Pour répondre à ces stimuli mécaniques, les plantes s'acclimatent et modifient leurs structures. L'ensemble des ajustements de développements induits par ces sollicitations ont été regroupés sous le nom de thigmomorphogénèse (JAFFE, 1973). Ce processus

#### 1.4. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS

---

d'acclimatation conduit à la modification du développement de l'arbre avec notamment des changements au niveau des croissances primaire et secondaire.

Les études menées sur le sujet ont montré que les arbres soumis à des flexions répétées réduisaient la croissance en longueur de leurs axes, que se soit au niveau de leur tronc (COUTAND, 2010 ; COUTAND et al., 2008 ; MENG, LIEFFERS et al., 2006 ; MOREL et al., 2012), mais également au niveau de leurs branches (MENG, RUDNICKI et al., 2006 ; MOREL et al., 2012). Une réduction de la surface foliaire a également été observée par certains auteurs (ANTEN et al., 2010 ; TELEWSKI et PRUYN, 1998) mais pas par d'autres (NIEZ et al., 2020). La réduction de la croissance primaire était accompagnée d'une augmentation de la croissance secondaire (COUTAND, 2010 ; COUTAND et al., 2009 ; JACOBS, 1954 ; NIEZ et al., 2018) avec notamment une croissance secondaire plus importante dans l'axe des sollicitations mécaniques subies (JAFFE et al., 1984 ; KERN et al., 2005 ; TELEWSKI et PRUYN, 1998), conduisant à une ovalisation de la tige dans la direction de cette sollicitation (ROIGNANT et al., 2018 ; TELEWSKI, 1989). L'augmentation de la croissance secondaire des arbres en réponse à un stress mécanique répété s'accompagne des modifications anatomiques du bois formé lors de la croissance radiale. Ce bois particulier ainsi formé a été nommé "bois de flexion" ("flexure wood" en anglais) par Telewski (TELEWSKI, 1989). Roignant et al (2018) ont notamment démontré l'existence de deux types de bois de flexion, le "Tensile Flexure Wood" (TFW) formé sous contrainte de traction, et le "Compressive Flexure Wood" (CFW) qui correspond au bois sollicité en compression. Ces sollicitations contrôlées menées sur un peuplier hybride (*P.tremula x P.alba*, clone INRA 717-1B4) ont démontré une augmentation du nombre de vaisseaux dans le bois de tension (TFW et CFW) de 19% par rapport au bois "normal". Le TFW présente en particulier un AMF plus faible que dans le bois "normal" témoin (28°) et le CFW (27°), un diamètre de ses vaisseaux réduit de 8.2% en comparaison au bois "normal" ainsi que la présence de fibres avec une couche G (18%, contre 2% dans le bois "normal")(ROIGNANT et al., 2018).

De ces modifications de la croissance radiale et de la structure anatomique résultent des modifications des propriétés mécaniques du bois de flexion. En particulier, certaines études indiquent que la résistance longitudinale (MOR) du bois de flexion d'*Abies fraseri* et de certains peupliers hybrides fortement exposés au vent est inférieure à celle de leur bois normal. De même, Kern *et al* a observé une résistance plus faible (MOR) dans le bois de flexion (KERN et al., 2005). Cependant, Niez *et al* en 2018 ont démontré que les jeunes peupliers soumis à la flexion dans des conditions contrôlées avaient un bois de flexion avec un MOR plus élevé que leur bois "normal" (NIEZ et al., 2020).

### 1.5 Conclusion de la synthèse bibliographique

Cette synthèse bibliographique a permis de se familiariser avec les pratiques agroforestières et leur fonctionnement. Elle a mis en lumière les bénéfices économiques et environnementaux fournis par ces pratiques, et souligné le peu d'études réalisées à ce jour sur l'arbre agroforestier et le bois qu'il produit, en tant que matériau valorisable à la même échelle que les cultures et/ou le bétail auxquels il est associé. Les trois essences étudiées au cours de la thèse, le peuplier, le noyer hybride et le robinier ont été présentées ainsi que leurs intérêts potentiels respectifs pour l'agroforesterie mais aussi leur valorisation au sein de la filière bois. Dans les systèmes agroforestiers, l'arbre évolue dans des conditions spatiales très éloignées de celles des systèmes forestiers, dans lesquelles sont majoritairement conduites les études portant sur le développement de l'arbre et de son bois. Les densités de plantation sont beaucoup plus faibles que dans les plantations conventionnelles, ce qui a pour conséquence de modifier leur microenvironnement, en particulier leur exposition au vent et l'accès à la lumière. Les traitements sylvicoles et l'entretien sont aussi spécifiques à l'agroforesterie. Ainsi, l'arbre agroforestier ne se développe pas de la même manière que les arbres forestiers, bien connus des différentes filières et du monde de la recherche. Il est donc très probable que la qualité du bois au sens large diffère selon le type de système sylvicole. Les différentes notions abordées dans la dernière partie de ce chapitre concernent la structure générale du bois et le développement de l'arbre. De nombreuses propriétés physiques, chimiques et structurelles interviennent dans le comportement général de l'arbre, et en particulier son comportement mécanique, élément essentiel à l'acclimatation de l'arbre agroforestier à son environnement venteux. Ces propriétés, telles que la densité du bois, l'angle des microfibrilles de cellulose ou la pente de fil, varient en fonction de nombreux facteurs et en particulier avec les conditions de croissance du milieu, conduisant à la formation de bois anatomiquement et aux comportements mécaniques différents du bois "normal". Ainsi, la formation du bois juvénile, du bois de tension ou encore du bois de flexion résultant du processus de thigmomorphogénèse, est un paramètre conditionnant le comportement mécanique de l'arbre et influençant la qualité du bois et donc ses usages finaux.

Si l'objectif est d'intégrer l'arbre agroforestier à la filière bois et de construire un système économique solide autour de sa valorisation, comprendre l'influence des conditions de croissance sur son développement et leur impact sur la formation de son bois est essentiel. Ainsi, l'objectif de ce travail sera d'identifier les différences de propriétés chimiques, mécaniques et physiques entre les arbres agroforestiers et les arbres forestiers en s'appuyant sur des dispositifs expérimentaux jumeaux. Le choix des essences retenues vise donc à balayer un spectre assez large mais non exhaustif de propriétés du bois des angiospermes et de permettre de mesurer l'effet de la croissance en milieu agroforestier sur les propriétés physico-chimiques du bois. En particulier, pour les aspects physiologiques, les paramètres clefs qui peuvent avoir de fortes conséquences sur

## 1.5. CONCLUSION DE LA SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

---

l'usage du bois ciblé sont : les paramètres de croissance primaire et secondaire, la composition chimique de la paroi cellulaire, l'angle des microfibrilles, la densité et le taux d'humidité du bois. Enfin, en complément et pour identifier le lien potentiel entre ces paramètres et les propriétés d'usage des produits issus de bois agroforestier, des produits techniques seront caractérisés.

## Chapitre 2

# Dispositifs étudiés au cours de la thèse

### 2.1 État des lieux des dispositifs expérimentaux agroforestiers en France

Afin de répondre aux problématiques soulevées précédemment en introduction, il convenait de débiter ce travail par l'identification de dispositifs expérimentaux permettant le comparatif d'arbres ayant poussé dans des conditions agroforestières et d'arbres de la même essence ayant poussé dans des conditions plus conventionnelles en terme de densités de peuplement. Cela implique que les individus de chaque modalité se soient développés dans des parcelles équivalentes en terme de sol et de climat. Ainsi, pour une même essence, les parcelles agroforestière (AF) et forestière témoin (FC) devaient notamment présenter des caractéristiques environnementales les plus proches possibles d'un point de vue pédologique et climatique.

Un rapide état des lieux de tels dispositifs présents sur notre territoire a donc été nécessaire et nous commencerons ainsi par décrire brièvement l'évolution de la place de l'agroforesterie dans la recherche française.

Cette dernière s'est tardivement intéressée aux thématiques agroforestières. Si quelques études étaient menées sur le bocage (Rennes) et sur le sylvopastoralisme (Avignon) auparavant, c'est à partir de 1990 que l'INRAE a réellement commencé à développer des dispositifs permettant d'analyser l'influence de la présence d'arbres dans les parcelles agricoles. Ces analyses d'abord centrées sur le sylvopastoralisme puis sur les pratiques agrosylvicoles ont conduit à la création en 1995 des dispositifs expérimentaux de Restinclières dans l'Hérault et de Vézenobres dans le Gard. Quelques études sont ensuite menées dans les années 2000 par le CEMAGREF à Clermont-Ferrand et permettent d'introduire la problématique de la production de bois d'oeuvre

## 2.2. DESCRIPTIF DES DISPOSITIFS CIBLÉS

---

dans les systèmes d'alignement intraparcellaires ; mais la recherche en agroforesterie reste à cette époque encore très marginale. Il faudra attendre 2010 et la création du "chantier Agroécologie" (SOUSSANA, 2012) pour que l'agroforesterie soit à nouveau abordée dans les questions de recherche et depuis de nombreux dispositifs expérimentaux se sont développés en France (CAQUET et al., 2020). Toutefois, les études menées sur le sujet sont principalement concentrées sur les bénéfices apportés par les arbres sur les composantes agricoles (bétails ou cultures) et dans le cas où l'arbre en tant que tel est au cœur des problématiques, les recherches concernent davantage les aspects quantitatifs (la productivité de l'arbre exprimée en volume de biomasse produite) que les modifications de son développement induites par les conditions particulières de croissance de ces systèmes. De ce fait, les dispositifs permettant de comparer les propriétés et la qualité des bois agroforestiers à celles des bois issus de forêts conventionnelles sont rares, la majorité des dispositifs agroforestiers ne disposant que de témoins agricoles et non pas forestiers.

La suite de ce chapitre présente les trois systèmes qui ont été retenus pour notre travail et notamment les raisons qui ont justifié ces choix. Nous y décrirons chacun des dispositifs et les parcelles qui y seront étudiées. Nous listerons ensuite les forces et les faiblesses de ces dispositifs qui ont conditionné les expérimentations menées au cours de la thèse. Enfin, nous résumerons également l'échantillonnage réalisé sur chaque parcelle ainsi que les expérimentations qui en découlent et qui permettront de répondre aux objectifs fixés.

## 2.2 Descriptif des dispositifs ciblés

### 2.2.1 Le dispositif expérimental de Restinclières - Noyers hybrides

Situé dans le sud de la France à proximité de Montpellier, le Domaine départemental de Restinclières a été créé en 1990 et s'étend sur 250 hectares (longitude 04°01' E, latitude 43°43' N, altitude 54 m a.s.l.)(CARDINAEL et al., 2017). En 1995, l'UMR System (INRAE) y a créé un dispositif expérimental en agroforesterie tempérée (the Restinclières Agroforestry Platform, RAP) comprenant 50 ha de parcelles composées de parcelles agroforestières, forestières, et de zones de cultures sans arbres. C'est un dispositif unique et qui demeure aujourd'hui l'un des plus grands systèmes agroforestiers expérimentaux de France (DUPRAZ et al., 2019).

Le climat y est de type méditerranéen subhumide, avec une température moyenne de 15,4°C et des précipitations annuelles de 873 mm. Le sol, alluvial, est argilo-calcaire, profond et avec une nappe d'eau souterraine de profondeur variable suivant les localisations et les saisons. Des piézomètres placés dans les différentes parcelles permettent de contrôler le niveau d'eau de la nappe.

Trois principales essences arborées y sont étudiées : le noyer hybride, le cormier et le peuplier I214 (ce dernier ayant remplacé le paulownia qui était planté à l'origine mais qui n'a pas survécu).

## 2.2. DESCRIPTIF DES DISPOSITIFS CIBLÉS

Les parcelles de peupliers ayant été exploitées durant l'hiver 2018/2019, notre étude sur la croissance et la formation du bois de peuplier en milieu agroforestier ne pouvait y être menée, un nouveau dispositif permettant un comparatif de peupliers AF et FC a donc dû être identifié.

Dans ce dispositif de Restinclières, quatre parcelles cumulant une surface totale de 12,5 ha (Figure 2.1) sont destinées à l'étude du noyer hybride (*Juglans regia* × *nigra* cv. NG23) et à son développement en conditions agroforestières. Le noyer hybride a été choisi pour la production de bois, les noix produites par cette espèce hybride n'étant pas comestibles.

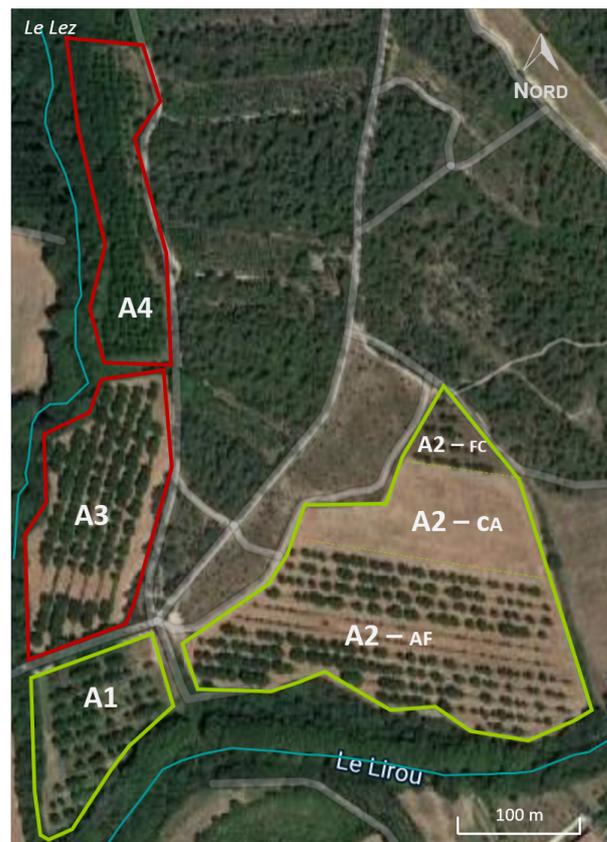


FIGURE 2.1 – Vue aérienne des quatre parcelles de noyers hybrides du dispositif expérimental en agroforesterie tempérée- Domaine départemental de Restinclières. Les parcelles encadrées en rouge correspondent aux deux parcelles étudiées au cours de cette thèse (A3-Parcelle agroforestière AF ; A4-Témoin forestier FC).

Ces parcelles sont :

- La parcelle A1, orientée Est-Ouest, est composée de noyers hybrides associés à d'autres essences, pommiers, aulnes et frênes, en taillis à courte rotation (TCR).
- La parcelle A2, orientée Nord-Sud, est divisée en trois parties : une première partie composée de noyers hybrides cultivés en conditions agroforestières et associés à des cultures

## 2.2. DESCRIPTIF DES DISPOSITIFS CIBLÉS

---

intercalaires (A2-AF). Sur deux lignes de cultures situées sous une ligne de haute tension, les arbres sont taillés en têtard afin de limiter leur croissance en hauteur. Les noyers restants sont entretenus de deux manières différentes : une partie est élaguée à 4 m de hauteur et l'autre à 6 m de hauteur. Une deuxième partie de la parcelle forme un témoin forestier de noyers hybrides (A2-FC). L'interligne y est de 13 m. Enfin, on retrouve entre ces deux parcelles une troisième partie essentiellement agricole (A2-AC), témoin agricole de la parcelle A2-AF.

- La parcelle A3 (Figure 2.2a) est orientée Nord-Sud. Elle est entourée par des haies excepté à l'Ouest où elle est longée par une rivière, le Lez. La densité initiale était de 200 arbres/ha avec un espacement entre les arbres de 13 m (interligne) x 4 m (intra-ligne). De nombreuses éclaircies ont été réalisées afin d'atteindre une densité de 100 arbres/ha et les noyers sont désormais espacés de 4, 8, 12 ou 16 m sur les lignes. Les noyers sont associés à des cultures intercalaires dont les rotations sont annuelles, les plantes cultivées depuis la création du dispositif étant principalement le blé dur, l'orge, le colza et le pois protéagineux. La culture annuelle était fertilisée avec environ 150 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, à l'exception des années où elle était composée d'espèces légumineuses fixatrices d'azote. Le sol de l'inter-rang était généralement labouré à 20 cm de profondeur chaque année avant le semis.
- La parcelle A4 est une parcelle forestière (Figure 2.2b), témoin de la parcelle A3. Également orientée Nord-Sud, elle est composée de noyers hybrides associés à des aulnes. Sa densité est de 200 arbres/hectare, avec un espacement entre les arbres et les rangées de 7 x 7 m. Au cours des années, d'autres essences, majoritairement des frênes, se sont naturellement développées entre les arbres d'une même rangée créant ainsi une ambiance forestière. Dans cette parcelle, la moitié des arbres ont été fertilisés de 1999 à 2010 avec de l'ammonitrate (50 unités d'azote/ha). La parcelle A4 est également bordée à l'Ouest par le Lez.

## 2.2. DESCRIPTIF DES DISPOSITIFS CIBLÉS

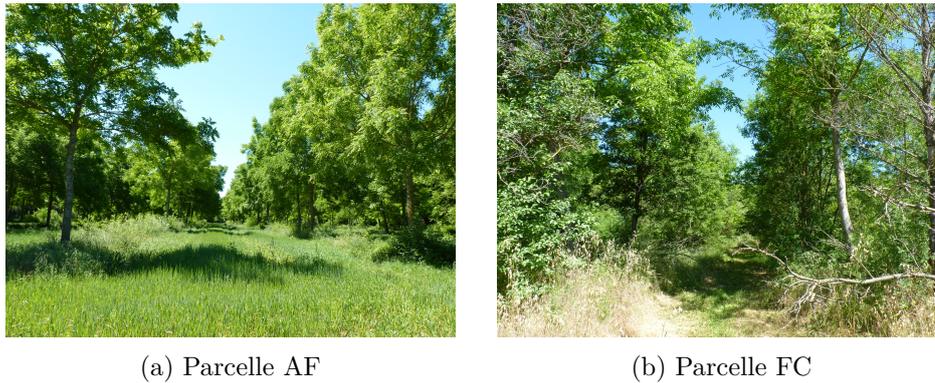


FIGURE 2.2 – (a) Parcelle agroforestière A3 (parcelle AF) et (b) parcelle forestière A4 (parcelle FC) du dispositif en agroforesterie tempérée de Restinclières (RAP) - (Crédit - Lucie HEIM, mai 2020.)

### 2.2.2 Le dispositif Peuplier de Lent - Peupliers Koster

Nous avons cherché pendant plusieurs mois des dispositifs pour le peuplier en particulier en collaboration avec plusieurs instituts et sociétés et c'est avec le support de la SCOP AGROOF, Société Coopérative et Participative spécialisée dans l'étude et le développement des systèmes agroforestiers, que nous avons finalement retenu le dispositif de Lent.

Ce dispositif situé à Lent (Ain, France,  $46^{\circ}05'04.7''N$   $5^{\circ}10'24.6''E$ , altitude 255 m) a été créé par un agriculteur indépendant et se compose de deux parcelles accolées (Figure 2.3), l'une agroforestière (AF)(Figure 2.4b) et l'autre forestière (FC)(Figure 2.4a), similaire aux plantations de peupliers conventionnelles, en terme de densité de peuplement. Nous l'appellerons dans la suite de ce manuscrit le "Dispositif peuplier".

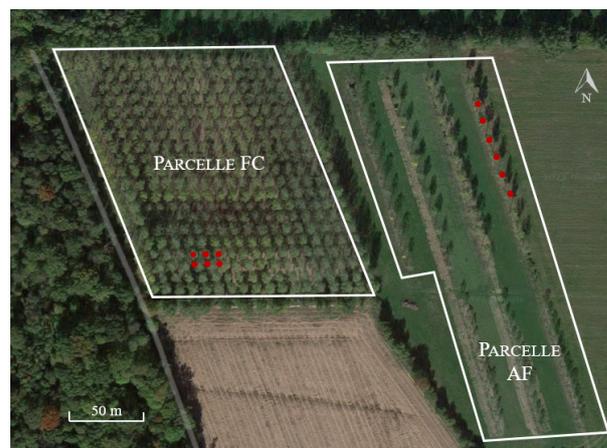


FIGURE 2.3 – Dispositif Peuplier de Lent (Ain, France).

## 2.2. DESCRIPTIF DES DISPOSITIFS CIBLÉS

---



(a) Parcelle FC



(b) Parcelle AF

FIGURE 2.4 – (a) Parcelle forestière témoin (FC) et (b) Parcelle agroforestière (AF) du Dispositif Peuplier de Lent (Ain, France)

Les arbres de la parcelle FC ont été plantés en 2003 tandis que ceux de la parcelle AF l'ont été en 2008. Les densités de plantation sont d'environ 200 arbres/ha pour la parcelle FC et 50 arbres/ha pour la parcelle AF. Les arbres étaient espacés de 5 x 5 m dans la parcelle FC et de 10 x 20 m dans la parcelle AF (10 m dans la ligne de plantation, 20 m entre chaque ligne de plantation). Dans cette dernière on retrouve entre chaque ligne d'arbres une prairie fauchée annuellement destinée à l'alimentation animale.

Le cultivar majoritairement présent sur ces deux parcelles, le Koster, est un cultivar hybride (peuplier deltoïde du Michigan X peuplier noir « Vereecken ») sélectionné en 1966 (PAILLASSA, 2002) et pouvant être cultivé sur l'ensemble de la France. C'est un cultivar qui est peu sensible au vent dont la facilité d'élagage, les faibles besoins en eau et la bonne adaptation aux stations sur coteaux plus drainant (CRPF, 2016 ; PAILLASSA, 2002) en font un bon candidat pour la production en système agroforestier.

### 2.2.3 La plateforme DIAMs - Robiniers

Le Dispositif Instrumenté en Agroforesterie Méditerranéenne sous contrainte hydrique (DIAMs) situé à Mauguio (au Sud de Montpellier, France - 43.612°N ; 3.976°E) et qui s'étend sur 5 ha a été créé en 2017 par l'UMR Eco&Sol (INRAE). Cette plateforme a pour principaux objectifs d'étudier plusieurs problématiques telles que les performances sur le long terme des agroécosystèmes et leur résilience face aux changements climatiques.

C'est un dispositif factoriel composé de 3 blocks expérimentaux indépendants chacun divisé en trois parcelles : une agroforestière, une témoin forestière et une témoin agricole (Figure 2.5). L'essence arborée étudiée est le robinier (*Robinia pseudoacacia*), lequel est associé à des cultures intercalaires en rotation céréalières/légumineuses (blé/orge/pois) dans les parcelles agrofores-

## 2.2. DESCRIPTIF DES DISPOSITIFS CIBLÉS

---

tières. La densité de plantation y est de 294 arbres/ha avec une interligne de 17 m et des arbres espacés de 2 m au sein d'une même ligne. Des bandes enherbées sont semées sur les lignes d'arbres à l'automne. Dans les parcelles forestières, la densité de plantation est d'environ 1689 arbres/ha, l'interligne est de 3 m et les robiniers d'une même ligne sont espacés de 2 m (FOREST et al., 2022). Contrairement aux parcelles agroforestières, il n'y a pas de bandes enherbées semées dans les parcelles forestières.

Une éclaircie au sein de toutes les parcelles sera réalisée 5 ans après la plantation afin de diminuer la densité de plantation, en ne conservant qu'un arbre sur trois. Les robiniers destinés à être conservés ont été tuteurés par des tuteurs en douglas de 10 cm de diamètre en mars 2020.

Une opération de taille massive des robiniers dans les parcelles AF et FC a été réalisée en janvier-février 2021 et janvier-février 2022 afin de faire monter leur houppiers (dégager le tronc pour des raisons de sécurité notamment, les épines de leurs branches pouvant être un gros problème lors de l'entretien des arbres et le passage dans les parcelles) et continuer leur formation (défourchage, défauts de cime, contenir l'émission de gourmand épïcormiques). Un sous-échantillonnage a été réalisé et environ 180 arbres n'ont pas été taillés afin de pouvoir suivre leur croissance sans que la réduction de la hauteur du houppier générée par la taille ne soit un biais.

Dans les parcelles agroforestières et dans les parcelles agricoles témoins, les cultures sont conduites de manière conventionnelle, avec un labour toutefois assez superficiel (entre 20 et 50 cm de profondeur). Un traitement phytosanitaire (Atlantis Pro) a été réalisé en janvier 2020 et des campagnes de fertilisation à l'azote sont menées régulièrement (SIEGWART et al., 2022). Le blé dur a été semé comme culture d'hiver fin 2019. En 2021, l'orge brassicole a été mis en culture puis en 2022, la culture de printemps reposait sur du pois protéagineux. Dans certaines placettes de ces parcelles agroforestières et agricoles témoins, a été mis en place une culture de couverture estivale à base de de sorgho fourrager avec pour double objectif de réaliser une couverture du sol d'une part, et d'effectuer une entrée de carbone d'autre part (le sorgho est broyé et laissé sur place à l'automne lors de la préparation à la prochaine culture).

## 2.3. FORCES ET FAIBLESSES DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

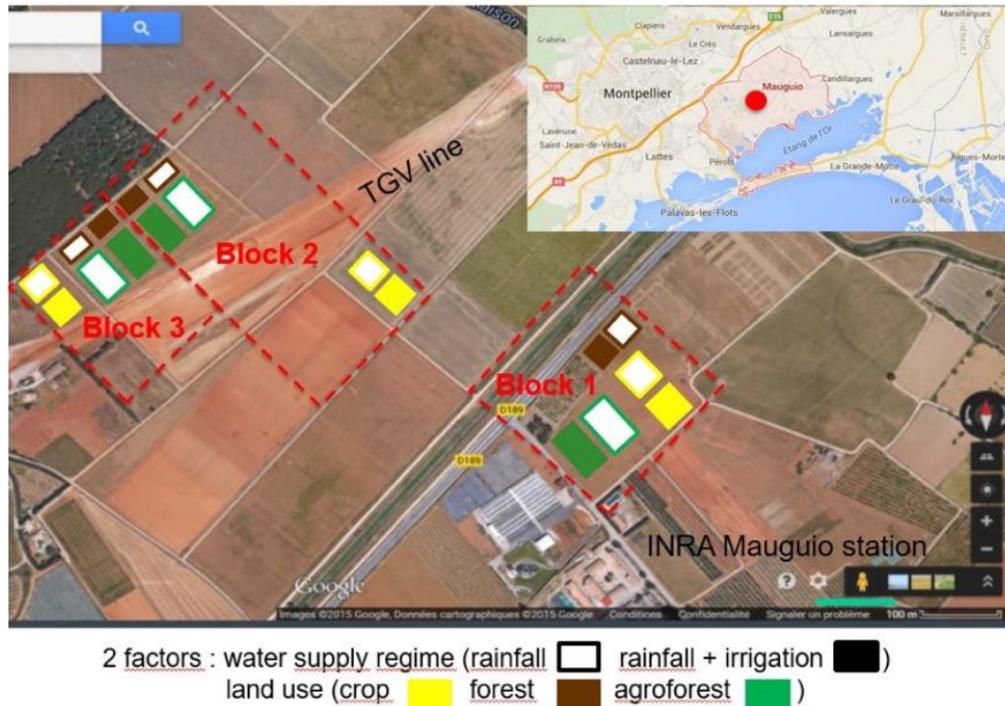


FIGURE 2.5 – Design expérimental DIAMs (Hérault, France)(Source : Eco&Sols)

Ce dispositif est une véritable opportunité pour notre étude de la croissance des arbres en milieu agroforestier. En plus de comparer la croissance d'arbres agroforestiers avec celle de leurs témoins forestiers ayant poussé dans les mêmes conditions environnementales (en terme de pédologie, conditions hydriques et microclimat), le tuteurage d'une partie des arbres, à la fois dans les parcelles AF et dans les parcelles FC, permet de limiter leurs mouvements et d'analyser plus finement l'influence du vent sur le développement des arbres dans les systèmes agroforestiers.

## 2.3 Forces et faiblesses des dispositifs expérimentaux

Au terme de nos recherches, les trois dispositifs présentés ci-dessus nous ont paru les plus adaptés pour répondre indépendamment aux problématiques soulevées dans ce travail de thèse. Nous avons identifié dans chacun d'entre eux des forces et des faiblesses répertoriées dans le tableau 2.1 ci-dessous. Cette étape est nécessaire pour concevoir par la suite les expérimentations qu'il sera possible de réaliser dans le but de dresser un portrait global de l'"arbre agroforestier" en terme de croissance, de propriétés physico-chimiques, et de qualité du bois en vue d'une valorisation industrielle.

### 2.3. FORCES ET FAIBLESSES DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

TABLE 2.1 – Forces et faiblesses identifiées dans chacun des dispositifs étudiés au cours de la thèse

	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
<b>Dispositif de Res-tinclières - Noyers hybrides</b>	Un des plus vieux dispositifs de France/d'Europe déjà bien connu et étudié	Grande variabilité des conditions pédologiques et pédo-climatiques entre les parcelles
	Suivi de la croissance des arbres depuis leur plantation en 1995	Noyers relativement jeunes en terme de maturité d'exploitation (notamment en raison d'un phénomène de duraminisation peu initié)
	Comparatif parcelles agroforestière / forestière / agricole	
<b>Dispositif Peuplier - Peupliers Koster</b>	Parcelles AF et FC accolées présentant donc des caractéristiques environnementales relativement similaires	Différences d'âge entre les peupliers AF et FC
	Très bon suivi des arbres de la part de l'agriculteur : entretien des arbres avec tailles et élagages	Pas de suivi de la croissance des arbres depuis leur plantation
	Koster : cultivar ciblé dans nos recherches	Peu d'individus du cultivar Koster dans la parcelle AF

<b>Dispositif DIAMs - Robiniers</b>	3 blocks permettant de réaliser les mesures	Choix de l'essence discuté : Robinier → essence responsable d'envahissement dans certains écosystèmes, nécessite beaucoup d'entretien et de surveillance
	Excellente unité pédo-climatique et forte exposition au vent	Énorme variabilité des robiniers car ce ne sont pas des cultivars : phénotypie et génotypie très diverses
	Dispositif jeune permettant le suivi des arbres depuis leur plantation	Dispositif jeune limitant l'évaluation de la qualité des arbres
	Possibilité de tuteurer certains arbres pour étudier plus précisément l'impact du vent sur les cinétiques de croissance des arbres AF et FC	

---

## 2.4 Récapitulatif des expérimentations menées au cours de la thèse

### 2.4.1 Méthodologie

Suite à l'étude bibliographique présentée en début de mémoire, nous avons cherché à identifier les critères qui permettent de décrire et comparer la qualité des bois forestiers et agroforestiers. Nous avons retenu les trois dispositifs cités car ils permettent cette comparaison entre les arbres AF et FC :

1. Croissances primaire et secondaire, avec un comparatif des hauteurs et des diamètres des arbres AF et FC, et ce pour chacune des essences étudiées dans cette thèse (noyer, peuplier et robinier). Dans le cas des noyers et des robiniers, les analyses porteront sur un suivi annuel de la croissance, dans le cas des peupliers sur les mesures finales faites au

## 2.4. EXPÉRIMENTATIONS DURANT LA THÈSE

---

moment de l'exploitation. Un focus sur l'effet du vent en condition contrôlée sera réalisé sur les parcelles de robiniers grâce au tuteurage des arbres.

2. Propriétés physiques et chimiques. La partie biochimie regroupe notamment l'étude comparative de la teneur en composés extractibles contenue dans les branches, les noeuds, l'écorce et le tronc de noyers agroforestiers ainsi que la quantification de leur taux de lignine. L'analyse des propriétés physiques du bois des arbres agroforestiers et "conventionnels" portera principalement sur (i) l'évolution de l'angle des microfibrilles de cellulose (AMF) à travers le tronc des peupliers et noyers AF, (ii) la densité du bois de ces mêmes arbres, (iii) la variation du taux d'humidité dans le tronc des peupliers, en lien avec la présence de faux-cœur. Une comparaison de ces valeurs entre arbres AF et FC, pour une même essence, sera systématiquement réalisée.
3. Valorisation des arbres agroforestiers. Cette étude sera appliquée au cas du déroulage, avec notamment l'analyse des déformations des placages de peupliers après déroulage et après séchage, ainsi que l'évaluation des propriétés mécaniques des panneaux de LVL de peuplier. Le tableau 2.2 suivant résume brièvement les études réalisées dans le cadre de cette thèse afin de réaliser un comparatif entre les arbres AF et FC

TABLE 2.2 – Tableau récapitulatif des expérimentations comparatives AF vs FC menées pour chaque essence ciblée

	Croissance		Propriétés physiques et chimiques				Qualité technologique	
	Croissance	Thigmorphogénèse	Biochimie	AMF	Densité	Humidité	Déformation des placages	Propriétés mécaniques
Dispositif RAP Noyer	X	X	X	X	X			
Dispositif Peuplier Peuplier	X	X	X	X	X	X	X	X
Dispositif DIAMS Robinier	X	X						

### 2.4.2 Échantillonnage des arbres

L'analyse des propriétés physico-chimiques et l'évaluation de la qualité technologique des peupliers et des noyers agroforestiers a nécessité d'abattre quelques individus dans chacune des parcelles AF et FC des dispositifs de Restinclières et de Lent. La suite de cette partie décrit l'échantillonnage réalisé pour chaque essence. À noter que chacune des parties qui suivent concernant les échantillonnages effectués sur chaque parcelles d'études sont également détaillées dans les articles scientifiques inclus dans ce mémoire.

#### 2.4.2.1 Échantillonnage des noyers du dispositif de Restinclières

8 noyers hybrides AF et 8 noyers hybrides FC ont été abattus en mars 2020 dans les parcelles AF et FC du dispositif expérimental de Restinclières (parcelles A3 et A4 respectivement dans la figure 2.1). Afin de limiter les effets de la variabilité du sol entre les deux parcelles, les noyers ont été échantillonnés au niveau de leurs extrémités mitoyennes : six noyers AF ont été abattus à l'extrémité nord de la parcelle AF (numérotés de 1 à 6), et six noyers FC à l'extrémité Sud de la parcelle FC (numérotés de 11 à 16). Afin de pouvoir étudier les variabilités intra parcellaires, deux noyers ont été abattus aux extrémités opposées de ces deux parcelles (numérotés 7 et 8 pour les noyers FC et 9 et 10 pour les noyers FC). Tous ces noyers sont représentés en rouge sur la figure 2.6. Les arbres ont ensuite été débités en plusieurs billons et rondelles sur lesquels seront réalisées les différentes études citées précédemment (Figure 2.6).



FIGURE 2.6 – Échantillonnage des noyers agroforestiers et forestiers des parcelles AF et FC du dispositif de Restinclières. Les arbres abattus en mai 2020 sont représentés par les points rouges. Ceux situés au niveau de l'extrémité commune des deux parcelles sont entourés en jaune, ceux situés aux extrémités sont entourés en bleu.

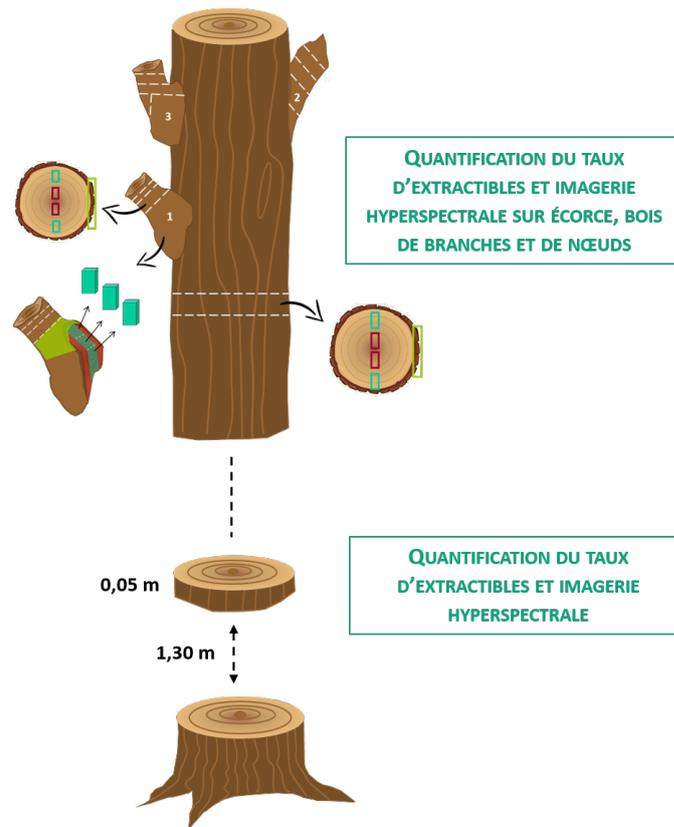


FIGURE 2.7 – Représentation schématique de l'échantillonnage et des expérimentations menées sur les noyers AF et FC.

### 2.4.2.2 Échantillonnage des peupliers du dispositif Peuplier de Lent

Six arbres par parcelle ont été abattus en avril 2022 (représentés en rouge sur la figure 2.4). Une lettre a été attribuée à chaque peuplier, allant de A à F pour les peupliers AF et de G à L pour les peupliers FC. Chaque arbre a ensuite été débité en plusieurs billons et rondelles, les expérimentations menées sur chacun d'entre eux sont schématisées dans la figure 2.8.

## 2.4. EXPÉRIMENTATIONS DURANT LA THÈSE

---

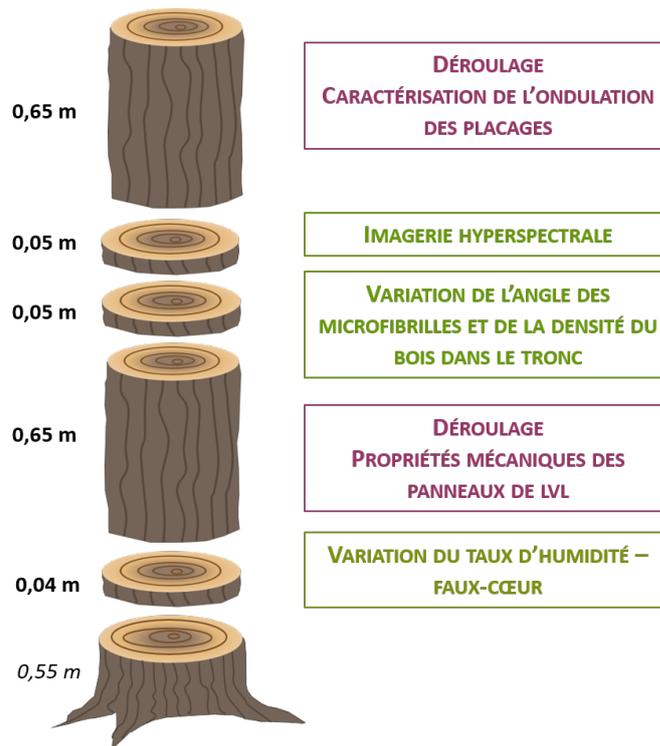


FIGURE 2.8 – Représentation schématique de l'échantillonnage et des expérimentations menées sur les peupliers AF et FC.

### 2.4.2.3 Échantillonnage des robiniers du dispositif DIAMs

Nous l'avons évoqué précédemment, un robinier sur trois a été tuteuré dans chacune des parcelles du dispositif DIAMs, l'objectif étant de ne conserver que les robiniers tuteurés lors de l'éclaircie prévue quelques années après la plantation. Ce tuteurage, illustré sur la figure 2.9 est une véritable opportunité pour notre travail axé sur la thigmomorphogénèse et l'acclimatation de l'arbre agroforestier au milieu venteux dans lequel il évolue. Toutefois, les arbres ont été drastiquement taillés en janvier-février 2021 et en janvier-février 2022 (la situation sanitaire de 2020 ayant empêché la taille de se faire cette année là), ce qui peut entraîner une réduction très importante de la hauteur d'une année à l'autre et représenter un biais dans notre étude. Nous avons donc réalisé dans le cadre de cette thèse un sous-échantillonnage des 184 arbres répartis dans les trois blocks expérimentaux sur lesquels aucune taille n'a été faite. Ces arbres ont été notamment sélectionnés dans une zone dite "tampon", qui correspond à une rangée de 4 robiniers installée initialement au centre de chaque parcelle, permettant ainsi de diviser chaque parcelle en deux placettes distinctes (Figure 2.10).

## 2.4. EXPÉRIMENTATIONS DURANT LA THÈSE



(a) Robinier tuteuré - Parcelle FC



(b) Robinier témoin non tuteuré

FIGURE 2.9 – (a) Robinier tuteuré (parcelle FC du block 3) et (b) robinier témoin non tuteuré (parcelle AF du block 1) du dispositif DIAMs.

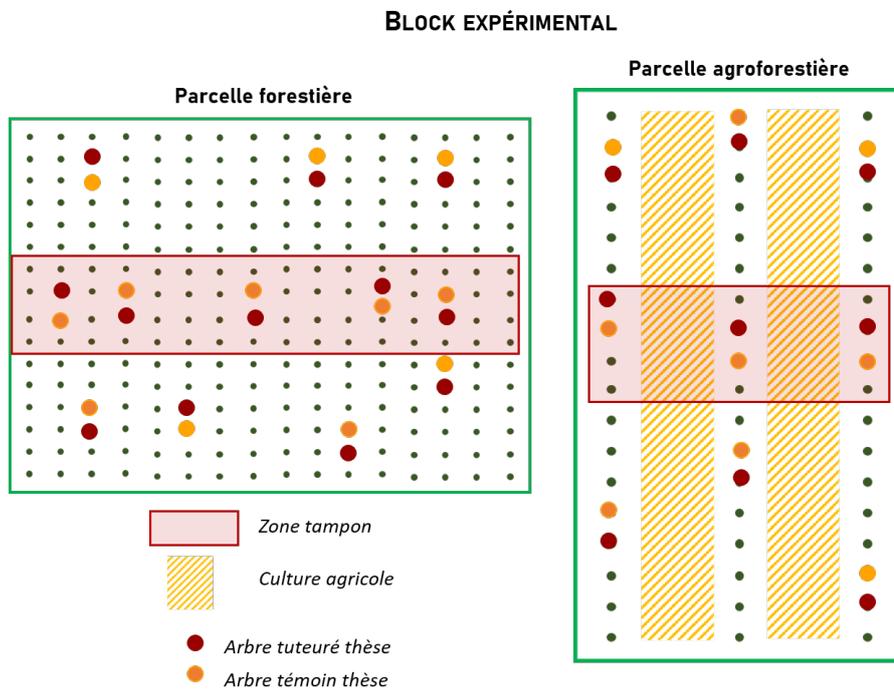


FIGURE 2.10 – Représentation schématique du sous-échantillonnage réalisé dans le cadre de cette thèse. Les robiniers échantillonnés ne seront pas taillés. Le block expérimental est représenté ici sans sa parcelle agricole témoin.

## 2.5. SYNTHÈSE

---

Les robiniers ont été sélectionnés de manière aléatoire en évitant au maximum les biais apportés par les parcelles. Par exemple, nous avons évité de sélectionner des arbres situés en bordure de parcelle. Chaque robinier tuteuré est accompagné de son témoin non tuteuré. Au total, 184 robiniers ont été échantillonnés : 102 dans le block 1 (51 tuteurés + 51 témoins), 42 dans le block 2 (21 tuteurés et 21 témoins) et 40 dans le block 3 (20 tuteurés + 20 témoins). Un renforcement des tuteurs a parfois été nécessaire dans le cas où ils n'avaient pas été correctement installés et que leur maintien n'empêchaient pas suffisamment l'arbre de bouger face au vent (Figure 2.11).



FIGURE 2.11 – Renforcement des tuteurs de robiniers.

## 2.5 Synthèse

Le comparatif de la croissance et de la xylogénèse des arbres agroforestiers à leurs témoins forestiers est une tâche rendue complexe par la rareté des dispositifs expérimentaux composés à la fois d'une parcelle agroforestière et d'une parcelle forestière témoin. Au terme de nos recherches, nous avons sélectionné trois dispositifs qui nous ont semblé les plus adaptés aux besoins de ce travail de thèse. Ce chapitre a donc permis de se familiariser avec ces derniers et de décrire succinctement les différentes études qui y seront menées. Le dispositif de Restinclières permettra d'étudier le cas du noyer en conditions agroforestière, le dispositif de Lent celui du peuplier, et enfin le dispositif DIAMs nous permettra d'évoquer l'impact du vent sur les peuplements agroforestiers dans le cas du robinier. Tous ces dispositifs présentent cependant des faiblesses que nous avons dû identifier afin d'adapter nos expérimentations à chaque cas. Ces expérimentations et l'échantillonnage réalisés dans les dispositifs de Restinclières et Peupliers ont été résumés en fin de chapitre et permettent d'appréhender la suite de ce mémoire.



## Chapitre 3

# Croissance des arbres en milieu agroforestier

### 3.1 Introduction

Afin de limiter la compétition entre les arbres et les cultures et permettre le passage des engins agricoles, l'espacement entre les arbres au sein des parcelles agroforestières est beaucoup plus important que dans les parcelles forestières plus conventionnelles en terme de densité de plantation, ce qui en réduit significativement la densité de plantation. Ces spatialisations entraînent la modification de nombreux paramètres de l'environnement dans lequel croissent les arbres, tels que des expositions plus élevées au vent et à la lumière, tandis que la compétitivité à laquelle peuvent être soumis les arbres entre eux en condition forestière est remplacée dans les systèmes agroforestiers par leurs interactions avec les cultures associées. Si l'influence des conditions de croissance sur le développement des arbres dans les plantations forestières est une problématique largement étudiée à travers le monde, ce n'est pas le cas des arbres évoluant dans les systèmes agroforestiers dont le développement en terme de croissance primaire et secondaire est encore peu décrit.

Dans ce chapitre, les croissances des trois essences feuillues décrites précédemment seront étudiées. Dans chacun des trois dispositifs expérimentaux (RAP pour le noyer, Peuplier, DIAMs pour le robinier), un comparatif de la hauteur et du diamètre est réalisé entre les arbres issus des parcelles agroforestières et de leurs témoins forestiers. La première partie est consacrée à l'étude de la croissance des noyers hybrides du dispositif RAP dont le suivi annuel (de 1995 à 2014) réalisé par l'UMR ABSys permet de suivre l'évolution des croissances primaire et secondaire de noyers AF et FC depuis leur plantation. Nous évoquerons ensuite le cas de la croissance des peupliers Koster en conditions agroforestières. Enfin, nous terminons ce chapitre par l'analyse de l'effet de l'action du vent sur la croissance des arbres agroforestiers en réalisant un comparatif de la hauteur

## 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

---

et du diamètre des robiniers AF et FC de la plateforme DIAMs. Ces trois essences présentent des stratégies de croissance différentes : les cas du robinier et du peuplier permettront d'appréhender les croissances primaires et secondaires en configurations agroforestières d'essences à croissance rapide, tandis que le noyer représentera le cas d'une essence à croissance plus lente.

L'hypothèse principale demeure que la densité de plantation plus faible dans les parcelles agroforestières engendre des conditions différentes de micro-environnement telles que l'accès à la lumière, à l'eau et des sollicitations mécaniques induites pas le vent plus importantes sur les arbres agroforestiers que dans les parcelles forestières témoins. Sur ce dernier point, par exemple, le phénomène d'acclimatation de thigmomorphogénèse pourrait être donc plus marqué dans les parcelles AF, dans lesquelles les arbres pourraient avoir une croissance en hauteur plus faible mais une croissance en diamètre plus élevée que leurs témoins forestiers.

### 3.2 Dynamique de croissance des arbres en milieu agroforestier : le cas du noyer hybride

L'objectif de ce chapitre est de comparer la dynamique de croissance de noyers hybrides agroforestiers (*Juglans regia* × *nigra* cv. *NG23*) avec celle de noyers cultivés au sein de plantations plus conventionnelles.

#### 3.2.1 Matériels et méthodes

##### 3.2.1.1 Bref descriptif des parcelles

Cette étude comparative de la croissance de noyers agroforestiers à celle de noyers issus de peuplements plus conventionnels en terme de densité de plantation a été menée sur les parcelles A3 et A4 de la plateforme RAP décrites dans le chapitre 2 (partie 2.2.1). La parcelle A3, agroforestière, sera appelée parcelle AF, et la parcelle A4, le témoin forestier, sera appelée parcelle FC dans la suite de ce chapitre.

Quatre piézomètres ont été installés dans la parcelle AF et trois dans la parcelle FC afin de mesurer la distance à l'eau souterraine dans les parcelles (Figure 3.1). Depuis 2002, une mesure de la profondeur de la nappe phréatique est enregistrée chaque mois pour chaque piézomètre. Les hauteurs de la nappe phréatique ont été déterminées à partir de la profondeur de la colonne d'eau dans chaque piézomètre. Les données utilisées sont celles obtenues après nivellement, le piézomètre de référence étant le 6\_35 (parcelle FC). Le piézomètre 5\_7 situé au nord de la parcelle FC n'a pas été nivelé et n'a donc pas été pris en compte dans notre étude. La parcelle FC est composée de onze lignes, numérotées de 1 à 11. La ligne 1 est située proche du Lez (à l'ouest) et la ligne 11 du côté opposé, proche de la route (à l'est). La parcelle AF est composée de huit lignes numérotées de 1 à 8. La ligne 1 est située à proximité du Lez et la ligne 8 est

### 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

---

proche de la route, à l'opposé de la parcelle. Comme les lignes de plantation près du Lez sont composées de très peu d'arbres, nous avons regroupé les lignes 1 et 2 de la parcelle AF et les lignes 1, 2 et 3 de la parcelle FC pour l'analyse statistique (Figure 3.1). En 2014, le nombre de noyers était respectivement de 140 et 208 dans les parcelles AF et FC. Cette même année, les branches des arbres ont été taillées à 4 m de hauteur.

Les noyers de la parcelle FC ont été associés à des aulnes (*Alnus cordata*), une espèce fixatrice d'azote, pour atteindre une densité de plantation globale de 400 arbres/ha. Les aulnes sont souvent utilisés comme espèce complémentaire dans les plantations de noyers pour favoriser la croissance du tronc et le bon développement de la couronne des noyers (BECQUEY, 2008). Ces associations permettent également de limiter les besoins en intrants au sein de la parcelle : des espèces comme l'aulne qui fixent l'azote atmosphérique dans le sol améliorent la richesse en nutriments. Dans le cas du noyer, plusieurs études ont montré une amélioration de la croissance primaire et secondaire des noyers communs (*Juglans regia*) et de la forme de leurs troncs et de leurs couronnes lorsqu'ils sont associés à des aulnes, par rapport à des plantations pures (MOHNI et al., 2009; SALBITANO et BAGNARA, 2004; TANI et al., 2006). De plus, la moitié des arbres forestiers a été fertilisée de 1999 à 2010 avec de l'ammonitrate (50 unités d'azote/ha).

### 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

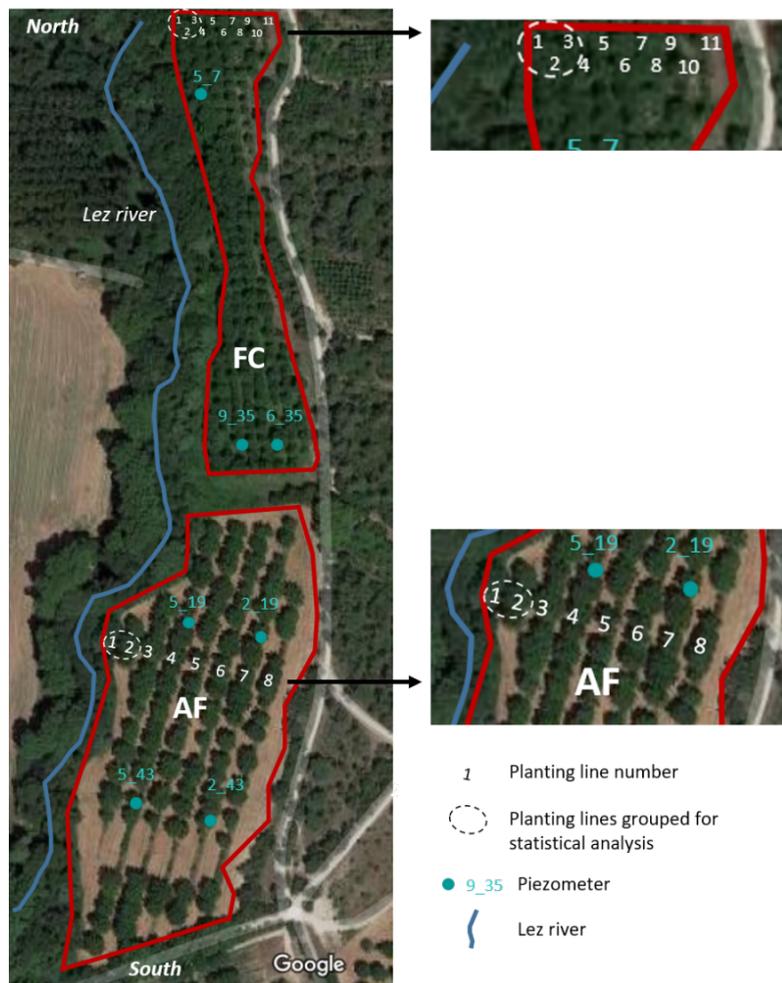


FIGURE 3.1 – Vue aérienne de la parcelle agroforestière (AF) et de la parcelle forestière témoin (FC), Restinclières, France. Les piézomètres sont représentés en bleu. Les lignes de plantation sont numérotées (en blanc) de 1 à 8 en partant de l’ouest pour la parcelle AF, et de 1 à 11 en partant de l’ouest pour la parcelle FC. Les cercles blancs en pointillés correspondent aux regroupements des arbres de plusieurs lignes de plantation différentes pour les analyses statistiques.

#### 3.2.1.2 Mesures de la croissance des noyers AF et FC

L’équipe de l’UMR ABSys (INRAE) a suivi la croissance des noyers par des mesures annuelles du diamètre à hauteur de poitrine (DBH) depuis 1998 et une mesure annuelle de la hauteur totale depuis 1995. Les mesures de hauteur (H) ont été réalisées chaque année entre novembre et avril, à l’aide d’un dendromètre laser ou d’une perche selon les années. Les données ont été analysées jusqu’en 2014 puisqu’à partir de 2015, la hauteur des arbres était trop élevée pour permettre une mesure suffisamment précise. Pour chaque arbre, le rapport hauteur sur DBH (H/DBH) (m/cm) a donc pu être calculé jusqu’en 2014.

### 3.2.2 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel libre R studio, version 4.0.4. Elles ont été considérées comme significatives à une valeur  $p - value < 0,05$ . Le test non paramétrique de Wilcoxon a été utilisé pour comparer les croissances en hauteur et en diamètre et le rapport H/DBH des noyers en fonction de la parcelle et du type de fertilisation. Les comparaisons des croissances au sein d'une même parcelle (entre les différentes lignes de plantation) et des niveaux de la nappe phréatique (basés sur les relevés des différents piézomètres) des deux parcelles ont été réalisées à l'aide d'un test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

### 3.2.3 Résultats

#### 3.2.3.1 Dimensions des arbres

Les croissances en diamètre et en hauteur des noyers agroforestiers (AF) sont toutes deux supérieures à celles des arbres témoins forestiers (FC). Ces différences sont significatives dès les premières années de plantation (Figure 3.2a et Figure 3.2b) ( $p - value < 0,001$ ). En 2014, la hauteur moyenne des noyers AF était de 13,2 m contre 11,2 m pour les noyers FC ( $p - value < 0,001$ ), soit une hauteur plus importante de 15% pour les noyers AF par rapport aux arbres FC. Le diamètre moyen des noyers AF était également significativement plus important que celui des noyers FC, avec des valeurs moyennes de DBH de 27,5 cm et 18,1 cm, respectivement en 2014 (+34%,  $p - value < 0,001$ ).

Le suivi de la croissance dans la parcelle forestière témoin n'a indiqué aucune différence significative entre la hauteur moyenne des noyers FC fertilisés et non fertilisés depuis 1999 (Figure 3.3a). De même, l'effet de la fertilisation sur le diamètre des noyers FC n'était pas significatif (valeur  $p - value = 0,14$ ) (Figure 3.3b). Cette dynamique de croissance est restée identique après l'arrêt de la fertilisation (en 2010) sur la parcelle FC. En 2014, la hauteur et le diamètre moyens des noyers FC fertilisés étaient respectivement de 11,5 m et 17,7 cm, contre 12,0 m et 15,3 cm pour les noyers FC non fertilisés ( $p - value = 0,39$ ).

Une diminution progressive du ratio H/DBH est observée de 1998 à 2014, ce ratio étant significativement plus élevé dans la parcelle FC que dans la parcelle AF ( $p - value < 0,05$  pour toutes les années) (Figure 3.4).

### 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

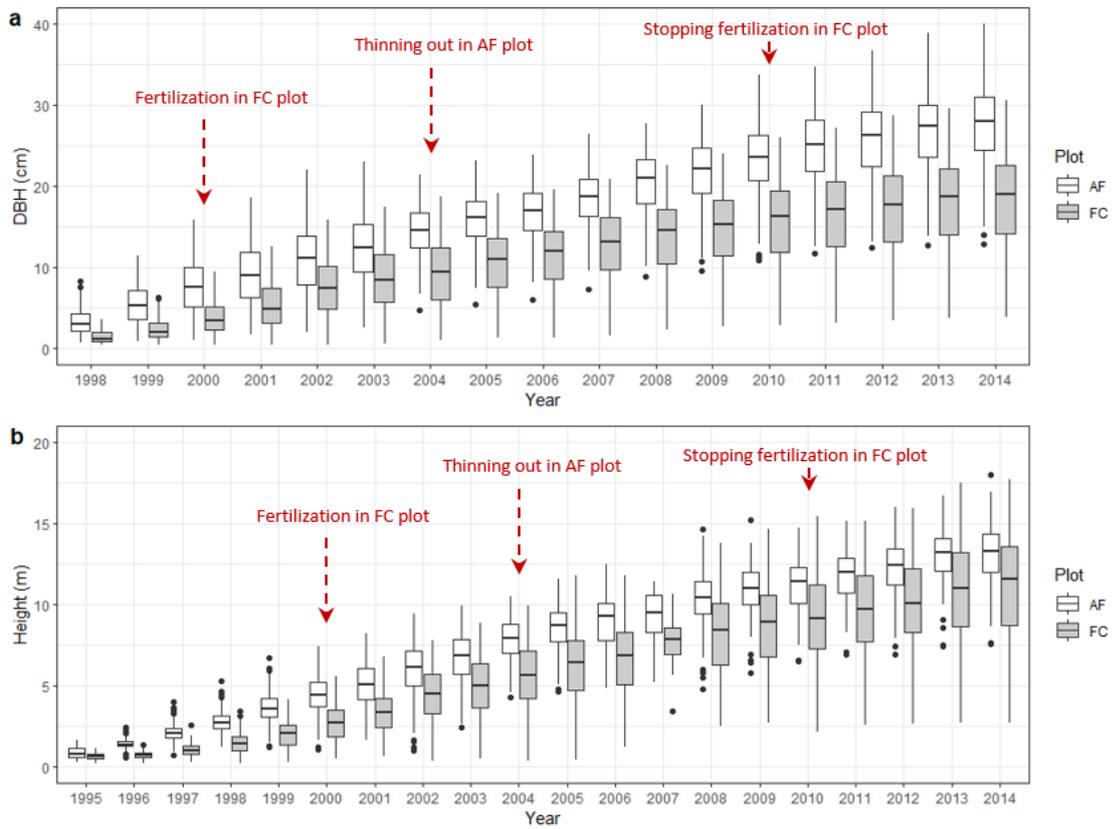


FIGURE 3.2 – Évolution du DBH (cm) (a) et de la hauteur (m) (b) des noyers AF et FC de 1995/1998 à 2014.

### 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

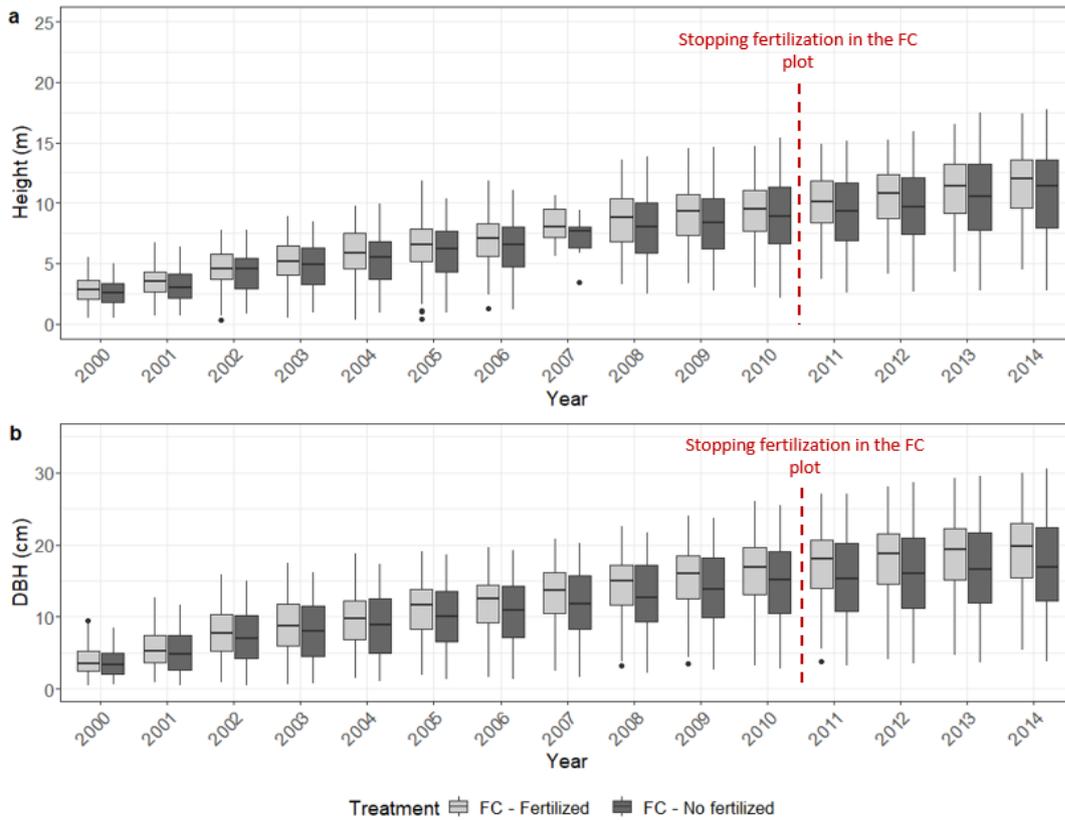


FIGURE 3.3 – Évolution de la hauteur (m) (a) et du DBH (cm) (b) des noyers de la parcelle FC, de 2000 à 2014, en fonction de la fertilisation.

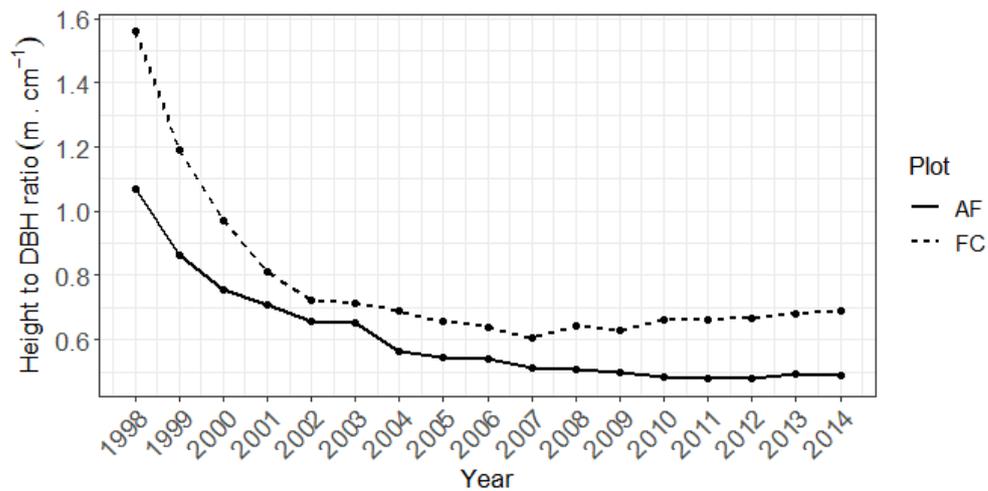


FIGURE 3.4 – Évolution du ratio moyen entre la hauteur et le DBH (H/DBH, en m/cm) pour les noyers AF et FC, de 1998 à 2014.

## 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

### 3.2.3.2 Effets de la distance à la rivière Lez et de la hauteur de la nappe phréatique

La présence du cours d'eau (le Lez) longeant les deux parcelles (Figure 3.1) semble influencer la croissance des noyers. Les comparaisons suivantes ont été réalisées sur les hauteurs et diamètres des arbres en 2014. Une diminution significative de la hauteur des noyers a été observée à mesure que l'on s'éloigne de la bordure ouest des parcelles, où s'écoule le Lez (Figure 3.5a). Sur la parcelle AF, la hauteur moyenne des noyers a diminué de 15,9 m sur les lignes 1-2 proches de la rivière Lez, à 12,0 m sur la ligne 8, la plus éloignée (-25%). Dans la parcelle FC, la diminution observée est beaucoup plus marquée, la hauteur des noyers FC variant de 15,4 m à 7,4 m des lignes 1-2-3 à la ligne 11 (-52%) (Figure 3.5a).

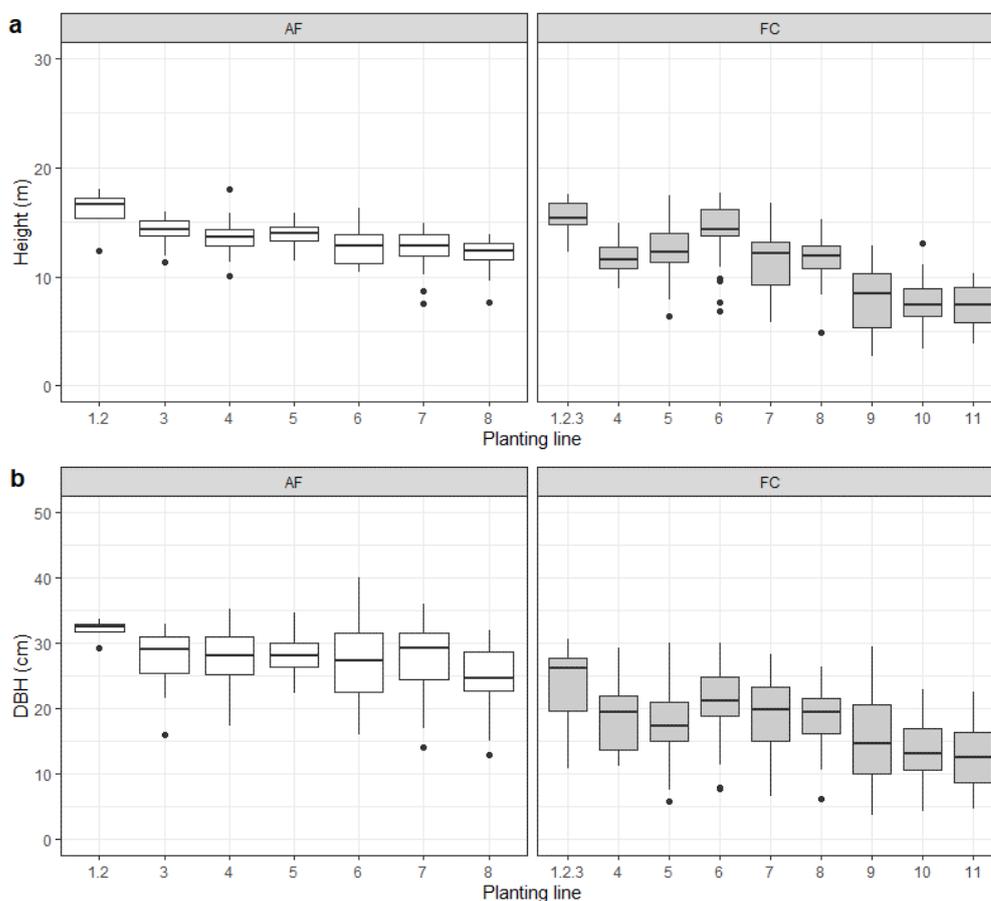


FIGURE 3.5 – Distributions du DBH (a) et de la hauteur (b) en fonction de la position de la ligne de plantation dans les parcelles AF et FC - 2014.

En ce qui concerne les diamètres moyens des noyers, une diminution progressive et significative du diamètre moyen est observée, en fonction de la distance au cours d'eau. Les diamètres moyens diminuent de 23,9 cm (lignes 1.2.3) jusqu'à 13,2 cm (ligne 11) dans la parcelle FC (Figure 3.5b), soit une croissance secondaire amoindrie de 45%. En revanche, dans la parcelle AF,

### 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

la diminution du diamètre en fonction de la distance au Lez semble moins prononcée : seules les lignes 7-8 et 1 sont significativement différentes, avec des diamètres moyens de 32,1 cm et 24,5 cm, respectivement (Figure 3.5b), soit une réduction de la croissance de 24%. Les diamètres moyens des noyers des lignes de plantation au centre de la parcelle n'étaient cependant pas significativement différents les uns des autres.

De plus, bien que les deux parcelles (AF et FC) soient très proches l'une de l'autre, l'analyse de la distance au sol de la nappe phréatique a montré une grande disparité entre ces deux zones. Le suivi de la nappe phréatique dans les sols constituant les parcelles AF et FC a indiqué que les valeurs moyennes annuelles de la profondeur de la nappe phréatique étaient plus faibles pour la parcelle forestière témoin (profondeur moyenne de la nappe phréatique = 151 cm) que pour la parcelle agroforestière (profondeur de la nappe phréatique = 323 cm) (Fig. 3.6). Entre 2002 et 2014, les fluctuations de la profondeur de la nappe phréatique des deux parcelles ont montré une dynamique similaire, avec des augmentations et des diminutions aux mêmes périodes de l'année. La distance au sol de la nappe phréatique est cependant toujours significativement plus faible dans la parcelle FC qu'au sud de cette même parcelle ( $p$ -value < 0,01). Ces variations sont saisonnières, avec une diminution générale au printemps et en été suivie d'une augmentation en automne et en hiver. Une très forte diminution de la profondeur de la nappe phréatique dans la parcelle AF après l'été 2006 jusqu'à l'hiver 2007 a été observée, ce qui n'était pas le cas dans la parcelle FC (Figure 3.6). De plus, il n'y a pas de différence de profondeur de la nappe phréatique au sein même de la parcelle FC ; les valeurs des deux piézomètres étant similaires quelle que soit la saison ( $p$ -value = 0,051). Dans la parcelle AF en revanche, la nappe phréatique est significativement plus élevée à l'extrémité Nord ( $p$ -value < 0,001).

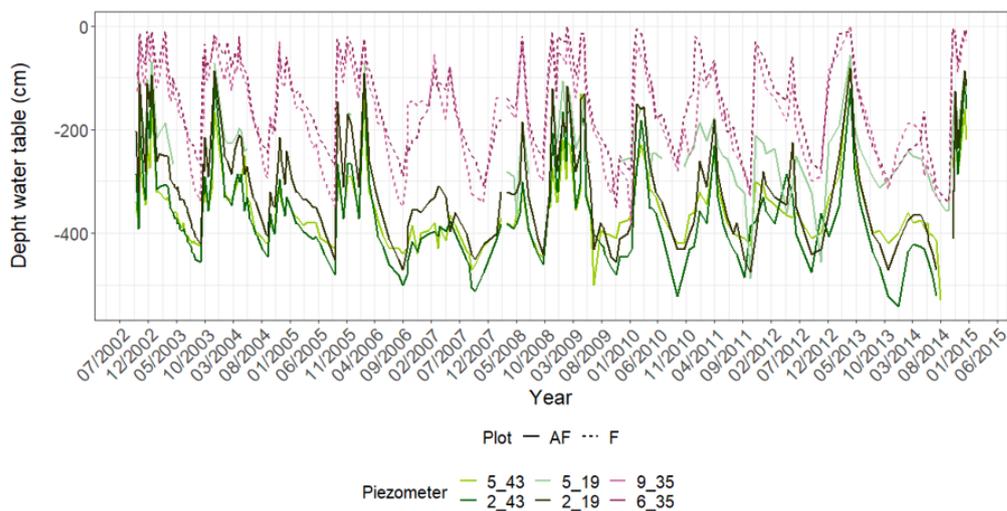


FIGURE 3.6 – Évolution de la profondeur de la nappe phréatique dans les parcelles AF et FC, de 2002 à 2014. Les valeurs enregistrées par les piézomètres de la parcelle AF sont représentés par des lignes continues, celles de la parcelle FC sont représentées par des lignes pointillées.

### 3.2.4 Discussion

Les résultats obtenus pour la croissance en diamètre sont en accord avec ceux provenant de la littérature qui indiquent que la croissance en diamètre des arbres augmente avec la diminution de la densité de plantation (Z.-H. JIANG et al., 2007; LASSERRE et al., 2009). D'autres études sur la croissance des arbres en agroforesterie ont également rapporté une croissance secondaire plus importante en contexte agroforestier que dans les témoins forestiers (CABANETTES et al., 1998). En ce qui concerne la croissance en hauteur, nos résultats ne sont pas en accord avec certaines études dans lesquelles les arbres en agroforesterie sont souvent plus petits que dans les zones forestières traditionnelles (CABANETTES et al., 1998). D'autres études ont toutefois rapporté que les arbres agroforestiers pouvaient être plus grands que leurs témoins forestiers (BALANDIER et DUPRAZ, 1998; THOMAS et al., 2020). En 1995, dans la région du Puy de Dôme (France), l'INRAE a conçu un dispositif expérimental afin de comparer la croissance de noyers hybrides (NG38xRA) en plantation standard de noyers avec celle de noyers accompagnés avec végétation (avec des oliviers). Les auteurs ont observé que les croissances en hauteur et en diamètre étaient influencées par la densité de plantation (BALANDIER et al., 2008; BALANDIER et al., 2005) : les noyers hybrides accompagnés étaient plus hauts et avaient un diamètre inférieur à ceux plantés sans arbre d'accompagnement (et donc à une densité plus faible). Ces résultats sont cohérents avec la littérature traitant de " thigmomorphogénèse " qui rapporte que les arbres les plus exposés au vent sont souvent moins hauts et leur tronc de plus large diamètre que les arbres accompagnés, davantage protégés des sollicitations mécaniques dues au vent (BONNESOEUR et al., 2016; NIEZ et al., 2018).

Outre des différences de disponibilité en eau qui dépendent grandement du type de culture intercalaire, les faibles densités de plantation dans les systèmes agroforestiers sont à l'origine de deux changements majeurs de ces environnements locaux : une plus grande exposition au vent et une augmentation de la lumière disponible pour les arbres. Les tiges subissent en particulier des déformations mécaniques plus importantes. Dans cette configuration, le processus thigmomorphogénétique est beaucoup plus élevé pour les arbres agroforestiers par rapport à ceux des arbres forestiers et pourrait expliquer en grande partie leur croissance en diamètre plus élevée.

Chaque année, le rapport H/DBH était significativement plus élevé dans la parcelle FC que pour les arbres de la parcelle AF. Une diminution progressive de ce ratio de 1998 à 2014 dans les deux parcelles est observée. Ces résultats sont cohérents avec une étude réalisée en 1998 par Telewski et Pruyn qui ont constaté une diminution du rapport H/d (où d était le diamètre de la tige) en réponse à une augmentation de la flexion de la tige de jeunes plants d'ormes blanc (*Ulmus americana*) (TELEWSKI et PRUYN, 1998). En plus de ces processus thigmomorphogénétiques, la réduction de la compétition pour la lumière induite par l'ouverture des milieux agroforestiers est également impliquée dans le développement des arbres. Dans les plantations forestières, cette

### 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

---

réduction se traduit par une diminution de la hauteur des arbres et une augmentation de leur circonférence (AUSSENAC, 2000) ; ce qui est cohérent avec les résultats obtenus par Cabanettes et al. (CABANETTES et al., 1998). Dans notre système, même si les arbres AF étaient plus hauts que les FC, le rapport H/DBH était plus faible pour les noyers AF que pour les FC (Figure4) ; ce qui suggère une forte réponse thigmomorphogénétique au stress mécanique induit par le vent. L'élanement des arbres semble donc ici être un bon descripteur de la dynamique de croissance de l'arbre agroforestier. D'autres paramètres pourraient également expliquer la plus grande hauteur des noyers AF dans le dispositif expérimental RAP. Tout d'abord, la fertilisation annuelle des cultures sur la parcelle AF pourrait être impliquée dans la croissance primaire plus importante de ces arbres, qui auraient bénéficié du surplus d'intrants. Toutefois, la fertilisation d'une partie des noyers témoins sur la parcelle forestière a montré que malgré cette fertilisation, les noyers FC fertilisés étaient toujours plus petits que les noyers AF.

Deuxièmement, la présence d'aulnes dans la parcelle FC peut également avoir ralenti la croissance des noyers, malgré les avantages de cette espèce fixatrice d'azote. En effet, Thomas et al dans leur étude sur la croissance des peupliers en milieu agroforestier, ont constaté que dans le mélange forestier, les peupliers associés aux aulnes étaient plus petits que les peupliers cultivés en monoculture (THOMAS et al., 2020). Enfin, la plus grande hauteur de la nappe phréatique dans la parcelle FC pourrait provoquer un engorgement du sol pendant la période hivernale, ce qui pourrait expliquer en partie la croissance plus faible des noyers FC, les noyers hybrides étant connus pour être sensibles à ce facteur. La parcelle FC pourrait alors avoir souffert d'un engorgement du sol, entraînant une forte mortalité racinaire chez les noyers forestiers (DUPRAZ et LIAGRE, 2008). Cette mort d'une partie du système racinaire des noyers FC au début de leur croissance pourrait donc largement expliquer les hauteurs plus faibles que celles des noyers AF, dans le cadre de notre étude menée sur le dispositif RAP (TALBOT, 2011). Par ailleurs, la compétition entre les systèmes racinaires des cultures et des arbres favorise généralement le développement des racines profondes de ces derniers (CARDINAEEL et al., 2015 ; MULIA et DUPRAZ, 2006). Cet ancrage dans les horizons profonds du sol permettrait aux arbres de prélever de l'eau et de la redistribuer vers les horizons superficiels notamment lorsque ces derniers sont secs (JOSE et al., 2004), comme en période estivale par exemple (PIERRET et al., 2016). Dans la parcelle AF étudiée, l'éventuel enracinement plus profond des noyers hybrides agroforestiers pourrait favoriser la croissance des arbres en améliorant leur accès à l'eau et aux nutriments en période de sécheresse estivale. Cette hypothèse d'accessibilité en eau pourrait également expliquer en partie le diamètre de tige plus élevé de ces arbres. Comme la profondeur de la nappe phréatique dans la parcelle FC limite probablement le développement des racines en profondeur pendant la période hivernale, les arbres ont alors un accès limité à l'eau pendant la période estivale. Une autre explication naturelle pourrait être la distance à la rivière Lez, car elle semble avoir un effet significatif sur la croissance primaire des arbres dans les deux parcelles.

## 3.2. CROISSANCE DES NOYERS AGROFORESTIERS

---

Les arbres plantés près de la rivière étaient significativement plus hauts que ceux plantés sur le côté opposé. Cependant, l'observation des différents piézomètres n'a pas montré de différence significative liée à la distance au Lez. La différence de cinétique de croissance du côté Ouest au côté Est semble donc être plutôt liée à la nature du sol ou à sa profondeur. Les caractérisations des sols des parcelles AF et FC ont été réalisées par Cardinael et al. qui ont mis en évidence que la quantité de carbone organique stocké dans le sol (à une profondeur comprise entre 30 et 50 cm) était significativement plus important dans la parcelle FC que dans la parcelle AF (CARDINAEL et al., 2017). Une telle différence de caractéristiques du sol entre les parcelles AF et FC pourrait affecter la cinétique de croissance des arbres.

### 3.2.5 Conclusion sur la croissance des noyers en milieu agroforestier

Après 19 ans de croissance, les noyers agroforestiers sont à la fois plus hauts et plus larges que les arbres cultivés en système forestier. Ces diamètres plus importants dans l'environnement agroforestier sont cohérents avec la corrélation négative habituelle entre les densités de plantation et l'augmentation du diamètre des arbres. Cet effet est bien connu dans les contextes sylvicoles et résulte de la combinaison d'un développement racinaire plus profond, d'un meilleur accès à la lumière et aux nutriments, mais aussi aux sollicitations mécaniques plus importantes dues à une plus grande exposition au vent. En supposant l'hypothèse de la thigmomorphogénèse et la réduction de la compétition lumineuse, il était attendu que la hauteur des noyers agroforestiers soit inférieure à celle des arbres forestiers, ce qui n'est pas le cas ici puisque les arbres agroforestiers étaient plus hauts. La différence de rapport H/DBH entre les arbres AF et FC va tout de même en ce sens et indique que les noyers agroforestiers sont moins élancés que les témoins forestiers. Cet effet de la thigmomorphogénèse, qui tend à réduire la hauteur des arbres, semble être compensé par l'effet des caractéristiques de la plantation, qui fournit plus de lumière, plus de ressources nutritives, et une meilleure disponibilité en eau, connue pour impacter la croissance en hauteur. Ces conditions environnementales locales expliqueraient pourquoi les arbres agroforestiers de notre étude sont plus grands et plus hauts que leurs témoins forestiers. Cela suggère probablement que l'impact thigmomorphogénétique sur la hauteur est faible par rapport aux autres facteurs environnementaux comme la position de la nappe phréatique ou la nature du sol. Ainsi, bien que nos résultats indiquent que les noyers agroforestiers ont produit plus de biomasse au niveau de leurs troncs (notamment en raison de leurs diamètres plus larges) que les arbres forestiers, notre étude souligne les difficultés rencontrées lors de la comparaison de ces deux systèmes afin d'évaluer l'impact des pratiques agroforestières sur le développement des arbres. Elle met en évidence la complexité de créer des systèmes expérimentaux agroforestiers et forestiers strictement identiques en termes de type de sol, d'accès à l'eau et d'exposition au vent.

## 3.3 Étude comparative de la croissance des arbres en milieu agroforestier - Le cas du peuplier Koster

Le peuplier est un arbre à croissance rapide dont la vitesse de croissance dépend du traitement sylvicole, des conditions de croissance du milieu et mais également fortement du cultivar. Dans le cas particulier du Koster, le rapport sur la qualité du bois des nouveaux cultivars de peupliers paru en 2013 rapporte que la croissance de ce cultivar est caractérisée comme étant "bonne à forte" (BERTHELOT et al., 2013b), avec notamment une croissance annuelle en circonférence pouvant aller jusqu'à 15 cm/an pendant la phase active et dans les meilleures conditions de croissance (PAILLASSA, 2002). Une étude menée sur l'influence de la densité de plantation en peupleraie sur le volume de biomasses aériennes des arbres rapporte notamment un diamètre moyen des peupliers plus important pour les arbres ayant été cultivés dans les parcelles avec les plus faibles densités de plantation. Cette production de biomasses, en surface terrière et en volume, s'est révélée être positivement corrélée à la densité de plantation (BERTHELOT et al., 2019). Les densités de plantations testées dans cette dernière étude étant relativement élevées (200, 300 et 400 arbres/ha), l'analyse de la croissance des peupliers à des densités de plantation plus faibles comme c'est le cas en agroforesterie semble pertinente dans le contexte d'introduction des peupliers agroforestiers dans la filière populicole. En ce sens, le comparatif de la croissance des peupliers Koster AF et FC issus du dispositif Peuplier de Lent a été réalisé et a été discuté dans cette partie. L'évolution de la hauteur et du diamètre de ces arbres n'ayant pas été suivi annuellement, les mesures de cette étude ne concernent que les arbres matures échantillonnés sur lesquels les études présentées dans les chapitres suivants ont été faites.

### 3.3.1 Matériels et méthodes

Le descriptif du dispositif et des parcelles AF et FC a été détaillé dans le chapitre 2 (partie 2.2.2). Des détails additionnels sont également précisés dans la publication NIRS Peuplier (partie 4.3). Les densités de plantations sont d'environ 200 arbres/ha pour la parcelle FC et 50 arbres/ha pour la parcelle AF. Comme évoqué dans le tableau 2.1 dans le chapitre 2, aucun suivi de la croissance annuelle des arbres des parcelles AF et FC du dispositif Peuplier n'a été réalisé depuis leur plantation. Seuls les hauteurs et les diamètres à 1,30 m (DBH) des 12 peupliers échantillonnés ont été mesurés lors de leur abattage en avril 2022. Ces grandeurs sont répertoriés dans le tableau 3.1. Deux mesures ont été réalisées pour le diamètre des arbres, une mesure du diamètre orienté Nord-Sud (DBH N-S) et une mesure du diamètre orienté Est-Ouest (DBH E-O). Les rayons de la moelle nord (R1) et de la moelle sud (R2) ont été mesurés afin de démontrer l'excentricité de la moelle et l'ovalisation du tronc, indiquant la présence potentielle de bois de tension. Le rapport entre la hauteur de l'arbre et son diamètre (H/DBH) a été calculé pour chacun des peupliers échantillonnés.

### 3.3. CROISSANCE DU PEUPLIER AGROFORESTIER

L'ovalisation(%) du tronc a été définie par l'équation ci-dessous :

$$Ovalisation(\%) = \frac{DBH_{N-S} - DBH_{E-O}}{DBH_{E-O}} \times 100 \quad (3.1)$$

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel libre R studio, version 4.2.2. Elles ont été considérées comme significatives à une valeur  $p - value < 0,05$ . Les tests de Student et de Wilcoxon ont été utilisés pour comparer les croissances et dimensions des troncs des peupliers issus des deux traitements sylvicoles.

#### 3.3.2 Résultats et discussions

Les diamètres DBH N-S et DBH E-O et les hauteurs des 12 peupliers échantillonnés sont regroupés dans le tableau 3.1 :

TABLE 3.1 – DBH (cm) et hauteur (m) des peupliers AF et FC du dispositif Peuplier de Lent.

Parcelle AF				Parcelle FC			
	DBH (cm)		Hauteur (m)		DBH (cm)		Hauteur (m)
	N-S	E-O			N-S	E-O	
A	30.4	30.0	20.0	G	35.5	33.0	21.2
B	37.0	34.0	20.2	H	32.0	29.0	20.8
C	33.0	28.5	19.3	I	36.0	32.0	22.0
D	37.5	30.0	20.8	J	30.0	33.5	21.0
E	33.0	29.0	19.7	K	36.0	33.0	23.0
F	28.5	31.5	19.5	L	35.0	31.5	21.5
Moyenne	33.8	30.5	19.9	Moyenne	34.1	32.0	21.6

Bien que les peupliers agroforestiers soient plus jeunes de 5 ans par rapport aux peupliers forestiers témoins, leurs dimensions n'en sont pas pour autant très différentes. La hauteur moyenne des peupliers AF est significativement inférieure à celle des peupliers FC, avec une différence de moins de 2 m (19,9 m et 21,6 m respectivement,  $p - value < 0,01$ )(Figure 3.7).

### 3.3. CROISSANCE DU PEUPLIER AGROFORESTIER

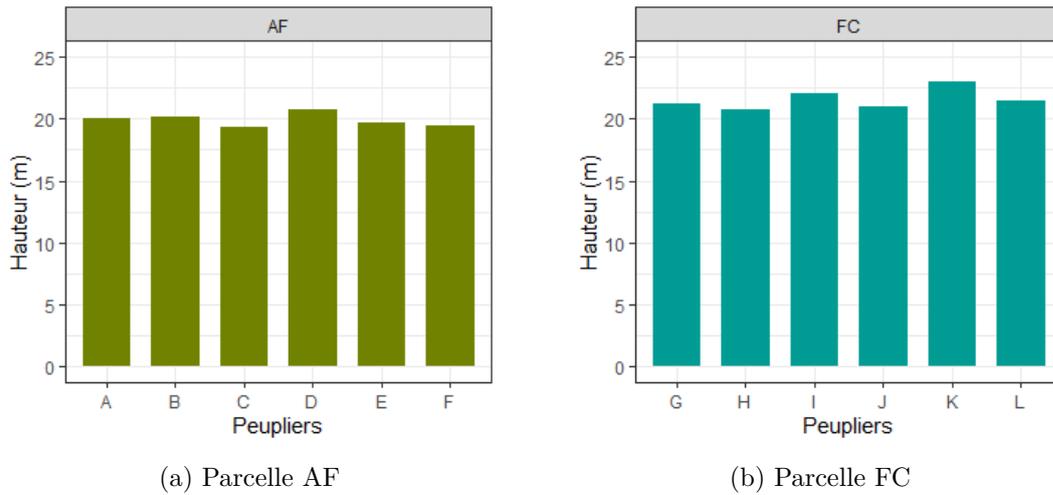


FIGURE 3.7 – Hauteurs des peupliers en fonction du traitement sylvicole.

Leurs diamètres moyens en revanche présentent des valeurs statistiquement similaires, quelque soit leur orientation, avec une  $p$ -value = 1 dans le cas du diamètre orienté Nord-Sud, et une  $p$ -value = 0,2 dans le cas du diamètre Ouest-Est (Figure 3.8). De plus, bien que ces différences ne soient pas significatives, les DBH N-S sont légèrement plus grands que les DBH O-E, et ce dans les deux parcelles. L'ovalisation moyenne des troncs calculée grâce à l'équation 3.1 indique une ovalisation moyenne des troncs beaucoup plus importante dans la parcelle AF (11.2%) que dans la parcelle FC (6.7%), témoignant d'une ovalisation plus importante des troncs dans l'axe du vent dominant dans la parcelle AF.

### 3.3. CROISSANCE DU PEUPLIER AGROFORESTIER

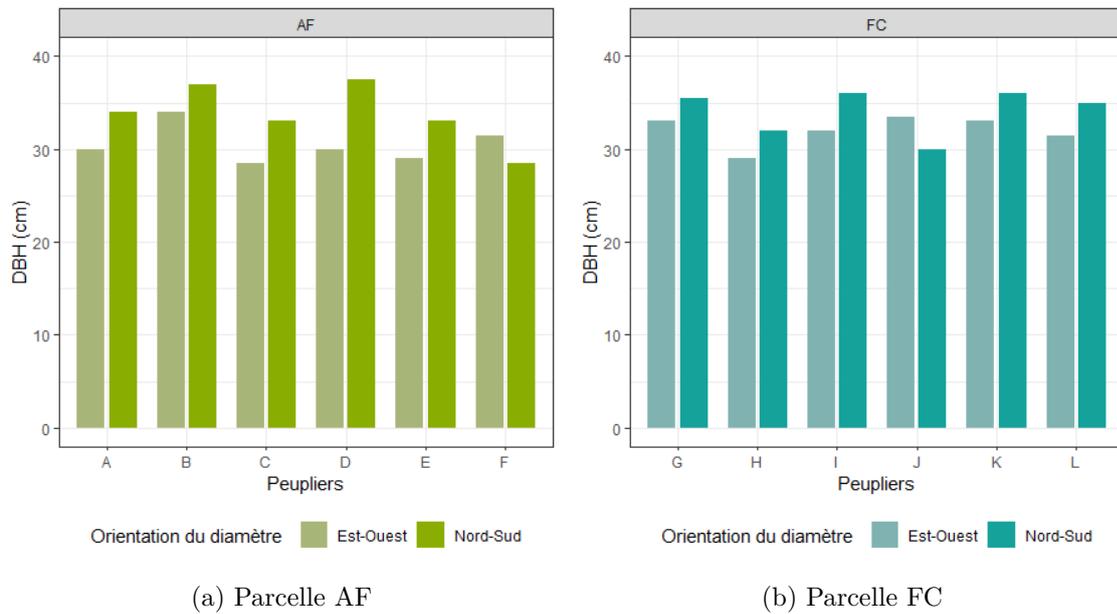


FIGURE 3.8 – DBH des peupliers AF et FC mesuré selon les axes Nord-Sud et Est-Ouest en fonction du traitement silvicole.

Le rapport entre la longueur du rayon Nord-moelle (R1) et le rayon Sud-moelle (R2) utilisé pour évaluer l'excentricité de la croissance des sections transversales des peupliers s'avère significativement plus élevé chez les peupliers AF ( $R1/R2 = 1.20 \pm 0.29$ ) que les peupliers FC ( $R1/R2 = 1.10 \pm 0.29$ ). Ainsi, une légère ovalisation des troncs a été observée pour les deux traitements sylvicoles, le DBH N-S (direction du vent dominant) étant légèrement plus élevé que le DBH E-O (non significatif). Cette ovalisation du tronc et le taux de lignine plus faible chez les peupliers AF laisse présager la présence de bois de tension dans le tronc de ces derniers (voir partie 4.3 présentée dans le chapitre 4). La hauteur des peupliers AF est restée statistiquement inférieure à celle des peupliers FC, mais à ce jour cela s'explique par la différence d'âge entre les peupliers AF et FC. Il en résulte un rapport H/DBH plus élevé pour les peupliers FC que pour les peupliers AF (65.38 pour les peupliers FC et 62.05 pour les peupliers AF, valeur  $p = 0.04$ ). L'augmentation de la croissance secondaire des peupliers AF et l'excentricité de leur moelle résultent probablement du processus thigmomorphogénétique d'acclimatation des arbres de la parcelle agroforestière aux sollicitations mécaniques induites par le vent plus importantes en raison des plus faibles densités de plantation. Ces résultats sont notamment en accord avec les études réalisées sur le sujet, dans lesquelles les arbres les plus exposés au vent étaient plus petits et plus larges que les arbres accompagnés et donc mieux protégés du vent (BONNESOEUR et al., 2016; NIEZ et al., 2018). De plus, dans leur étude menée sur la croissance de jeunes peupliers selon différents traitements sylvicoles (agroforestier, monoculture forestière et forestier avec un mélange d'essences), Thomas et al. (2020) ont mis en évidence une croissance radiale plus impor-

### 3.4. CROISSANCE DU ROBINIER AGROFORESTIER

---

tante chez les peupliers agroforestiers en comparaison aux peupliers issus des deux traitements forestiers, ainsi qu'un taux de croissance en hauteur supérieur (THOMAS et al., 2020).

#### 3.3.3 Conclusion sur la croissance des peupliers en milieu agroforestier

Les peupliers agroforestiers, bien que plus jeunes, présentent des diamètres similaires et des hauteurs plus faibles que les peupliers forestiers témoins, traduisant une plus forte dynamique de croissance secondaire. L'ovalisation légère du tronc dans l'axe du vent dominant, l'excentricité de la moelle et la croissance radiale plus rapide des peupliers AF traduisent un processus de thigmomorphogénèse plus marqué pour les arbres de la parcelle agroforestière en raison de la densité de plantation plus faible que pour ceux issus de la plantation forestière. Ainsi, malgré leur plus jeune âge, la similarité des diamètres des peupliers AF à ceux des peupliers de plantation conventionnel, est un résultat intéressant pour la filière populicole qui suggère que les peupliers agroforestiers pourraient être exploités au même âge voire plus rapidement que les peupliers issus des plantations conventionnelles. Toutefois, l'influence de cette croissance radiale plus rapide sur les propriétés du bois de peuplier et sa qualité doit être étudiée afin d'envisager leur valorisation dans la filière industrielle. Ces différentes analyses seront réalisées dans les chapitres qui suivent.

## 3.4 Acclimatation des arbres au vent en milieu agroforestier : Cas du robinier

Nous terminerons ce chapitre par une étude plus précise de l'incidence des sollicitations mécaniques induites par le vent sur la croissance des arbres dans les systèmes agroforestiers. Nous avons évoqué précédemment le processus de thigmomorphogénèse résultant de l'action mécanique du vent sur l'ensemble de la structure de l'arbre. L'arbre perçoit les déformations qu'il subit et ajuste son développement afin d'acclimater sa structure. Ce phénomène induit des modifications de la croissance de l'arbre connu dans les milieux forestiers où les densités de plantation sont élevées. Ces densités de plantations, comme nous l'avons déjà rappelé à de nombreuses reprises, sont nettement plus faibles dans les systèmes agroforestiers. Pour appréhender au mieux les modifications de la croissance et de la xylogénèse de ces arbres, nous proposons dans cette dernière partie de travailler sur l'acclimatation des arbres du dispositif DIAMS au vent en milieu agroforestier en comparant la croissance en hauteur et en diamètre des jeunes robiniers tuteurés ou laissés libres au vent.

### 3.4.1 Matériels et méthodes

Cette partie de l'étude a été réalisée via le Dispositif Instrumenté en Agroforesterie Méditerranéenne sous contrainte hydrique (DIAMs) décrit dans la partie 2.2.3 du chapitre 2. Nous

### 3.4. CROISSANCE DU ROBINIER AGROFORESTIER

rappellerons qu'un tiers des arbres dans chaque parcelle a été tuteuré, les deux tiers restant étant destinés à être abattus lors de l'éclaircie prévue initialement 5 ans après leur plantation. Les mesures de la hauteur et du diamètre des robiniers ont été réalisées annuellement de 2021 à 2023, selon les modalités suivantes :

- En 2021, 2022 et 2023, l'intégralité des arbres des trois blocs de la plateforme DIAMs ont été mesurés. Les hauteurs ont été prises à l'aide d'un dendromètre laser et les circonférences grâce à un mètre ruban. La hauteur et le diamètre d'environ 710 robiniers AF et 1100 robiniers FC ont été mesurés.
- Les robiniers ont subis un élagage de leur houppier, parfois drastique, en janvier-février 2021 et à la même période en 2022, juste avant les mesures. Un sous échantillonnage de robiniers non taillés à été réalisé.

Dans le dispositif DIAMs, une partie des arbres (environ 50%) a été plantée en 2017, et l'autre partie en 2018. Les robiniers de 2017 ayant une saison végétative de plus, nous ne traiterons dans cette partie du mémoire que la croissance de ceux-ci. L'échantillonnage réalisé et le nombre de robiniers mesurés par modalité de traitement sont détaillés dans le tableau 3.2 ci-dessous. Au total, 97 arbres constituent le sous-échantillonnage des arbres non-taillés contre 752 arbres taillés.

TABLE 3.2 – Échantillonnage et effectifs des robiniers en fonction du traitement sylvicole (AF ou FC), du tuteurage (1 : arbre avec un tuteur, 0 : arbre sans tuteur), et de la taille du houppier (taillé ou non taillé)

	Parcelles AF			Parcelles FC		
	Tuteur 1	Tuteur - 0	Total	Tuteur 1	Tuteur 0	Total
Non taillés	19	25	44	20	33	53
Taillés	103	158	261	161	330	491
<i>Total</i>	<i>122</i>	<i>183</i>	<i>295</i>	<i>181</i>	<i>363</i>	<i>544</i>

#### 3.4.2 Résultats

L'évolution de la croissance des robiniers AF et FC de 2021 à 2023 est représentée par la figure 3.9 pour la hauteur et la figure 3.10 pour le DBH.

##### 3.4.2.1 Croissance des robiniers taillés

En 2021, les hauteurs moyennes des arbres taillés, alors âgés de 4 ans, sont similaires entre les parcelles AF et FC. Les robiniers AF tuteurés ont une hauteur moyenne proche de celle des robiniers tuteurés FC ( $3.4 \pm 0.6$  m et  $3.6 \pm 0.7$ m respectivement, p-value = 0.2). De la même manière, les robiniers non tuteurés AF et FC présentent des hauteurs moyennes similaires (3.4

### 3.4. CROISSANCE DU ROBINIER AGROFORESTIER

---

$\pm 0.6$  m et  $3.3 \pm 0.7$  m respectivement). Dans la parcelle AF, aucun effet significatif du tuteurage n'a été observé, ce qui n'est pas le cas dans la parcelle FC où les robiniers tuteurés sont légèrement plus hauts que les autres ( $p$ -value  $< 0.01$ ). Si les hauteurs moyennes sont relativement similaires entre les robiniers des deux traitements sylvicoles, une différence significative entre leur DBH moyen est observée. Aucun effet du tuteurage n'est relevé dans les deux parcelles et les robiniers tuteurés et non tuteurés AF présentent un DBH moyen statistiquement plus élevé ( $4.3 \pm 1.2$  cm) que celui des robiniers FC ( $3.7 \pm 0.9$  cm).

En 2022, les hauteurs moyennes des robiniers AF et FC, tuteurés et non tuteurés sont statistiquement similaires. La hauteur moyenne des robiniers agroforestiers est d'environ  $3.9 \pm 0.7$  m tandis que celui des robiniers FC est de  $4.0 \pm 0.9$  m. À nouveau, les robiniers AF présentent des DBH supérieurs à ceux des robiniers FC, avec une valeur moyenne de  $5.2 \pm 1.4$  cm contre  $4.6 \pm 1.1$  cm dans le cas des robiniers FC. Aucun effet du tuteurage n'est observé au sein des deux traitements sylvicoles.

En 2023, des différences significatives apparaissent entre les hauteurs moyennes des robiniers en fonction de la parcelle. À nouveau, le tuteurage ne semble pas avoir eu d'influence sur la croissance primaire des arbres. On notera ainsi une hauteur moyenne inférieure pour les robiniers AF ( $4.7 \pm 1.0$  m) en comparaison aux robiniers FC ( $5.2 \pm 1.2$  m). En revanche, le DBH moyen des robiniers agroforestier est toujours supérieur à celui des témoins forestiers, qu'ils soient tuteurés ou non ( $6.8 \pm 1.7$  cm et  $5.6 \pm 1.4$  cm, respectivement).

#### 3.4.2.2 Croissance des robiniers non taillés

En 2021, les croissances en hauteur et en diamètre des robiniers non taillés suivent les mêmes dynamiques que les robiniers taillés, avec des hauteurs similaires en fonction du traitement sylvicole et du tuteurage, et des DBH moyens plus élevés chez les robiniers agroforestiers. En moyenne, les robiniers AF non taillés mesurent  $3.7 \pm 0.5$  m de hauteur et leur tige montre un diamètre de  $4.9 \pm 0.8$  cm, tandis que les robiniers AF non taillés ont une hauteur moyenne de  $3.6 \pm 0.6$  m et un DBH moyen de  $3.9 \pm 0.8$  cm.

À nouveau en 2022, aucun effet du traitement sylvicole ou du tuteurage n'est relevé concernant la hauteur des robiniers, tandis que le DBH est toujours supérieur dans la parcelle AF. Les robiniers AF ont une hauteur moyenne de  $4.1 \pm 0.8$  m et un DBH moyen de  $5.8 \pm 1.0$  cm. Les robiniers FC ont une hauteur et un DBH moyens de  $4.2 \pm 1.0$  m et  $4.8 \pm 1.0$  cm respectivement.

En 2023 en revanche, le tuteurage semble avoir un effet sur la croissance des arbres tuteurés en fonction de leur traitement sylvicole, les robiniers AF non tuteurés ayant une hauteur inférieure ( $4.6 \pm 0.8$  m) aux robiniers FC non tuteurés ( $5.7 \pm 1.3$  m,  $p$ -value  $< 0.01$ ). Les robiniers AF tuteurés et FC tuteurés présentent des hauteurs similaires ( $4.9 \pm 0.9$  m et  $5.3 \pm 0.9$  m respectivement,  $p$ -value = 0.29).

### 3.4. CROISSANCE DU ROBINIER AGROFORESTIER

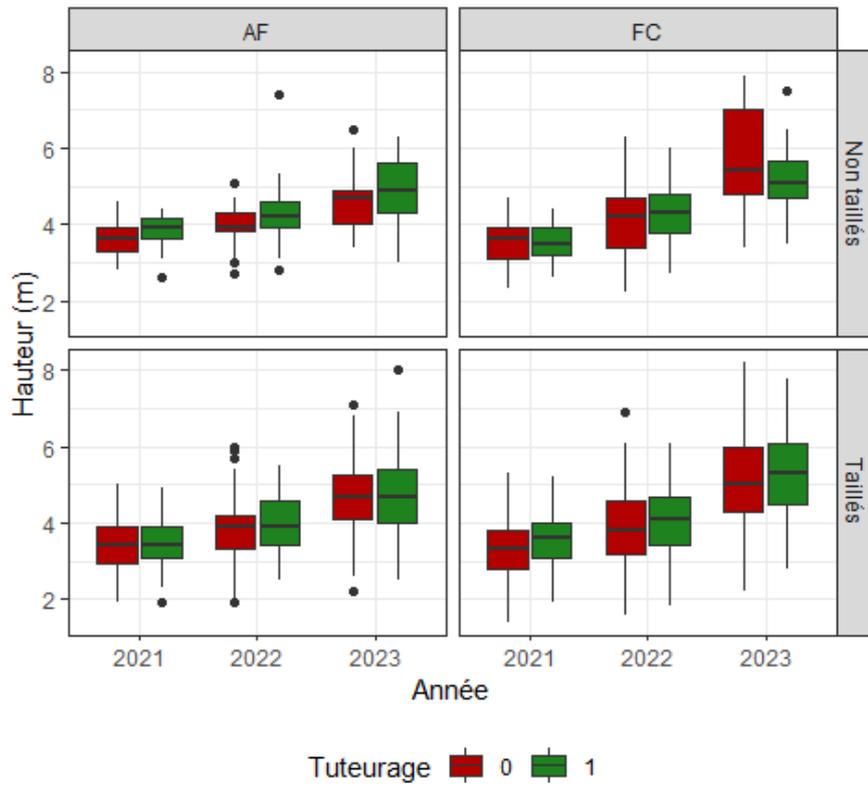


FIGURE 3.9 – Évolution de la hauteur (m) des robiniers tuteurés et non tuteurés de 2021 à 2023, en fonction du traitement sylvicole et de la modalité de taille du houppier. Le tuteurage "1" correspond aux arbres tuteurés, le "0" aux arbres témoins non tuteurés.

### 3.4. CROISSANCE DU ROBINIER AGROFORESTIER

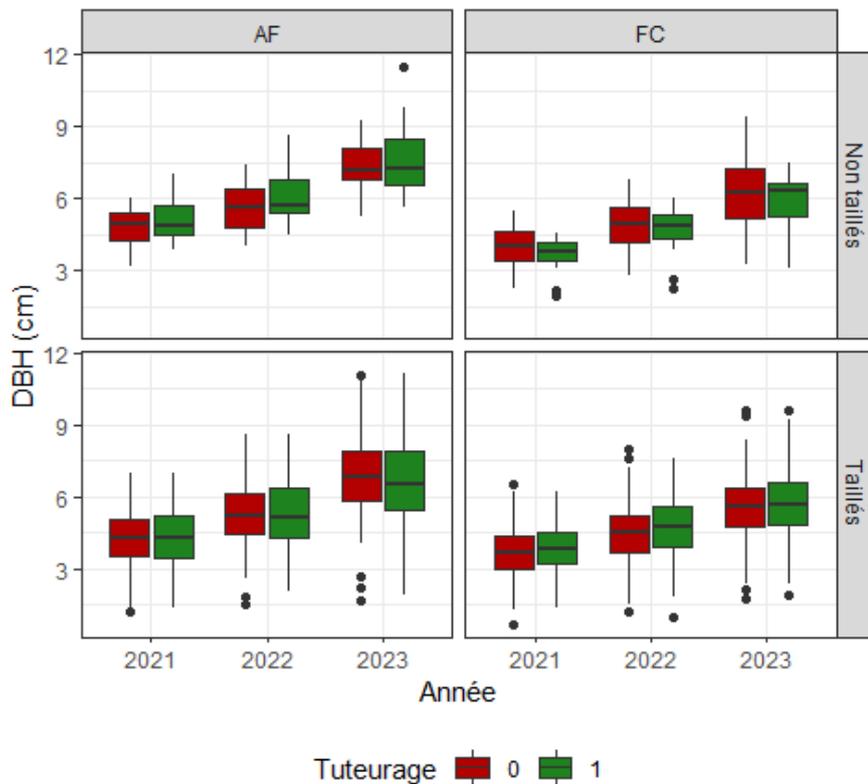


FIGURE 3.10 – Évolution du DBH (cm) des robiniers tuteurés et non tuteurés de 2021 à 2023, en fonction du traitement sylvicole et de la modalité de taille du houppier. Le tuteurage "1" correspond aux arbres tuteurés, le "0" aux arbres témoins non tuteurés.

#### 3.4.3 Discussion

De manière générale et à ce jeune stade de développement de l'arbre, le tuteurage ne semble pas avoir eu de forte influence sur la croissance des robiniers. Au sein d'une même parcelle, les robiniers ont globalement les mêmes dynamiques de croissance quelque soit leur tuteurage. C'est à dire que les robiniers AF non tuteurés présentent des hauteurs et des DBH moyens similaires aux robiniers AF tuteurés. Les mêmes observations sont faites dans les parcelles FC, à l'exception de l'année 2021 où les robiniers taillés tuteurés sont plus hauts que les robiniers taillés non tuteurés. Cette absence globale d'effet peut s'expliquer par un tuteurage trop lâche de beaucoup de robiniers (voir Figure 3.11) qui n'a pas suffisamment empêché le mouvement des arbres face au vent durant les trois années de croissance mesurées. En effet, lors de la mise en place des tuteurs, l'objectif n'était pas de limiter au maximum leur exposition à des sollicitations mécaniques, mais simplement d'assurer un soutien au tronc des jeunes robiniers destinés à être conservés après éclaircie. De plus, le renforcement des tuteurs des 97 robiniers sous échantillonnés (non taillés) en 2021 a été détérioré pour la plupart des arbres. Pour des raisons techniques, ce

### 3.4. CROISSANCE DU ROBINIER AGROFORESTIER

---

renforcement n'a pas pu être reconduit les années suivantes. Dans les cas où des différences sont observées entre les hauteurs des arbres tuteurés et non tuteurés au sein d'un même traitement sylvicole (en 2021 dans la parcelle FC dans le cas des robiniers taillés et en 2023 dans le cas des robiniers non taillés), les robiniers tuteurés sont toujours plus hauts que ceux non tuteurés. Cela confirme que les arbres les plus soumis au vent (les non tuteurés) manifestent une acclimatation thigmomorphogénétique plus marquée que les arbres moins sollicités mécaniquement.



FIGURE 3.11 – Exemple de tuteurage trop lâche sur un robinier agroforestier. Son mouvement face à l'action du vent s'avère peu limité.

Toutefois, les tendances observées dans cette étude révèlent que les robiniers agroforestiers ont une croissance secondaire plus dynamique que les robiniers forestiers témoins, et ce pour les trois années de mesures. En ce qui concerne la croissance primaire, les analyses doivent prendre en compte que les robiniers ont été taillés en janvier-février 2021 et à la même période de l'année 2022, c'est à dire avant que les mesures ne soient réalisées. Ces réductions du houppier des robiniers étaient techniquement nécessaires pour assurer le bon développement des arbres et limiter leur débordement sur les cultures et dans les interlignes forestières. Même si la taille ne consistait parfois qu'à une simple réduction de la largeur du houppier et non pas de sa hauteur, il est difficile de connaître précisément l'impact de cette taille sur les hauteurs totales des robiniers en 2021 et en 2022. En 2023 cependant, aucune taille n'a été faite sur les arbres et il apparaît que les robiniers (taillés les années précédentes) agroforestiers sont plus petits que les robiniers forestiers. En ce qui concerne les robiniers issus du sous échantillon d'arbres qui n'ont jamais été taillés, les tendances observées sont relativement similaires à celles des robiniers taillés, c'est à dire qu'en 2021 et 2022, les hauteurs moyennes des robiniers AF ne sont pas statistiquement différentes de celles des robiniers FC. En 2023 en revanche, les robiniers

### 3.4. CROISSANCE DU ROBINIER AGROFORESTIER

---

AF non tuteurés sont plus petits que leurs témoins forestiers tuteurés. Ainsi, dans le cas où des différences sont observées en terme de croissance primaires entre les arbres AF et FC, les hauteurs des robiniers agroforestiers sont toujours les plus faibles. Dans le cas où des différences intraparcellaires sont identifiées entre les arbres tuteurés et non tuteurés, ce sont à nouveau les arbres les plus soumis au vent (les non tuteurés) qui présentent les hauteurs les plus faibles. Ces résultats sont représentatifs d'une acclimatation des arbres aux sollicitations mécaniques dues au vent (NIEZ et al., 2018).

De plus, il est à noter qu'une très forte variabilité existe entre l'ensemble des arbres d'une même modalité. Par exemple, en 2021, le plus petit arbre agroforestier mesurait 1.9 m alors que le plus haut atteignait 5 m, tandis que dans la parcelle forestière, la valeur de hauteur la plus faible était de 0.9 m alors que la plus élevée était de 5.3 m. De telles différences sont expliquées par la forte variabilité génétique entre les arbres qui ne sont pas issus d'un seul et même clone.

En définitive, le suivi des croissances radiales et en hauteur des robiniers agroforestiers et forestiers dans le dispositif DIAM's met à nouveau en lumière le processus de thigmomorphogénèse plus important dans les parcelles agroforestières et qui se traduit par des diamètres supérieurs et des hauteurs équivalentes ou inférieures à ceux des robiniers forestiers.

#### 3.4.4 Conclusion sur la croissance des robiniers en milieu agroforestier

Le suivi de la croissance radiale et de la croissance en hauteur des robiniers agroforestiers et forestiers dans le dispositif DIAMs met à nouveau en lumière une réponse de thigmomorphogénèse plus importante dans les parcelles agroforestières, qui se traduit par des diamètres supérieurs et des hauteurs équivalentes ou inférieures à ceux des robiniers forestiers. Ces résultats démontrent à nouveau l'acclimatation mécanique des arbres agroforestiers à l'environnement venteux fluctuant dans lequel ils se développent et qui se traduit principalement par une croissance radiale plus forte que pour les arbres moins sollicités. Concernant les dynamiques de croissance en hauteur, les résultats sont plus variables que pour la croissance radiale puisque les robiniers les plus soumis au vent sont soit légèrement plus petits soit de taille équivalente à celles des arbres les moins sollicités. Ces résultats doivent prendre en compte la taille des arbres en 2021 et 2022 qui a pu impacter directement les mesures effectuées sur les robiniers ces mêmes années. De plus, les robiniers de cette étude sont encore jeunes puisqu'ils avaient seulement 3 ans au moment de la première mesure en 2021, et 5 ans en 2023. Un suivi de leur croissance jusqu'à leur exploitation pourrait révéler des différences de dynamiques plus marquées entre les arbres AF et FC et permettrait d'obtenir de solides tendances concernant l'acclimatation des arbres agroforestiers à l'environnement venteux dans lequel ils se développent.

## 3.5 Synthèse

Les trois études menées sur la hauteur et le diamètre des noyers, des peupliers et des robiniers s'accordent à dire que la croissance radiale des arbres agroforestiers est toujours plus forte que celle des arbres forestiers. L'analyse de l'ovalisation du tronc des peupliers a mis en évidence une ovalisation plus forte des peupliers agroforestiers que forestiers. Ces deux paramètres sont révélateurs d'une acclimatation mécanique de ces arbres agroforestiers plus fortement sollicités par le vent. Les conclusions concernant la croissance en hauteur des arbres en milieu agroforestier sont plus difficiles à tirer puisque certains facteurs peuvent influencer le développement et les mesures de la hauteur des arbres dans chacun des dispositifs. Cela témoigne de la grande difficulté de conduire de comparatifs toutes choses égales par ailleurs. En effet, la forte variabilité du sol entre les parcelles AF et FC dans le dispositif RAP, la différence d'âge entre les peupliers AF et FC et la taille des houppiers des robiniers dans le dispositif DIAMs ont pu impacter le développement des arbres et engendrer des biais et des incertitudes dans les mesures. Malgré ces contraintes, les résultats concernant la production de biomasse par arbre (ici, dans le tronc) en milieu agroforestier sont encourageants, puisque la croissance en hauteur des arbres agroforestiers ne semble pas fortement réduite en comparaison aux arbres forestiers témoins et que leur croissance radiale est plus importante.

Cette acclimatation thigmomorphogénétique des arbres agroforestiers aux milieux venteux, traduite par une allocation de la biomasse différente des arbres forestiers, ne module pas uniquement la quantité de bois produit par l'arbre mais induit aussi des modifications de la xylogénèse qui conduit à la modulation des propriétés du bois formé ; comme cela a déjà été démontré dans les récentes études menées sur le sujet (NIEZ et al., 2020 ; ROIGNANT et al., 2018). La caractérisation du bois agroforestier ainsi formé, tant du point de vue de ses propriétés structurelles, chimiques et physiques, que de sa qualité en terme de transformation et de valorisation, fait l'objet des chapitres suivants.

## Chapitre 4

# Propriétés physiques et chimiques des arbres agroforestiers

### 4.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'arbre agroforestier acclimate son développement aux conditions spatiales particulières des systèmes agroforestiers qui l'exposent davantage au vent, à la lumière et à sa disponibilité en eau. Les modifications qui en découlent se traduisent par une augmentation de la biomasse produite, notamment au niveau du diamètre des axes, avec une croissance radiale plus importante chez les individus agroforestiers ; ces observations étant similaires pour les trois essences étudiées. Nos observations sont pour la plupart en adéquation avec les études centrées sur le processus d'acclimatation mécanique par thigmomorphogénèse que nous avons citées dans le chapitre 3. Dans ce contexte, ROIGNANT et al., 2018 ont mis en lumière d'importantes modifications de la structure anatomique des arbres sollicités mécaniquement qui conduisent à la formation d'un bois spécifique, appelé "bois de flexion", différent du bois normal et dont les caractéristiques ont été présentées dans la synthèse bibliographique (voir partie 1.4.1.7). Les résultats obtenus lors de ces précédents travaux découlent d'expérimentations en conditions contrôlées sur de jeunes clones de peupliers hybrides. Leur extension aux systèmes forestiers a été validée par Bonnesoeur (BONNESOEUR et al., 2016) mais aucun travaux ne reportent de résultats sur les systèmes agroforestiers. Nous proposons dans ce chapitre de caractériser le bois des arbres dont nous avons étudié la croissance dans la partie précédente, dans un premier temps à travers l'étude de leur composition biochimique puis dans un second temps à travers la caractérisation de leurs propriétés physiques.

La composition biochimique du bois régit un grand nombre de ses propriétés. Elle résulte de nombreux facteurs, tels que la génétique ou les conditions environnementales et varie en fonction de l'évolution de ces derniers. Dans le cas des molécules structurales, la cellulose, les hémicellu-

## 4.1. INTRODUCTION

---

loses et la lignine peuvent renseigner sur la structure pariétale du bois et des modifications de leur proportions peuvent révéler la formation de bois particuliers mis en place par l'arbre lors de son développement tels que le bois juvénile (LU et al., 2021 ; MORAIS et al., 2017) ou le bois de réaction (PILATE et al., 2004). D'autres molécules telles que les extractibles, malgré leur plus faible proportion, notamment pour les essences étudiées dans ce travail de doctorat, confèrent au bois de nombreuses propriétés jouant sur la qualité et la valeur finale de l'arbre. Dans le cas du noyer particulièrement, leur quantité et leur nature lui confèrent une très bonne durabilité (GUPTA et al., 1972) mais sont également responsables de son esthétique en lui apportant une couleur très appréciée.

La composition chimique du bois n'est pas la seule à être affectée par les conditions de croissance de l'arbre. La structure anatomique et certaines propriétés physiques peuvent être modifiées lorsque l'arbre évolue dans un environnement fluctuant. C'est le cas notamment de la masse volumique, de l'angle des microfibrilles de cellulose, de l'orientation de la pente de fil ou encore du taux d'humidité, dont les modifications peuvent entraîner des variations de certaines propriétés essentielles à l'arbre, telles que ses propriétés mécaniques.

L'étude de ces propriétés physiques et chimiques permet d'appréhender l'influence des conditions de croissance dans les milieux agroforestiers sur la qualité finale du bois d'oeuvre.

### Démarche de l'étude

Nous nous intéresserons dans un premier temps à la composition biochimique des bois issus d'arbres agroforestiers, en commençant par le cas du noyer et l'influence des conditions de croissances des systèmes agroforestiers sur le phénomène de duraminisation. Nous débuterons par une étude menée dans le cadre du projet Agrobranche, soutenu par l'ADEME (LIAGRE et al., 2022) et réalisée en collaboration avec Roxane Dodeler, étudiante aux Arts et Métiers de Cluny, dans le cadre de son stage de fin d'études. La comparaison du taux d'extractibles présents dans le bois des branches, des nœuds et du tronc à proximité des branches a été effectuée lors de ce travail, puis complétée par l'identification de la nature de ces extractibles prélevés dans ces trois compartiments distincts de l'arbre. Cette étude sera par la suite focalisée sur la partie du tronc, à travers l'analyse de la variation radiale du taux d'extractibles mais également par l'évaluation du taux de lignine et de cellulose chez les noyers agroforestiers par analyses NIRS. La seconde partie de ce chapitre sera consacrée au peuplier agroforestier et portera sur l'évaluation de la quantité de lignine et de cellulose dans le tronc des peupliers issus du dispositif de Lent. Trois autres propriétés physiques seront ensuite au cœur de notre étude : les variations radiales de l'angle des microfibrilles, de la densité à l'échelle du cerne et du taux d'humidité lié notamment à la présence de faux-cœur. L'ensemble de nos résultats seront discutés au regard des stratégies mises en place par les arbres agroforestiers durant leur acclimatation aux conditions de croissances

particulières rencontrées dans les systèmes agroforestiers et nous permettront d'appréhender le dernier chapitre qui portera sur la valorisation des arbres agroforestiers appliquée au cas du déroulage.

## 4.2 Composition biochimique et duraminisation chez le noyer hybride agroforestier

### 4.2.1 Valorisation du bois des branches d'arbres agroforestiers

Les pratiques agroforestières nécessitent un entretien rigoureux des arbres, en particulier une coupe régulière de leurs branches permettant à la fois de maîtriser leur croissance (en particulier dans le cas des haies), de limiter leur ombrage sur les cultures mais aussi d'éviter toute gêne lors du passage des engins agricoles. À cela s'ajoute un élagage nécessaire afin d'obtenir un tronc possédant le moins de nœuds possible et donc une bille de pied de meilleure qualité. Ces nombreuses pratiques d'entretien sylvicole produisent une quantité importante de biomasse sous forme de branches qui sont à ce jour très peu valorisées. Aujourd'hui, cette biomasse est principalement valorisée dans les filières bois énergie ou Bois Raméal Fragmenté (BRF). L'utilisation sous forme de BRF présente cependant des limites, notamment en terme de coût et de volume produit limité qui en font une solution de valorisation très localisée et pour de très faibles quantités (NOUET et ALBARIC, 2009). D'autres pistes au caractère plus innovant restent ainsi à explorer afin de valoriser cette biomasse riche en molécules d'intérêt telles que les extractibles (MORIKAWA et al., 2014; F. XU et al., 2006).

Le projet "Agrobranche" est soutenu par l'Ademe et vise à améliorer le modèle économique de l'agroforesterie en valorisant la biomasse raméale agroforestière dans les domaines des matériaux et de la chimie biosourcés (LIAGRE et al., 2022). L'étude qui suit prend part à ce projet et fait suite au travail de Florence Terrasse (TERRASSE et al., 2021). Son double objectif visait à la fois la comparaison et la prédiction des taux d'extractibles du bois issu des branches, des nœuds, des troncs et des écorces de noyers agroforestiers et forestiers. L'ensemble du travail réalisé et les principaux résultats obtenus à travers cette étude sont présentés dans la publication présentée ci-dessous (HEIM, DODELER et al., 2022).

**Comparison of extractive chemical signatures among branch, knot and bark wood fractions from forestry and agroforestry walnut trees (*Juglans regia* × *J. nigra*) by NIR spectroscopy and LC-MS analyses.**

Lucie Heim<sup>1,2,3</sup>, Roxane Dodeler<sup>1,2,3</sup>, Loïc Brancheriau<sup>1,2</sup>, Remy Marchal<sup>3</sup>, Nabila Boutahar<sup>1,2</sup>, Sylvain Lotte<sup>1,2</sup>, Stéphane Dumarçay<sup>4</sup>, Philippe Gérardin<sup>4</sup> and Kevin Candelier<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, Research Unit BioWooEB, 34000, Montpellier, France

<sup>2</sup>BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

<sup>3</sup>Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP, UBFC, HESAM Université, F-71250 Cluny, France

<sup>4</sup>Université de Lorraine, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois, Nancy (France)

iForest - Biogeosciences and Forestry, Volume 15, Issue 1, Pages 56-62 (2022) doi : <https://doi.org/10.3832/ifor3973-014> Published : Feb 08, 2022 - Copyright © 2022 SISEF

# Comparison of extractive chemical signatures among branch, knot and bark wood fractions from forestry and agroforestry walnut trees (*Juglans regia* × *J. nigra*) by NIR spectroscopy and LC-MS analyses

Lucie Heim<sup>(1-2-3)</sup>,  
Roxane Dodeler<sup>(1-2-3)</sup>,  
Loïc Brancheriau<sup>(1-2)</sup>,  
Remy Marchal<sup>(3)</sup>,  
Nabila Boutahar<sup>(1-2)</sup>,  
Sylvain Lotte<sup>(1-2)</sup>,  
Stéphane Dumarçay<sup>(4)</sup>,  
Philippe Gérardin<sup>(4)</sup>,  
Kevin Candelier<sup>(1-2)</sup>

Walnut agroforestry systems require regular tree pruning, generating a large volume of biomass residues which are mainly valorized as wood-energy, Ramial Chipped Wood (RCW) or animal litter. However, walnut is recognized as a rich source of different chemical compounds, which could be recovered as valuable chemicals. This study aims to improve the knowledge on the composition of the water and ethanol extractive contents of wood, knot and bark fractions from walnut branches, harvested in agroforestry (AF) and traditional forestry control (FC) systems. LC-MS analyses were carried out to identify the chemical composition of extracts. Additionally, all samples were analyzed by near-infrared (NIR) spectroscopy with the aim of developing a fast tool to distinguish walnut branches, knots and bark wood fractions from trees grown under agroforestry and plantation management. Extractive contents and chemical composition of AF and FC wood samples were slightly different among branch, knot and bark. Despite these small chemical differences, PLS-DA models based on NIRS measurements can distinguish among wood samples from walnut trees grown under different silvicultural regimes. In addition, in the both forestry systems, branch and knot extractive contents were significantly lower than those of bark specimens. Principal Component Analyses (PCA) based on NIR-spectrometry of raw samples revealed that the chemical composition of branch and knot woods are similar to each other and are very different compared to those of bark samples. This study provides new knowledge on branch woods from agroforestry systems, which are still very under-studied at present.

**Keywords:** Agroforestry, Bark, Branches, Extractives, Knot, Walnut

## Introduction

Agroforestry is based on the combination of trees and crops cultivation. Compared to traditional arable and forestry systems, this practice makes available resources that can be more effectively exploited, while respecting the environment with an obvious landscape benefit (Dupraz & Liagre 2019). Agroforestry allows for the diversification of farm activities and involves a better use of environmental resources. In addition, agroforestry farms can become over time less dependent on crop subsidies, and less susceptible to crop price variations, as timber generates a significant part of their income (Dupraz et al. 2005). In addition to the potential valorization of standing wood, agroforestry systems require regular tree pruning, thus generating a large volume of biomass residues over the entire period of exploitation. These agroforestry wastes are today mainly valorized as wood-energy, Ramial Chipped Wood (RCW) or animal litter (Malignier & Balaguer 2017).

Walnut trees have high marketing demand in Europe, due to their high quality timber. The walnut tree is perfectly suitable to agroforestry system, because of the relatively low competition for light

with crops due to its characteristics such as a more open crown, late leafing and early leaf fall. In addition, walnut tree leaves form a good litter which speeds up nutrient cycling (Pardon et al. 2020). Walnut tree is also recognized as a rich source of many valuable chemicals from the kernel, fresh green fruit, husk, shell, skin, bark, leaves, and root, which are largely used by food, cosmetic and pharmaceutical industries. In this respect, all parts of walnut tree are an excellent source of highly active compounds with antioxidant, antimicrobial and insecticidal potential (Salejda et al. 2016).

In general, wood from branches and bark has been poorly investigated as compared to trunk wood. This lack of information prevents branch wood from entering many productive paths. Recent studies highlighted that the chemical signature in extractives (composition and rate) is different among tree organs (Jahanban-Esfahlan et al. 2019). For several woody species, stem knots and bark have been particularly studied, and in most cases, the knots resulted richer in extractives than the trunk and branches in both hardwoods and softwoods (Košíková 2009, Kebbi-Benkeder et al. 2015). The branches also seem to be

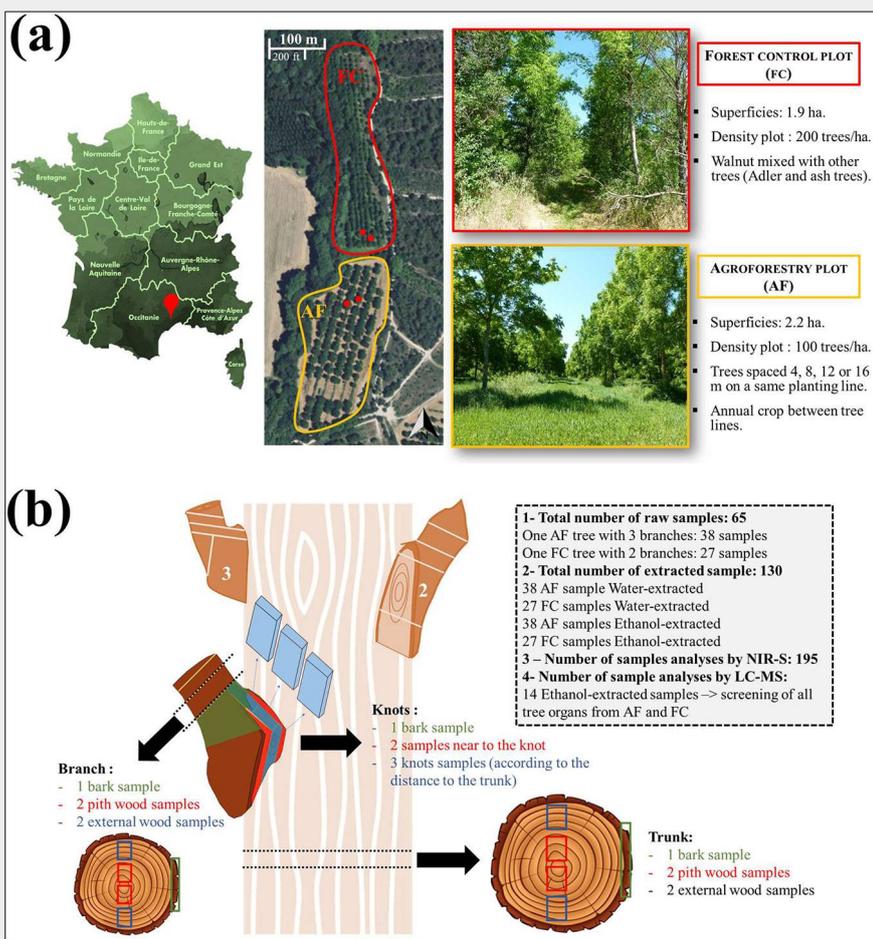
□ (1) CIRAD, Research Unit BioWooEB, 34000, Montpellier (France); (2) BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier (France); (3) Arts et Metiers Institute of Technology, LABOMAP, HESAM University F-71250, Cluny (France); (4) Université de Lorraine, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois, Nancy (France)

@ Kevin Candelier ([kevin.candelier@cirad.fr](mailto:kevin.candelier@cirad.fr))

Received: Sep 13, 2021 - Accepted: Dec 16, 2021

**Citation:** Heim L, Dodeler R, Brancheriau L, Marchal R, Boutahar N, Lotte S, Dumarçay S, Gérardin P, Candelier K (2022). Comparison of the extractives chemical signatures among branch, knot and bark wood fractions from forestry and agroforestry Walnut (*Juglans regia* × *J. nigra*), by NIR-Spectroscopy and LC-MS analyses. *iForest* 15: 56-62. - doi: [10.3832/ffor3973-014](https://doi.org/10.3832/ffor3973-014) [online 2022-02-08]

Communicated by: Luigi Todaro



**Fig. 1 - (a)** Walnut trees selection in the agroforestry (AF) and forestry control (FC) plots at the Restinclières farm (southern France); **(b)** description of the sampling schema, processing and selection of the wood samples.

richer in extractives than the trunk clear wood, though they are poorer than the knots (Xu et al. 2007, Morikawa et al. 2014). Terrasse et al. (2021) showed that the content in extractives of walnut tree was quite similar in branches and trunks, both in terms of absolute value and distribution. Indeed, the extractive content decreases along the branch with the distance to the trunk and slightly increases radially with the distance to the pith.

The content in extractives can vary according to many factors, including the environment, the genetic make-up, tree age and the season (Toshiaki 2001, Haupt et al. 2003). Recent studies demonstrated that changes in environmental conditions during growth can significantly alter the heartwood extractive content in some species. If such variation in heartwood extractives affect wood properties, then silvicultural treatments and changes in forest management regime may affect the value of the derived wood products (Taylor et al. 2006).

The NIR (Near-InfraRed) spectroscopy has been efficiently used for the assessment of chemical properties of walnut wood (Terrasse et al. 2021). Schimleck et al. (2003) showed that it is possible to accurately calibrate NIR models for a wide

range of species that represent different taxa, wood chemistry and physical properties. NIR absorbance spectra are related to the chemical composition of the tested wood sample (Leblon et al. 2013).

This study aims to improve the knowledge about the hydrophilic extractive contents of walnut trees and their chemical compositions (by LC-MS analyses), to investigate the potential of branch wood from agroforestry practices as base material to develop green chemistry and/or to manufacture biomaterials. NIR-spectroscopy was applied with the aim of developing a fast tool to assess the branch wood properties from agroforestry (AF) and forestry (FC) walnut branches, knots and wood fractions.

**Material and methods**

**Experimental site**

The experiment was carried out at the Restinclières farm in southern France (43° 42' 59" N, 03° 51' 33" E; elevation 61 m a.s.l.). Two plots with 25-years-old walnut trees were established: an agroforestry plot (AF) with 140 trees, and a forestry control plot (FC) with 235 trees. The initial planting density was identical in both plots.

A thinning in 2004 reduced the density at the AF plot to 100 trees ha<sup>-1</sup>, with trees spaced 4, 8, 12 or 16 m along a same planting line. Between each line, winter cereal crops were cultivated. In the FC plot, the walnut trees were mixed with alders (*Alnus cordata* [Loisel.] Duby) and ash (*Fraxinus excelsior* L.), with an overall density of about 200 trees ha<sup>-1</sup>. In both plots, tree rows were oriented in north-south direction (Fig. 1a).

**Tree selection**

Two hybrid walnut (*Juglans nigra* × *J. regia*) trees from the AF plot and two from the FC plot were chosen (Fig. 1a) and harvested in February 2020 in order to limit the seasonal impact on chemical composition of wood (e.g., starch in sapwood). The sample trees were selected in the distal part of their respective plots to avoid the effect of soil and water exposure variations.

**Samples repartitions**

The sampling details are summarized in Fig. 1b. A similar sampling schema was applied to each trunk and branch of the selected trees at both AF and FC plots. The total number of samples, including branch and trunk wood, knot wood and bark, was 195. All of these samples were analyses by NIR-Spectroscopy, while only a representative subset of 14 ethanol-extracted samples were characterized by LC-MS analyses.

**Samples preparation and conditioning**

Each of the 65 raw samples (Fig. 1b) from AF and CF plots was firstly oven-dried at 103 ± 2 °C for 24 hours, and then ground and passed through different sieves to obtain particles ranging 0.2-0.5 mm. Twenty grams of each sample were then stabilized at a moisture content (MC) of 12% (stabilization in an humid air at 20 ± 2 °C and 65 ± 5% RH) before NIR-S analyses and extraction processes.

**Extraction processes**

All experimental procedures for the determination of the extractive content were adapted with minor modifications from Rowell et al. (2005).

Each sample was oven-dried at 103 °C to determine its initial anhydrous mass ( $m_0$ ); then 15 g (in dry basis) was extracted in a Soxhlet with ethanol (Sigma Aldrich, 32201-M) during 8 hours. After this first extraction, the sample was oven-dried again until mass stabilization ( $m_1$ ), before being submitted to a second extraction with hot distilled water for 7 hours, and then dried once again at 103 °C to obtain the final anhydrous mass ( $m_2$ ).

The extractive contents were determined according to the following equations (eqn. 1, eqn. 2):

$$E_{eth}(\% DW) = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$E_{\text{water}} (\% \text{ DW}) = \frac{m_1 - m_2}{m_0} \cdot 100 \quad (2)$$

where  $E_{\text{eth}}$  and  $E_{\text{water}}$  are the sample extractive contents using ethanol and water, respectively, expressed as percentage of dry weight (DW),  $m_0$  is the theoretical anhydrous mass of the test specimen before extraction,  $m_1$  and  $m_2$  are the anhydrous masses after ethanol and water extractions, respectively, expressed in grams.

A total of 130 powder samples were characterized for their hydrophilic (water extraction) and lipophilic (toluene: ethanol extraction) extraction rate (Fig. 1b). The overall standard error of the extractive content estimates was  $2.70 \pm 0.04\%$ , which was considered acceptable.

### NIR-spectrometry

Near infrared spectra were obtained on raw and extracted powder samples previously stabilized at a moisture content (MC) of 12%. A MicroNIR OnSite-W<sup>®</sup> (VIAMI Solutions Inc., Scottsdale, AZ, USA) spectrophotometer was used in reflectance mode. Measures were taken at wavelengths between 908 and 1676 nm in 6.2 nm increments; thus, the spectra were composed by the reflectance values at 125 different wavelengths.

### LC-MS analyses

The chemical compositions of branch wood, knots and bark extracts in ethanol were analyzed by liquid chromatography followed by mass spectroscopy (LC-MS) experiments. Preliminary experiments revealed that water extracts were not efficiently analyzed by LC-MS.

Ten milligrams of freeze-dried extract and 1 ml of ethanol were added in a 1.5 ml clear glass autosampler vial (VWR, Radnor, PA, USA). Samples were solubilized in an ultrasonic bath (Elmasonic S15<sup>®</sup>, VWR, Fontenay-sous-Bois, France) for 2 min. Liquid chromatography was carried out using a Shimadzu LC-20A<sup>®</sup> ultra-HPLC system (Shimadzu, Kyoto, Japan) equipped with an autosampler and interfaced with an SPD-20A photodiode-array (PDA) UV detector recording spectra between 190 and 800 nm. Separation was achieved on a LunaC18<sup>®</sup> analytical column ( $150 \times 3 \text{ mm}$  - Phenomenex, Torrance, CA, USA). The injection volume was  $5 \mu\text{l}$ , the flow rate was  $0.4 \text{ ml min}^{-1}$ , and the gradient profile was the following: starting from 5% (v/v) acetonitrile ( $\geq 99.9\%$ , LC-MS Chromasolv<sup>™</sup>) in water (LC-MS Chromasolv<sup>™</sup>) both containing 0.1% (v/v) formic acid, 30% acetonitrile (v/v) was reached at 4.0 min then 90% acetonitrile at 7.0 min was maintained until 9.5 min. Mass spectrometry was done with a Shimadzu LC-MS 8030<sup>®</sup> triple quadrupole mass spectrometer. Positive and negative ion electrospray mass spectrometric analyses were carried out at a unit resolution between 100 and 2000  $m/z$  at a scan speed of 15,000  $\text{amu s}^{-1}$ . The heat block and desolvation line temperatures were 400 and 250 °C, respec-

tively. Nitrogen was used as drying ( $15 \text{ l min}^{-1}$ ) and nebulizing ( $3 \text{ l min}^{-1}$ ) gas. The ion spray voltage was  $\pm 4500 \text{ V}$ . Data were acquired and analyzed with the Lab Solutions software (v. 5.92SP4, Shimadzu). Identification of compounds was done by comparing peak retention times, UV, MS and MS<sup>2</sup> spectra to the literature and to standard solutions of (+)- catechin hydrate (98% HPLC, Sigma-Aldrich) and (-)- epicatechin (90%, Sigma Aldrich).

### Statistical analyses

Statistical analyses were performed using the software RStudio Desktop<sup>®</sup> v. 1.2 (RStudio Inc., Boston, MA, USA). To test for differences in the extractive contents among branches, knots and bark wood from AF and FC walnut trees, the Kruskal-Wallis test was applied to each potentially explicative factor and response variable. When an effect of the factor on a studied variable was detected, Wilcoxon test was used to investigate the nature of this effect and the significance of the differences between the groups of modalities in the descriptive variables.

NIRS spectra were first transformed using a Standard Normal Variate (SNV) correction (Naes et al. 2004) to reduce the effect of irregularities of surface and the intra spectrum variability (correction of the light dispersion). The second derivative was then computed using the Savitzky Golay algorithm with a smoothing range of 11 data points and a third degree polynomial (Savitzky & Golay 1964). The use of this derivative allows to separate overlapping peaks and correct the baseline deviation of spectra. Mathematical corrections were applied using the package “prospectr” v.

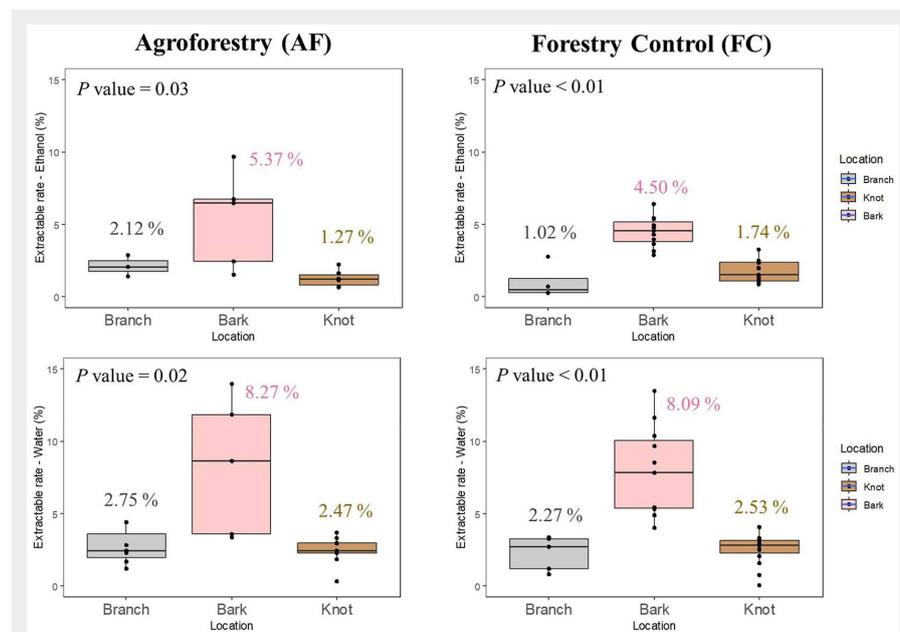
0.1.3 in the R environment. Principal component analysis (PCA) was applied through the package “FactoMineR” (v. 1.34) on the transformed NIRS spectra to detect possible differences in chemical composition between samples and the presence of groups within the tested samples (raw samples of AF and FC branch, knots and bark). NIRS models were developed using the Partial Least Squares - Discriminant Analysis regression method (PLS-DA) using the package “mdatools” v. 0.11.5, in order to discriminate the samples as AF or FC, according to the chemical composition of branch, knots and bark samples.

## Results and discussions

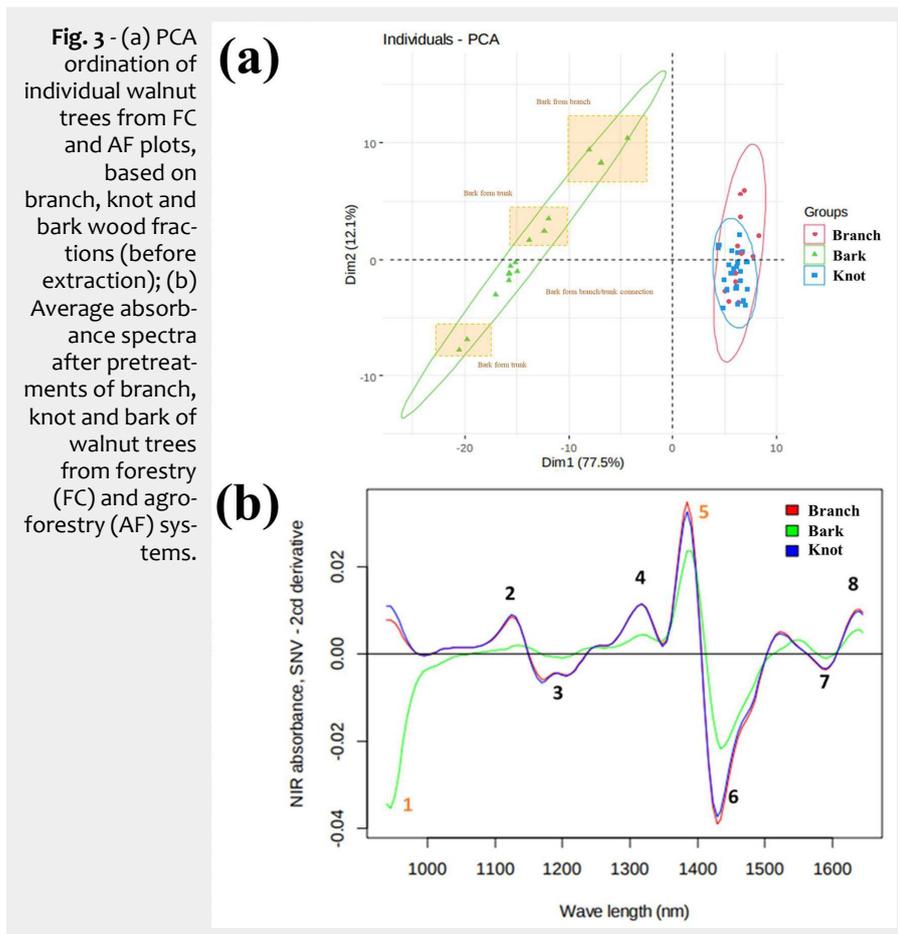
### Variability in extractive contents within AF and FC tree

As shown in Fig. 2, the water extractive contents were higher than those extracted using ethanol for the branch, knot and bark fractions of both AF and FC samples. Similar results were found by Kebbi-Benkeder et al. (2015) who analyzed the water and toluene:ethanol extracts from knotwood and heartwood from various hardwood and softwood species. For most species, the authors reported that water-extractive contents of knot and heartwood fractions were higher than those obtained by extraction in toluene:ethanol. Hardwood species contain more hydrophilic than lipophilic extractives (Vek et al. 2014).

According to the literature, ethanol and water extractive contents of the bark were significantly different from those of branch and knot wood fractions. Many previous studies reported that bark contained higher level of extractives than knotwood,



**Fig. 2** - Mean extractive content from branch, bark and knot wood of walnut trees grown in agroforestry (AF) and forestry control (FC) systems. P value < 0.05 indicate significant differences in extractive contents between branch (grey boxes), bark (pink boxes) and knot (brown boxes) wood fractions after Kruskal-Wallis test.



branches of the studied trees. According to the literature, the proportion of extracts in the wood can greatly increase during the duramenization process, as well as for the presence of tension or compression wood and past damage (Vek et al. 2014).

PCA confirmed the abovementioned results (Fig. 3a), revealing that the chemical composition of branch (in red) and knot (in blue) wood samples is similar to each other and very different compared to that of bark (in green) samples.

Fig. 3b shows the average NIRS spectra of branch, knot and bark of walnut trees from FC and AF samples. Tab. 1 indicates the NIRS absorption bands normally associated with the main chemical components contained in the wood specimens. It is fairly clear that the differences in chemical composition of the tree organs depend on differences in the content of hemicelluloses (peak 4) and celluloses (peaks 6 and 7), but also on the amount of lignin (peaks 2, 3 and 8) and the proportion of extractives (peaks 1 and 5).

*Differences in the extractive content between AF and FC trees*

Fig. 4 displays the mean ethanol and water extractive contents of branch, knot and bark samples from AF and FC walnut trees. The extractive content of branch and bark of AF walnut seems slightly higher than that of FC trees, whereas the opposite was observed for knot samples. However, no significant difference in these extractive contents were found between AF and FC walnut tree organs after Wilcoxon test.

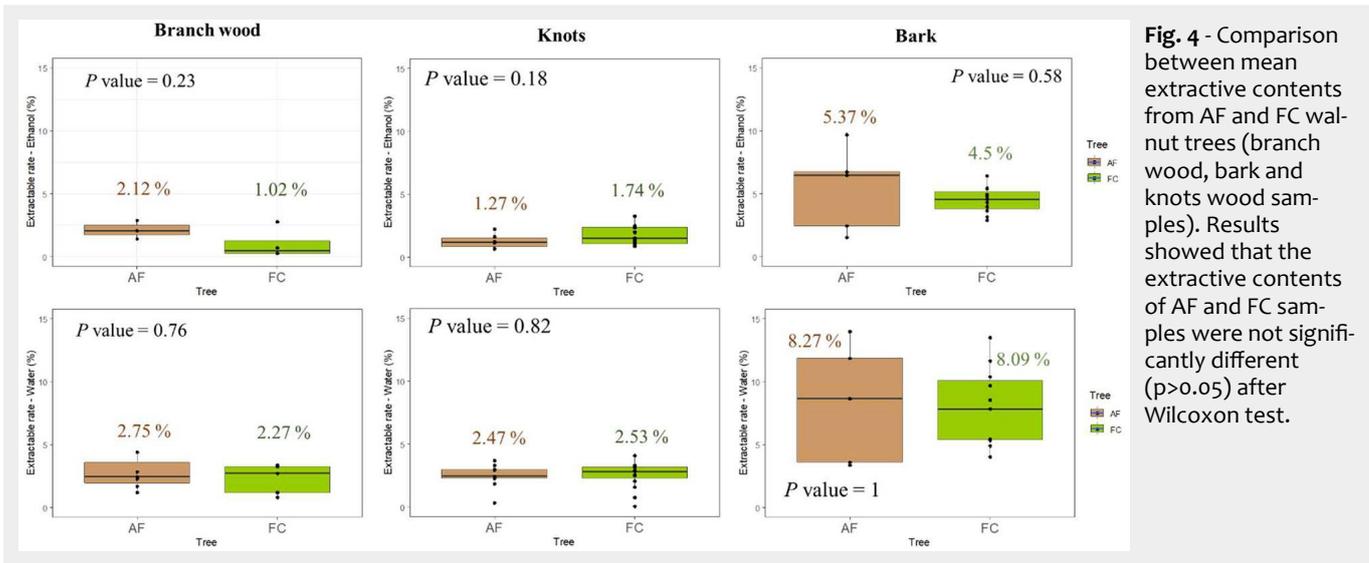
It could be hypothesized that the above differences could be attributed to the thinning operations carried out at the AF plot, which could have promoted an increment

sapwood and heartwood (Rowe & Conner 1979). However, knotwood has been shown to contain more extractives than sapwood and heartwood (Kebbi-Benkeder et al. 2015, 2016). These findings are in contrast with the results obtained in this

study. The similar values in extractive contents between knot and branch wood samples could be attributed to the young age (25 years) of the AF and FC walnut trees, which is reflected by the scarce or null presence of duramen in the trunk and

**Tab. 1** - NIRS absorption bands normally associated with the main wood components (cellulose, hemicelluloses, lignin, extractives and water) contained in wood specimens. Index numbers refer to the specific bands in Fig. 5.

Index	Wavenumber Bands (nm)	Bond Vibration	Structure	Remarks	References
1	900-980	-	Lignin / Extractives	The major vibrations include the yellow-brown color of the wood that are primarily due to the presence of lignin and extractives	Kelley et al. (2004) Yi et al. (2017)
2	1100-1150	HC = CH	Lignin	-	Workman & Weyer (2007)
3	1150-1200	First and second overtones of the lignin aromatic and aliphatic carbon/hydrogen vibrations	Lignin	-	Kelley et al. (2004)
4	1290-1330	First overtone C-H stretching + C-H deformation	Hemicelluloses / all	Tentative assignment to CH <sub>3</sub> groups in acetyl ester groups in hemicelluloses and lignin and all wood components after acetylation	Schwanninger et al. (2011)
5	1350-1400	First overtone O-H stretching	Lignin / Extractives	Vibration of phenolic hydroxyl groups	Donald & Burns (2007)
6	1400-1500	First overtone O-H stretching	Cellulose	Amorphous regions in cellulose	Fujimoto et al. (2007a)
7	1570 -1600	First overtone O-H stretching	Cellulose	Crystalline region of cellulose	Tsuchikawa & Siesler (2003)
8	1610-1650	C-H stretching	Lignin	-	Fujimoto et al. (2007b)



**Fig. 4** - Comparison between mean extractive contents from AF and FC walnut trees (branch wood, bark and knots wood samples). Results showed that the extractive contents of AF and FC samples were not significantly different ( $p > 0.05$ ) after Wilcoxon test.

in the heartwood proportion of the remaining trees (Hapla et al. 2000). Indeed, the lower tree density at the AF plot compared to that at the FC plot could have favoured the production of wood with higher lignin, hemicelluloses and extractive contents in the AF walnut trees (Moulin et al. 2015). Harmaen et al. (2014) found that hot water-extractive contents of rubberwood, whatever the position of the wood sample along the tree stem, decreased when the stand density increases.

Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA with cross validation “leave-one-out”) was carried out with the aim of developing models for the fast classification of branch, knot and bark samples according to the forestry system. As shown in Fig. 5, the PLS-DA models allowed for a large percentage of correct classifications for FC wood, knot and bark specimens. Only one FC bark specimen was misclassified as AF bark sample, indicating that this native FC sample has characteristics similar, to some extent, to those of the AF trees. In contrast, three AF branch-knot and two AF bark specimens were confounded and classified as FC samples by the cross-validated models. The low robustness of the model concerning bark specimens seems mainly due to the small number of AF samples used in this analysis.

In summary, the findings obtained from PLS-DAs showed that chemical differences do exist between AF and FC samples, and these small differences in wood composition are sufficient to distinguish knots and bark wood specimens from trees grown in different forestry systems.

Previous studies based on NIR-spectroscopy analyses found similar results in the classification of wood samples from different species, locality and types of plantations. Ramalho et al. (2018) highlighted that PLS-DA models based on treated NIR signatures are robust for classifying *Eucalyptus* wood specimens from natural and planted forests. Pace et al. (2019) correctly classified 12 native wood species from a ho-

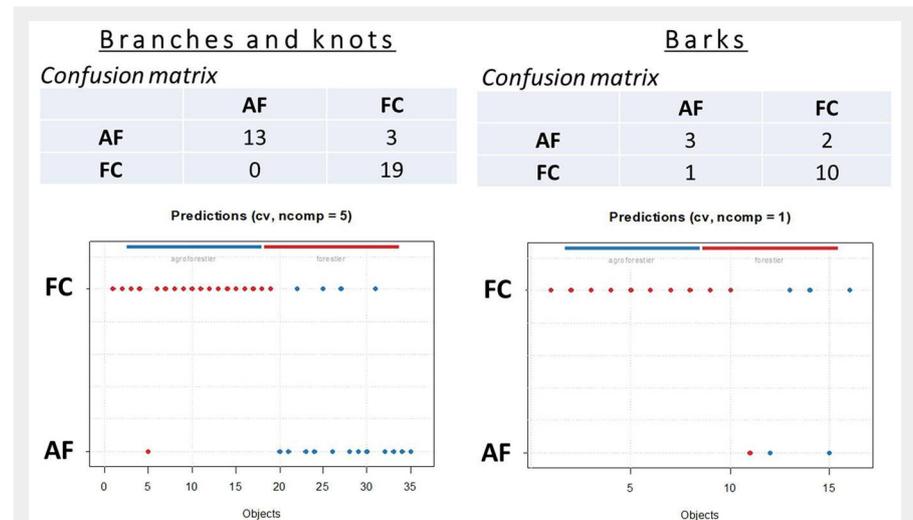
mogeneous plantation based on the respective NIR spectra, showing the good performance of PLS-DA models in classifying independent native wood samples.

**Chemical composition of extractives from AF and FC trees**

According to LC-MS analysis, the major components in ethanol extracts of branch, knot and bark specimens from AF and FC walnut were identified and qualified (Tab. 2), but not quantified. In agreement with Toshiaki (2001), the main components of AF and FC branch wood extracts are lignans, followed by sterols and flavonoids, mostly represented by secoisolariciresinol, campesterol and quercetin, respectively. AF and FC knot specimens are mainly composed by secoisolariciresinol and balanophonin (lignans) following by oleuropein-aglycone and gallic acid (phenolic acids), mono-O-galloyl-glucose (phenolic acids glycoconjugate) and quercetin (flavonoids). Sakuranetin, quercetin and isoquercitrin are the main flavonoid components pres-

ent in the bark samples, following by syringic acid (phenolic acids) and campesterol (sterols).

The presence of all these components is in agreement with the specific literature. Walnut bark extract contains several therapeutically active constituents, especially flavonoids as quercetin (Zakavi et al. 2013), polyphenols (mostly gallic acid) and sterols (Bhatia et al. 2006, Nirmla Devi et al. 2011). Flavonoids occur in bark, heartwood, flower, fruit, seed and root of many plants (Toshiaki 2001). Lignans and neolignans are phenylpropanoids found in many woody plants including softwoods and hardwoods (Toshiaki 2001). Tannins are water-soluble phenolic compounds. Polyphenols are widely distributed in wood, bark, and leaves of many plants. They are classified into hydrolysable and condensed tannins (Toshiaki 2001). Hydrolysable tannins are esters of an aliphatic polyol and phenolic acids and can be hydrolyzed into gallic or ellagic acid (Toshiaki 2001). The condensed tannins and related polyflavonoids are ex-



**Fig. 5** - Results of the discriminant analyses (PLS-DA) based on NIRS data of branch, bark and knot wood samples from AF and FC plots.

**Tab. 2** - List of the chemical compounds identified by LC-MS analysis in the ethanol extracts from AF and FC branch, knot and bark fractions. (++): present in high quantity; (+): present in medium quantity; (-): present in low quantity; (-): present in trace; (Ø): absent.

Chemical compounds	Molar Weight (g mol <sup>-1</sup> )	Presence in ethanol-extracted samples				Class of Compounds
		Modality	Branch	Knot	Bark	
Malic acid	134	AF	-	--	-	Carboxylic acids
		FC	-	Ø	-	
Gallic acid	170	AF	Ø	+	-	Phenolic acids
		FC	Ø	+	-	
Syringic acid	198	AF	Ø	Ø	++	Phenolic acids
		FC	Ø	Ø	++	
Sakuranetin	286	AF	Ø	Ø	++	Flavonoids
		FC	Ø	Ø	++	
Quercetin	302	AF	+	+	++	Flavonoids
		FC	+	+	+	
Rhamnetin	316	AF	-	+	Ø	Flavonoids
		FC	-	Ø	++	
3,7- diméthyl- quercetin	330	AF	--	-	+	Flavonoids
		FC	-	+	Ø	
Mono-O-galloyl- glucose	332	AF	-	+	-	Phenolic acids glycoconjugate
		FC	-	+	-	
Balanophonin	356	AF	Ø	+	Ø	Lignans
		FC	Ø	+	Ø	
Secoisolaricires- inol	362	AF	++	++	Ø	Lignans
		FC	++	++	Ø	
Oleuropein- aglycone	378	AF	Ø	++	Ø	Phenolic acids
		FC	Ø	++	Ø	
Quercitrin	448	AF	Ø	Ø	++	Flavonoids
		FC	Ø	Ø	++	
Isoquercitrin	464	AF	Ø	Ø	+	Flavonoids
		FC	Ø	Ø	+	
Campesterol	472	AF	+	Ø	+	Sterols
		FC	+	Ø	++	

tremely common in extracts, especially from bark (Rowe & Conner 1979). Campesterol is one of the most significant and abundant sterol in bark (Halmemies et al. 2021). In addition, malic acid was the most abundant organic acid identified (Vek et al. 2014) and it is predominant in knotwoods. Schell (1997) also identified this acid as the principal organic acid in the xylem sap of beech roots.

Our results showed that the chemical compositions of branch and knot wood was slightly different between AF and FC samples (Tab. 2), whereas the difference in chemical composition between AF and FC bark specimens was more marked in terms of flavonoid compounds.

The dispersion of bark samples observed in the PCA (Fig. 3a) can be explained by the variation in chemical composition according to the bark position in the tree (branch, branch-trunk junction or trunk). The LC-MS analyses confirmed these results. The chemical composition of bark extractives in

ethanol from branch, branch-trunk and trunk position, of mixed AF and FC walnut tree samples is shown in Fig. S1 (Supplementary material).

## Conclusion

This study provides new knowledge on the chemical characteristics of branch wood from agroforestry systems, which is still poorly studied. The results obtained highlight the evolution and variability of the chemical characteristics of branch, knot and bark wood fractions from agroforestry hardwoods compared to the same species grown in plantations.

Extractives contents of AF and FC specimens are not significantly different for branch, knot and bark. However, PLS-DA models developed based on NIR-S measures showed that chemical differences exist between AF and FC samples, and these differences in composition (though small) are sufficient to distinguish wood-knots and bark specimens from different forestry

systems. For both forestry systems, branch and knot extractive contents are significantly lower than those of bark specimens are. These results are confirmed by the PCA which highlighted that the chemical composition of branch and knot woods is similar, but very different compared to that of bark samples.

LC-MS analyses revealed that main components of extracts in ethanol from AF and FC branch wood were lignans, followed by sterols and flavonoids. Ethanol extracts from knots specimens are mainly composed by lignans followed by polyphenols, polysaccharides and flavonoids compounds. Finally, extracts in ethanol from bark specimens are rich in flavonoids components, followed by polyphenol and sterol. In addition, the chemical composition of ethanol extracts of bark samples depends on the bark position in the tree (branch, branch-trunk junction and trunk). The chemical compositions of ethanol extracts from branch and knot woods were slightly different between AF and FC samples, whereas the difference in chemical composition between AF bark and FC bark was more marked, specifically concerning the flavonoids compounds.

## Acknowledgements

This work is part of the AGROBRANCHE (2018-2021) project (“Study of the valuation of branches in agroforestry for bio-based materials and green chemistry”), supported by the French Environment & Energy Management Agency (ADEME). The authors gratefully acknowledge the GDR 3544 “Science du Bois” for its financial support of the STSM attributed to RD to carry out the LC-MS analyses at the LERMaB, University of Lorraine-Nancy (France).

## References

- Bhatia K, Rahman S, Ali M, Raisuddin S (2006). *In vitro* antioxidant activity of *Juglans regia* L. bark extract and its protective effect on cyclophosphamide-induced urotoxicity in mice. Redox Report 11 (6): 273-279. - doi: 10.1179/135100006X155030
- Donald A, Burns EW (2007). Handbook of near-infrared analysis (3<sup>rd</sup> edn). CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 834. [online] URL: <http://books.google.com/books?id=6EEd1aouka0C>
- Dupraz C, Burgess P, Gavaland A, Graves A, Herzog F, Incoll L, Jackson N, Keesman K, Lawson G, Lecomte I, Liagre F, Mantzanas K, Mayus M, Moreno G, Palma J, Papanastasis V, Paris P, Pilbeam D, Reiser Y, Vincent G, Van Der Werf W (2005). Synthesis of the silvoarable agroforestry for Europe project. INRA-UMR System Editions, Montpellier, France, pp. 254. [online] URL: <http://www.researchgate.net/publication/230675921>
- Dupraz C, Liagre F (2019). Agroforesterie: des arbres et des cultures [Agroforestry: trees and crops] (2<sup>nd</sup> edn). Edition France Agricole, Paris, France, pp. 432. [in French]
- Fujimoto T, Kurata Y, Matsumoto K, Tsuchikawa S (2007a). Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical prop-

- erties of small clear and full length lumber specimens. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 16 (6): 529-537. - doi: [10.1255/jnirs.818](https://doi.org/10.1255/jnirs.818)
- Fujimoto T, Yamamoto H, Tsuchikawa S (2007b). Estimation of wood stiffness and strength properties of hybrid larch by near-infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy* 61 (8): 882-888. - doi: [10.1366/000370207781540150](https://doi.org/10.1366/000370207781540150)
- Halmemies ES, Brännström HE, Nurmi J, Läspä O, Alén R (2021). Effect of seasonal storage on single-stem bark extractives of Norway Spruce (*Picea abies*). *Forests* 12 (6): 736. - doi: [10.3390/f12060736](https://doi.org/10.3390/f12060736)
- Hapla F, Oliver-Villanueva JV, González-Molina JM (2000). Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilisation of *Cedrus atlantica* in the European mediterranean area. *European Journal of Wood and Wood Products* 58 (1-2): 1-8. - doi: [10.1007/s001070050377](https://doi.org/10.1007/s001070050377)
- Harmaen AS, Paridah MT, Jalaluddin H, Mohamad J, Khalid RH (2014). Influence of planting density on the fiber morphology and chemical composition of a new latex-timber clone tree of rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muel. Arg.). *BioResources* 9 (2): 2593-2608. [online] URL: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/5087>
- Haupt M, Leithoff H, Meier D, Puls J, Richter HG, Faix O (2003). Heartwood extractives and natural durability of plantation grown teakwood (*Tectona grandis* L.) - a case study. *European Journal of Wood and Wood Products* 61 (6): 473-474. - doi: [10.1007/s00107-003-0428-z](https://doi.org/10.1007/s00107-003-0428-z)
- Jahanban-Esfahlan A, Ostadrahimi A, Tabibiazar M, Amarowicz R (2019). A comparative review on the extraction, antioxidant content and antioxidant potential of different parts of walnut (*Juglans regia* L.) fruit and tree. *Molecules* 24 (11): 2133. - doi: [10.3390/molecules24112133](https://doi.org/10.3390/molecules24112133)
- Kebbi-Benkeder Z, Colin F, Dumarçay S, Gérardin P (2015). Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species. *Annals of Forest Science* 72: 277-284. - doi: [10.1007/s13595-014-0428-7](https://doi.org/10.1007/s13595-014-0428-7)
- Kebbi-Benkeder Z, Dumarçay S, Touhri N, Mansour M, Gérardin P, Colin F (2016). Les noeuds: un bois méconnu et une source importante de composés extractibles [Knots: an unknown wood and an important source of extractable compounds]. *Revue Forestière Française* 68 (1): 7-26. [in French] [online] URL: <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/61591>
- Kelley SS, Rials TG, Snell R, Groom LH, Sluiter A (2004). Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology* 38: 257-276. - doi: [10.1007/s00226-003-0213-5](https://doi.org/10.1007/s00226-003-0213-5)
- Košiková B (2009). Morphological and chemical characteristics of stem and knot poplar wood. *Wood Research* 54 (3): 117-122. [online] URL: <http://www.woodresearch.sk/wr/200903/13.pdf>
- Leblon B, Adedipe O, Hans G, Haddadi A, Tsuchikawa S, Burger J, Stirling R, Pirouz Z, Groves K, Nader J, LaRocque A (2013). A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. *The Forestry Chronicle* 89 (5): 595-606. - doi: [10.5558/tfc2013-111](https://doi.org/10.5558/tfc2013-111)
- Malignier N, Balaguer F (2017). Current extent and trends of agroforestry in France. AGFORWARD Research Project, Annex to Deliverable 1.2, Association Française d'Agroforesterie, Auch, France, pp. 10. [online] URL: [http://www.agforward.eu/documents/D1\\_2\\_Annex\\_Extent\\_of\\_Agroforestry\\_France.pdf](http://www.agforward.eu/documents/D1_2_Annex_Extent_of_Agroforestry_France.pdf)
- Morikawa T, Ashitani T, Kofujita H, Takahashi K (2014). Antitermitic activity of extracts from *Chamaecyparis obtusa* branch heartwood. *European Journal of Wood and Wood Products* 72: 651-657. - doi: [10.1007/s00107-014-0830-8](https://doi.org/10.1007/s00107-014-0830-8)
- Moulin JC, Arantes MDC, Vidaurre GB, Paes JB, Carneiro ACO (2015). Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto [Effect of spacing, age and irrigation in chemical components of eucalyptus wood]. *Revista Árvore* 39 (1): 199-208. [in Portuguese] - doi: [10.1590/0100-67622015000100019](https://doi.org/10.1590/0100-67622015000100019)
- Naes T, Isaksson T, Fearn T, Davies T (2004). A user-friendly guide to multivariate calibration and classification. NIR Publications, Chichester, UK, pp. 344.
- Nirmla Devi T, Apraj V, Bhagwat A, Mallya R, Sawant L, Pandita N (2011). Pharmacognostic and phytochemical investigation of *Juglans regia* Linn. bark. *Pharmacognosy Journal* 3 (25): 39-43. - doi: [10.5530/pj.2011.25.7](https://doi.org/10.5530/pj.2011.25.7)
- Pace JHC, De Figueiredo Latorraca JV, Hein PRG, De Carvalho AM, Castro JP, Da Silva CES (2019). Wood species identification from Atlantic forest by near infrared spectroscopy. *Forest Systems* 28 (3): e015. - doi: [10.5424/fs/2019283-14558](https://doi.org/10.5424/fs/2019283-14558)
- Pardon P, Mertens J, Reubens B, Reheul D, Coussement T, Elsen A, Nelissen V, Verheyen K (2020). *Juglans regia* (walnut) in temperate arable agroforestry systems: effects on soil characteristics, arthropod diversity and crop yield. *Renewable Agriculture and Food Systems* 35 (5): 533-549. - doi: [10.1017/S1742170519000176](https://doi.org/10.1017/S1742170519000176)
- Ramalho FMG, Andrade JM, Hein PRG (2018). Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. *Forest Systems* 27 (2): e008. - doi: [10.5424/fs/2018272-12075](https://doi.org/10.5424/fs/2018272-12075)
- Rowe JW, Conner AH (1979). Extractives in eastern hardwoods - A review. General Technical Report, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, Madison, WI, USA, pp. 67. [online] URL: <http://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/9809>
- Rowell RM, Pettersens R, Han JS, Rowell JS, Tshabalala MA (2005). Cell wall chemistry. In: "Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites" (Rowell RM ed). CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 35-72. [online] URL: <http://books.google.com/books?id=ekrLBQAAQBAJ>
- Salejda AM, Janiewicz U, Korzeniowska M, Kolniak-Ostek J, Krasnowska G (2016). Effect of walnut green husk addition on some quality properties of cooked sausages. *LWT Food Science and Technology* 65: 751-757. - doi: [10.1016/j.lwt.2015.08.069](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.069)
- Savitzky A, Golay MJE (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 36: 1627-1639. - doi: [10.1021/ac60214a047](https://doi.org/10.1021/ac60214a047)
- Schwanninger M, Rodrigues JC, 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. - doi: [10.1255/jnirs.955](https://doi.org/10.1255/jnirs.955)
- Schell J (1997). Interdependence of pH, malate concentration, and calcium and magnesium concentrations in the xylem sap of beech roots. *Tree Physiology* 17: 479-483. - doi: [10.1093/treephys/17.7.479](https://doi.org/10.1093/treephys/17.7.479)
- Schimleck L, Evans R, Illic J (2003). Application of near infrared spectroscopy to the extracted wood of a diverse range of species. *IAWA Journal* 24 (4): 429-438. - doi: [10.1163/22941932-9000347](https://doi.org/10.1163/22941932-9000347)
- Taylor A, Gartner BL, Morrell JJ, Tsunoda K (2006). Effects of heartwood extractive fractions of *Thuja plicata* and *Chamaecyparis nootkatensis* on wood degradation by termites or fungi. *Journal of Wood Science* 52 (2): 147-153. - doi: [10.1007/s10086-005-0743-6](https://doi.org/10.1007/s10086-005-0743-6)
- Terrasse F, Brancherieu L, Marchal R, Boutahar N, Lotte S, Guibal D, Pignolet L, Candelier K (2021). Density, extractives and decay resistance variabilities within branch wood from four agroforestry hardwood species. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 14 (3): 212-220. - doi: [10.3832/for3693-014](https://doi.org/10.3832/for3693-014)
- Toshiaki U (2001). Chemistry of extractives. In: "Wood and cellulosic chemistry" (De David NSH, Nobuo S eds). Marcel Dekker Inc., New York, USA, pp. 213-241.
- Tsuchikawa S, Siesler HW (2003). Near-infrared spectroscopic monitoring of the diffusion process of deuterium-labeled molecules in wood. Part I: softwood. *Applied Spectroscopy* 57 (6): 667-674. - doi: [10.1366/000370203322005364](https://doi.org/10.1366/000370203322005364)
- Vek V, Oven P, Ters T, Poljanšek I, Hinterstoisser B (2014). Extractives of mechanically wounded wood and knots in beech. *Holzforschung* 68 (5): 529-539. - doi: [10.1515/hf-2013-0003](https://doi.org/10.1515/hf-2013-0003)
- Workman JJ, Weyer L (2007). Practical guide to interpretive near infrared spectroscopy. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 344.
- Xu F, Zhong XC, Sun RC, Lu Q, Jones GL (2007). Chemical composition, fiber morphology, and pulping of *P. bolleana* Lauche. *Wood and Fiber Science* 38: 512-519.
- Yi J, Sun Y, Zhu Z, Liu N, Lu J (2017). Near-infrared reflectance spectroscopy for the prediction of chemical composition in walnut kernel. *International Journal of Food Properties* 20 (7): 1633-1642. - doi: [10.1080/10942912.2016.1217006](https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1217006)
- Zakavi F, Golpasand Hagh L, Daraeighadikolaei A, Farajzadeh Sheikh A, Daraeighadikolaei A, Leilavi Shoostari Z (2013). Antibacterial effect of *Juglans regia* bark against oral pathologic bacteria. *International Journal of Dentistry* 2013 (6): 1-5. - doi: [10.1155/2013/854765](https://doi.org/10.1155/2013/854765)

## Supplementary Material

**Fig. S1** - Main chemical compounds found in ethanol extracts from bark wood (AF and FC), according to the sample position in walnut trees.

**Link:** [Heim\\_3973@suppl001.pdf](mailto:Heim_3973@suppl001.pdf)

### 4.2.2 Variations radiales des taux d'extractibles par spectroscopie NIR des noyers agroforestiers et forestiers à l'échelle du tronc

L'étude que nous venons de détailler a permis d'apporter de nouvelles connaissances concernant les branches d'arbres agroforestiers, en particulier sur la composition chimique de leur bois mais également des noeuds et de l'écorce de noyers agroforestiers, permettant ainsi d'envisager de nouvelles pistes de valorisation de cette biomasse raméale. Nos résultats ont notamment montré que les teneurs en extraits et la composition chimique des échantillons de bois AF et FC étaient légèrement différentes entre les branches, les noeuds et l'écorce et que les modèles PLS-DA basés sur les mesures NIRS pouvaient être utilisés pour distinguer les échantillons de bois de noyers cultivés sous différents régimes sylvicoles. Ce travail a donc été étendu au bois issus des troncs de ces mêmes noyers. Notre étude s'est ainsi concentrée d'une part sur les variations radiales du taux d'extractibles au sein des troncs de noyers agroforestiers et forestiers, mais également sur le développement de modèles statistiques de discrimination, toujours basés sur des analyses NIRS, permettant de classer en fonction de leur composition chimique les différents échantillons du tronc des noyers provenant des systèmes AF et FC. Des analyses à la caméra hyperspectrale ont ensuite été menées afin de confirmer les résultats obtenus en terme de différences de compositions chimiques des noyers en fonction de leur régime sylvicole. Les détails de cette étude sont rapportés dans la publication qui suit (HEIM, BRANCHERIAU, MARCHAL, BOUTAHAR et al., 2022).

**Variation analyses of extractive contents by NIR-Spectroscopy bring out the differences between agroforestry and forestry Walnut (*Juglans regia* × *nigra*) trees.**

Lucie Heim<sup>1,2,3,4</sup>, Loïc Brancheriau<sup>1,2</sup>, Remy Marchal<sup>3</sup>, Nabila Boutahar<sup>1,2</sup>, Sylvain Lotte<sup>1,2</sup>, Louis Denaud<sup>3</sup>, Eric Badel<sup>4</sup>, Karima Meghar<sup>5,6</sup> and Kevin Candelier<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, Research Unit BioWooEB, 34000, Montpellier, France

<sup>2</sup>BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

<sup>3</sup>Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP, UBFC, HESAM Université, F-71250 Cluny, France

<sup>4</sup>Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, 63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>5</sup>CIRAD, Research Unit QualiSud, Montpellier, France

<sup>6</sup>QualiSud, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

Published in *Holzforschung*, July 2022

DOI 10.1515/hf-2022-0055

## Original Article

Lucie Heim, Loïc Brancheriau, Remy Marchal, Nabila Boutahar, Sylvain Lotte, Louis Denaud, Eric Badel, Karima Meghar and Kevin Candelier\*

# Variation analyses of extractive contents by NIR-spectroscopy bring out the differences between agroforestry and forestry walnut (*Juglans regia* × *nigra*) trees

<https://doi.org/10.1515/hf-2022-0055>

Received March 28, 2022; accepted July 1, 2022;

published online July 18, 2022

**Abstract:** Wood characteristics of trees grown in agroforestry systems are little studied, even if growth conditions are different from conventional stands. This work aimed to determine the impact of the agroforestry system on the heartwood formation process of hybrid walnut (*Juglans regia* × *nigra*) trees, especially the resulting extractive contents. Ethanol and water extractions were successively performed on wood samples taken across the diameter of the trunk of agroforestry (AF) and forest (FC) walnut trees to get the radial distribution of the extractive contents. All the samples were analyzed by NIR-spectroscopy and NIR-hyperspectral imaging. Statistical discriminant models were developed to classify the samples from both different forestry systems, according to their chemical composition. The results indicated no significant differences between the values of extractive contents of AF and FC walnut woods, whatever the radial position. At the intra-

tree scale, the quantity of extractives does not increase significantly with the radial position. However, partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) regression models, developed with NIRS measurements, showed that significant chemical differences exist between AF and FC trees, especially for extractives composition and lignin content. This allowed to classify wood specimens from both forestry systems. These results were confirmed by hyperspectral camera analyses.

**Keywords:** discrimination models; extractives; heartwood; lignin; NIR-hyperspectral imaging; NIR-spectrometry.

## 1 Introduction

Agroforestry systems include a wide range of solutions using trees outside of forests (Campanhola and Pandey 2019). In such systems, the production of wood and/or woody biomasses is often combined with other products or services (Nair 2005). Agroforestry systems are competitive with intensive food and industrial crops for land use. Therefore, the sum of their products and services must offset the economic value of the others alternatives (Sollen-Norrlin et al. 2020). In addition, tree species in combination with agricultural crop may increase the employment generation for the nursery growers, local labors, wood industries, and other wood merchantpersons (Shukla et al. 2018). Agroforestry has a significant potential to provide employment to rural and urban population through production, industrial application and value addition ventures. In this sense, agroforestry practices could stratified the three following long-term strategic objectives, which are stated by the UE rural development policy: (i) fostering the competitiveness of agriculture, (ii) ensuring the sustainable management of natural resources, and climate action, (iii) achieving a balanced territorial development of rural economies and

---

\*Corresponding author: Kevin Candelier, CIRAD, Research Unit BioWooEB, Montpellier, France; and BioWooEB, Université Montpellier, CIRAD, Montpellier, France,  
E-mail: kevin.candelier@cirad.fr

Lucie Heim, CIRAD, Research Unit BioWooEB, Montpellier, France; BioWooEB, Université Montpellier, CIRAD, Montpellier, France; Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP, HESAM University, Cluny, France; and Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, Clermont-Ferrand, France

Loïc Brancheriau, Nabila Boutahar and Sylvain Lotte, CIRAD, Research Unit BioWooEB, Montpellier, France; and BioWooEB, Université Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

Remy Marchal and Louis Denaud, Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP, HESAM University, Cluny, France

Eric Badel, Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, Clermont-Ferrand, France

Karima Meghar, CIRAD, Research Unit QualiSud, Montpellier, France; and QualiSud, Université Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

communities including the creation and maintenance of employment (Hain 2014). Agroforestry systems are thus critical for rural development by providing determinant ecosystem services such as soil fertility enhancement, prevention of soil erosion, water, wind, and pest regulation, and pollination (Gonçalves et al. 2021).

Properly planned and managed, agroforestry systems can meet these challenges. However, adequate and comprehensive knowledge is needed to make the right decisions, from selecting the most appropriate tree species/clones for a specific site to the most efficient harvesting systems (Muschler 2015). In this sense, the quite robust walnut tree fit perfectly within an agroforestry system, not least because of the relatively low competition for light with other crops due to the more open crown, the late leafing and early leaf fall. Its tree foliage also allows to protect the inter-row plants/crops against strong UV radiations, providing moderate shade and increasing humidity level (Kulasegaram and Kathiravetpillai 1976). In addition, walnut tree leaves are good litter, speeding up nutrient cycling (Pardon et al. 2020). Moreover, walnut trees are well known to produce timber with high commercial potential, providing high-quality wood to supply the market demand in Europe, especially *Juglans nigra* × *Juglans regia* hybrid which is the preferred species for wood material uses. Such an hybrid species produces high quality timber and veneer (100 m<sup>3</sup>/ha after 50 years). Well-accepted by farmers, it is ideally suited for use in agriculture reconversion and diversification, in Europe. In addition, new industrial options have emerged and have been well-defined in Europe on the production of homogeneous light-colored wood, exploitable trees within 25–30 years, with large growth rings and low density without heartwood (Fernández-Moya et al. 2019).

Agroforestry could allow to improve wood quality by producing a wood material with wide regular rings (suited to the needs of industry), because the trees are not subjected to cycles of competition and thinning during their growing. Walnut is also well-known for its rich source of various valuable chemical compounds, which are involved in the wood quality. Walnut heartwood is classified as durable (Scheffer and Cowling 1966; Scheffer et al. 1998). This durability has been related to the presence of phenolic compounds such as flavonoids, naphthoquinones, and hydrolysable tannins (Gupta et al. 1972). In this respect, walnut tree can be used as an excellent source of various high value active compounds (mainly with antioxidant, antimicrobial and insecticidal potentials) (Salejda et al. 2016). The amount of extractives accumulated in tree stems can vary according to the vertical and the radial position in the stem. The heartwood is

generally characterized by a higher extractive content than those of the sapwood portion (Beritognolo 2001). Within the stem cross-sections containing heartwood, the extractive amount increases according to the age of the xylem growth rings, reaching its maximum in the transition zone or in the heartwood periphery (Burtin et al. 1998; Magel et al. 1994).

The chemical composition of wood, including extractives content, can also vary according to several factors, among which environmental, genetic, age and seasonal variations (Haupt et al. 2003; Toshiaki 2001). Recent works have demonstrated that changes in the tree's environment during growth can alter heartwood extractives content in many species (Hillis 1971; Morais and Pereira, 2012). If such variations in heartwood extractives affect wood properties, then forestry treatments and changes in how forest resources are managed may affect the valorization of future wood products (Taylor et al. 2006).

Statistical modeling based on NIR spectrometry has revealed to be an efficient tool to assess the chemical and physical properties of a wide range of wood species, with high accuracy (Schimleck et al. 2003). This technic has been efficiently used for the determination of the chemical composition of branch wood, knots and bark fractions from walnut trees issued from Agroforestry and forestry systems (Heim et al. 2022; Terrasse et al. 2021). In addition, NIR-Hyperspectral imaging can be used for the development of models that quantify the heterogenic chemical composition of the wood surface (Sandak et al. 2016). Hyperspectral imaging provides spatially information of the wood surface in the NIR range, and then selected wavelengths can be used to reveal the presence of specific chemical compounds (Myronycheva et al. 2018).

This study aims to improve the knowledge about the chemical composition, especially the radial distribution of hydrophilic and lipophilic extractives content, within agroforestry (AF) walnut trees compared to those from standard forestry control plots (FC). In addition, the radial distributions of the extractive contents of agroforestry (AF) and forest (FC) hybrid walnut trees (*J. regia* × *nigra*), were used to evaluate the level of heartwood formation process depending on the silvicultural system. All samples (before and after ethanol and water extractions) were analyzed by NIR-spectroscopy techniques, in order to evaluate the impact of silviculture method on the chemical composition of wood and to develop discriminant models allowing the classification of wood samples according to their growing conditions; agroforestry (AF) and forest control (FC) plots.

## 2 Materials and methods

### 2.1 Experimental site

The experiment was carried out at the Restinclières farm area, located in southern France (43°420 N, 3°510 E and elevation 61 m). Two plots composed by 25 years old walnuts are studied: an Agroforestry plot (AF, with 140 walnuts) and a Forestry Control plot (FC, with 235 walnuts). Initially the planting density in both plots was identical. A thinning carried out in the in 2004, have reduced the density of the AF plot to 100 trees/ha and walnut trees were spaced 4, 8, 12 or 16 m on a same planting line. Between each line, winter cereal crops were cultivated, each year, on a 12 m wide strip. In FC plot, the walnut tree density was almost 200 trees/ha and were mixed with alder (*Alnus cordata*) and ash (*Fraxinus excelsior*) trees. In both plots, tree rows were north-south oriented Figure 1a and c shows the walnut trees distribution in AF and FC plots, respectively.

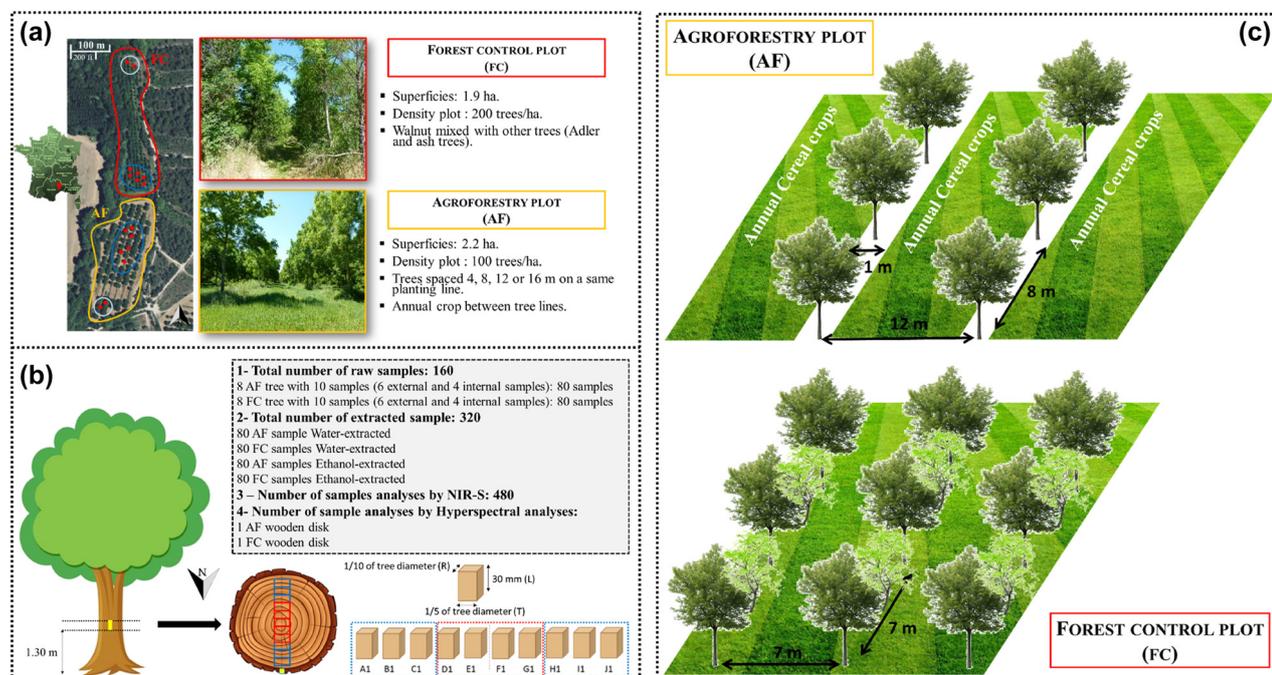
### 2.2 Tree selection

As shown in Figure 1a, 8 hybrid walnut (*J. nigra* × *J. regia* cv. NG23) trees were sampled from each of the two AF and FC plots. All of the selected 25 year old walnut trees (AF and FC) were harvested in February 2020, limiting the seasonal impact on wood chemical composition (i.e., starch in sapwood). For each plot, 6 trees were selected at the extremity of the plot to avoid the effect of soil and water exposure variations. In addition, 2 AF and 2 FC walnut trees were taken

from the other side of their respective plot, in order to assess the influence of tree location within the plot area.

### 2.3 Sampling

The details of sampling, focused on one studied tree, are exposed in Figure 1b. A similar samples repartition was performed for the 16 walnut trees issued from AF and FC plots, as following described. For each walnut tree, a wooden disk of 30 mm in thickness was collected at 1.30 m from the ground. Due to the fact that the heartwood formation process of the harvested trees has not or only slightly initiated, the wood sampling was based on each tree diameter. In this sense, 10 samples [6 outer samples (references A, B, C and H, I, J) and 4 inner samples (references D, E, F, G) – Figure 1] were cut out each disk, according to the radial direction (north–south axis). The section of these samples was  $1/10 \times 1/5$  of the tree diameter ( $R \times T$ , in mm), and the thickness was 30 mm (L) (Figure 1). According to this method, the samples dimensions were  $9 \times 18 \times 30 \text{ mm}^3$  ( $R \times T \times L$ ) for the smaller tree diameter and  $13.5 \times 27 \times 30 \text{ mm}^3$  ( $R \times T \times L$ ) for the larger one. In average, the number of annual rings of each samples was ranged between 2 and 3. The total number of samples, including AF and FC samples, used for this study was 160. All of these 160 samples were then oven dried at  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  for 24 h, before being grounded and passed through different sieves to obtain particles with sizes ranging between 0.2 and 0.5 mm. Before NIR-S analyses (ETH) and extraction processes, 15 g of each sample modality was stabilized at a moisture content (MC) of 12% (stabilization in an humid air at  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $65\% \pm 5\% \text{ RH}$ ).



**Figure 1:** (a) Walnut trees selection in the agroforestry (AF) and forestry control (FC) plots at the Restinclières farm in southern France. (b) Sampling and selection of wood samples for extraction process, NIRS and LC-MS analyses. (c) Graphical drawing plan of walnut trees distribution in AF and FC plots.

## 2.4 Extraction processes

All experimental procedures used in the determination of the extractive content were adapted, with minor modifications, from procedures found in the scientific literature (Rowell et al. 2005).

Each grounded wood sample was oven-dried at  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  in order to determine its initial anhydrous mass ( $m_0$ ) and then 15 g (in dry basis) was extracted in a Soxhlet apparatus with ethanol [HoneyWell, Germany, 32201-M] during 6 h. After this first extraction step, the sample was oven-dried  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  until mass stabilization ( $m_1$ ), before being submitted to a second extraction using hot distilled water for 8 h, and then dried at  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  to obtain the anhydrous mass ( $m_2$ ).

Extractive contents were determined according to the following equations Eqs. (1) and (2):

$$E_{\text{eth}} (\%DW) = [(m_0 - m_1) \div m_0] \times 100 \quad (1)$$

$$E_{\text{water}} (\%DW) = [(m_1 - m_2) \div m_0] \times 100 \quad (2)$$

where  $E_{\text{eth}}$  and  $E_{\text{water}}$  are the sample extractives content using ethanol and water, respectively in percentage of dry weight (DW),  $m_0$  is the theoretical anhydrous mass of the test piece before extraction,  $m_1$  and  $m_2$  are the anhydrous mass after the ethanol and water extractions, respectively.

A total of 320 powder samples were characterized for their hydrophilic (water extraction) and lipophilic extraction (ethanol extraction) rate (Figure 1b). The measurement error on the extractive contents determination was estimated at  $\pm 0.04$  (% DW).

## 2.5 NIR-spectrometry measurements

**2.5.1 Hyperspectral camera analyses:** Firstly, hyperspectral measurements were performed on the wooden discs, previously sanded to obtain a surface without irregularities avoiding scattering effect during NIR-S measurements (Mancini et al. 2019). The camera was a Specim FX17 (Specim, Spectral Imaging Ltd.) with a spectral range of 933–1721 nm and a 3.5 nm increments. Each NIR spectrum was digitized in 224 wavelengths. The spatial resolution was set to 0.27 mm/pixel. For an image, spectral data were collected as a 3D matrix of  $640 \times 1002 \times 224$  values. The dimensions  $640 \times 1002$  were associated with the spatial dimensions.

Images from hyperspectral camera analyses corresponding to absorbance spectra were collected at the wavelength of 1450 nm, attributed to first overtone O–H stretching vibration of lignin/extractives compounds. Then, these images were analyzed with Image J 1.53k software in order to determine the values of pixels for each colors in the RGB referential.

**2.5.2 NIR-S analyses on powder samples:** Near infrared spectra were obtained on raw and extracted powder samples previously stabilized at a moisture content (MC) of 12% (stabilization in a humid air at  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  and  $65\% \pm 5\%$  RH). A MicroNIR OnSite-W (VIAVI Solutions Inc.) spectrometer was used in reflectance mode. Data were measured for wavelengths between 908 and 1676 nm in 6 nm increments. The spectra were thus composed by 125 wavelengths of absorbance values.

## 2.6 Statistical analysis

Statistical analysis were led with RStudio Desktop software (v 1.2, 2019, RStudio Inc.). The comparison of extractives contents obtained after

ethanol and water extraction between both AF and FC plots was performed with a Wilcoxon test. To understand the radial repartition of the extractive contents measured within walnut trunk from AF and FC walnut trees, Kruskal–Wallis tests have been applied on each potential explicative factor and response variable. For each test indicating an effect of a factor on a studied variable, Wilcoxon tests were used to investigate the nature of this effect and the significance of the differences between the groups created by the modalities of the descriptive variables.

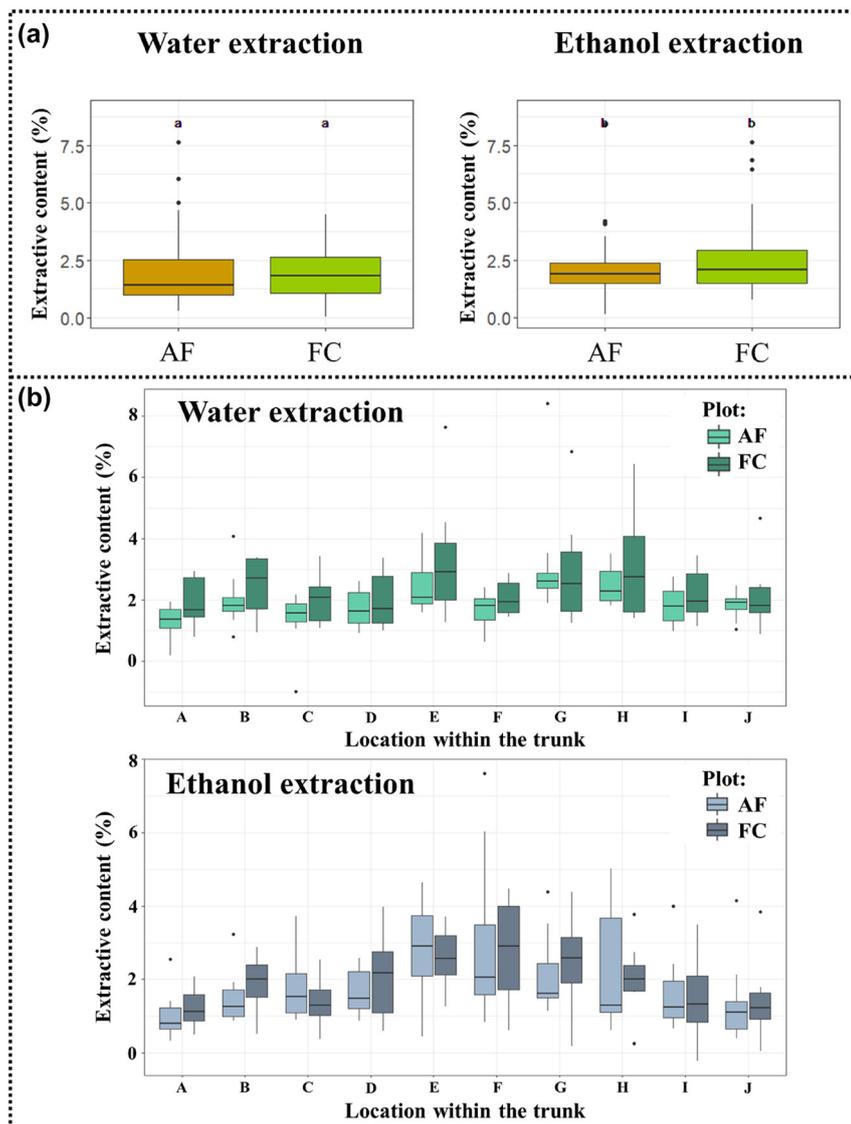
NIRS spectra (from Specim FX17 and MicroNIR) were first transformed (Naes et al. 2004) with a standard normal variate (SNV) correction to reduce the effect of irregularities on surface and the intra spectrum variability (correction of the light dispersion). The second derivative was then computed using the algorithm of Savitzky Golay with a smoothing range of 11 data points and a third degree polynomial (Savitzky and Golay 1964). This derivative allowed separating peaks that overlap and correcting the baseline deviation of spectra. The mathematical corrections were performed using the package “prospectr” (v 0.1.3, 2013).

NIRS models were developed with the partial least squares-discriminant analysis regression method (PLS-DA, package “mda-tools”, v 0.11.5, 2021) to discriminate the samples as AF or FC (highlighting differences in chemical composition). For this purpose, raw samples (ETH), samples after ethanol extraction (AVE) and after water extraction (APR) were used separately.

# 3 Results and discussion

## 3.1 Radial distribution of extractive content within AF and FC trees

As shown in Figure 2a, the global water extractive contents of AF and FC samples were slightly higher than those from extraction using ethanol, highlighting that studied walnut trees contain more hydrophilic extractives than lipophilic extractive compounds (Kebbi-Benkeder et al. 2015a; Vek et al. 2014). For both solvents, the extractive contents between the two plots were not statistically different ( $p$ -value = 0.3958 for ethanol and  $p$ -value = 0.0649 for water). The relatively low extractive contents recorded for AF (1.99% with water and 1.92% with ethanol) and FC (2.42% with water and 1.92% with ethanol) walnut trees, compared to results from other past scientific study [6.3% in sapwood and 13.3% in heartwood of 41 years old common walnut, by successive solvent extractions (Kebbi-Benkeder 2015b), indicate that the trees studied are relatively young (25 years) and that the wood is still in the early stages of its heartwood formation process and is mainly composed of sapwood. Even if Figure 2b shows that ethanol-extracts level trends to increase from bark to the pith of the AF and FC walnut trees. This tendency is statistically significant ( $p$ -value < 0.001), samples located in the center of the trunk having a higher rate of extractives than those in the periphery. Concerning the radial distribution of water-extractives within AF and FC walnut trees, water-extractive contents are quite



**Figure 2:** (a) Comparison between mean extractive contents from agroforestry (AF) and forestry control (FC). (b) Radial distribution of mean extractive contents of walnut wood from AF and FC systems.

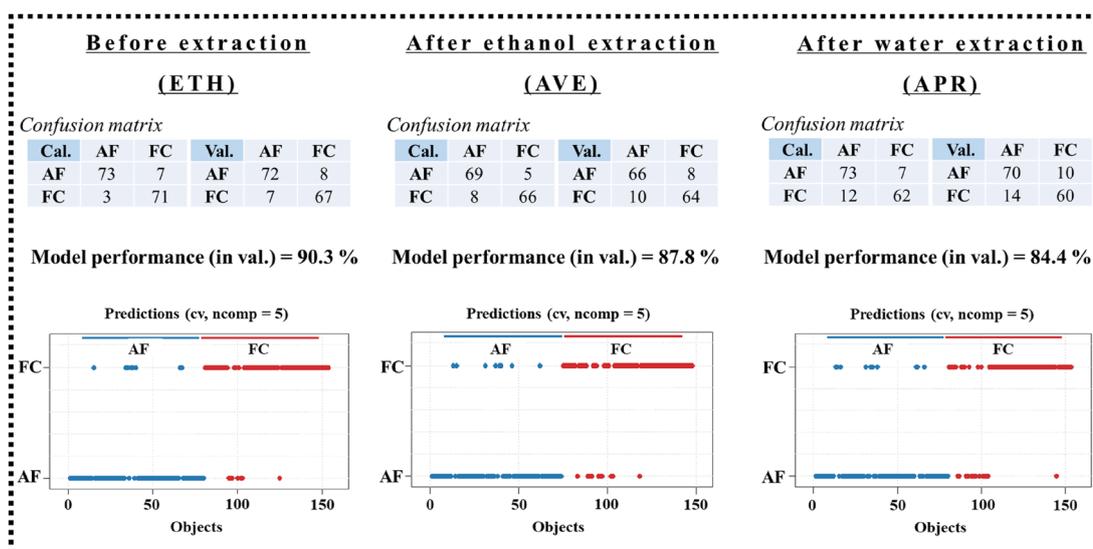
similar whatever the radial position of the wood samples (Figure 2b) ( $p$ -value = 0.1385). These results were confirmed by Wilcoxon tests, regrouping the samples from A-B-C-H-I-J and D-E-F-G.

### 3.2 Differences in extractives contents between AF and FC trees

PLS-DA (with cross validation “leave-one-out”) were carried out for developing models for classifying wood samples according to the forestry system. As shown in Figure 3, the models presented a large percentage of correct classifications (accuracy) for FC and AF raw (ETH), ethanol-extracted (AVE) and water-extracted (APR) wood specimens. The comparison between calibration matrix

(Cal.) and validation matrix (Val.), presented in Figure 3 shows that the models were stable whatever the extraction modality (ETH, AVE, APR). Even if the performance of the models (accuracy in validation) decreased according to the successive extraction processes, from 90.3% (ETH), to 87.8% (AVE) and to 84.4% (APR), the AF/FC samples discrimination remained possible with 84.4% of the samples well classified at the end of the extraction processes.

The aim of distinguishing wood samples from AF and FC walnut trees was promising. The results obtained from PLS-DA showed that chemical differences existed between AF and FC samples, and these differences in composition (even low) was sufficient to distinguish wood specimen from both forestry systems. Previous study conducted on various tree organs (bark, knots and branch woods) of



**Figure 3:** Discriminant analyses (PLS-DA) classifying samples from AF and FC trees, before extraction (ETH), after ethanol extraction (AVE) and after water extraction (APR), with their respective model's performances.

Walnut (*J. regia* × *nigra*) highlighted that PLS-DA models based on treated NIR signatures are robust (with accuracy ranging between 75 and 91.4%) for distinguish wood, knots and bark specimens from different forestry systems (agroforestry and traditional forest control) (Heim et al. 2022). Other past works, based on NIRS combined to PLS-DA models, were conducted to classify efficiently (with accuracy ranging from 86 to 100%) *Eucalyptus* wood specimens from natural and planted forest (Ramalho et al. 2018), and to classify and identify twelve native wood species from homogeneous plantations, with good accuracy (93.2%) (Pace et al. 2019).

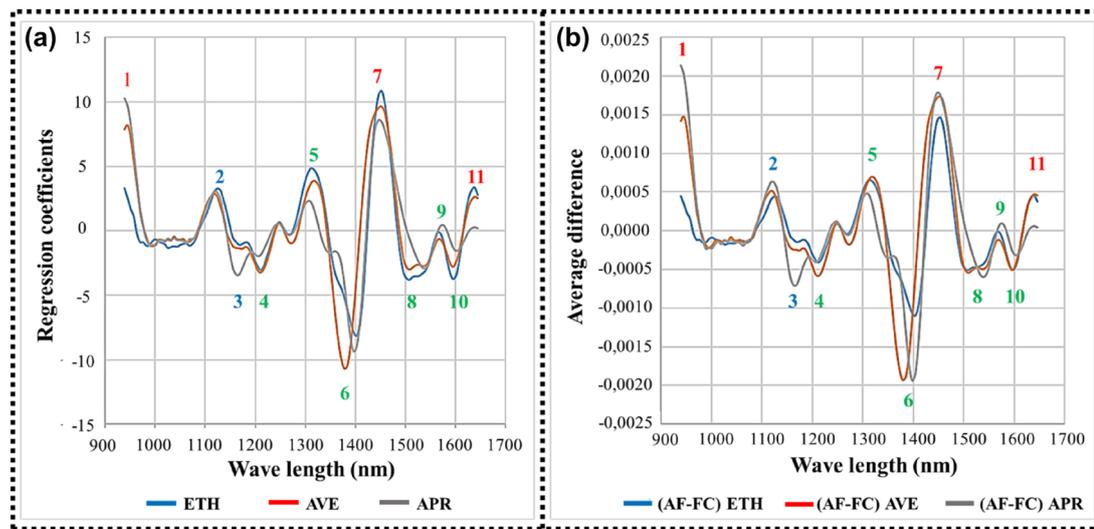
### 3.3 Chemical differences between AF and FC samples by NIR-spectrometry analyses

The above results from PLS-DA models highlighted that ethanol and water extractive compounds only contributed to approximately 5.9% [90.3% (ETH)–84.4% (APR)] in the AF and FC samples discrimination. In this sense, other extractive compounds (by using other solvents, or components highly bound to the cell wall) or the composition in macromolecules constituting the wood cell wall play an important role in the differences in chemical compositions between AF and FC walnut woods. This statement is in agreement with the results obtained by NIR-spectroscopy analyses, presented in Figure 4 and Table 1.

Figure 4a and b show the regression coefficients of the 1st component from PLS-DA analyses and the difference in average NIR spectra, respectively, of ETH, AVE and APR

walnut wood samples from forestry (FC) and agroforestry (AF). Table 1 indicates the NIRS absorption bands normally associated with the main chemical components contained in the wood specimens.

It appeared clearly that the difference in chemical composition between raw (ETH), ethanol extracted (AVE) and water extracted (APR) from AF and FC systems depends not only on extractives compounds (peaks 1, 7 and 11) but also on hemicelluloses (peaks 5 and 6), cellulose (peaks 4, 8, 9 and 10) and lignin (peaks 2, 3,7). Figure 4b highlights that the main differences in chemical composition of AF and FC wood could be also explained by the contents in lignin (peaks 3 and 7) and hemicelluloses (peaks 5 and 6). According to the literature, lignin content is affected in wood formed under gravitropic stimulation or mechanical stress (Novaes et al. 2010; known as reaction wood). In addition, significant effects of eucalyptus plant spacing in insoluble lignin (increases with lower stand density) and holocellulose (decrease with lower stand density) content in wood were observed by Rocha et al. (2016), while extractives and soluble lignin contents were not significantly affected. The holocellulose variation in wood is mainly due to the hemicelluloses content than those of cellulose, this latter being quite constant whatever the hardwood stand population density (Nasser 2008). The competition among plants for light is much more intense in smaller spacing due to the need of the trees to expand their leaf surface for carbon assimilation. Thus, the general trend of increasing insoluble lignin in wood can be explained by greater increase in height of trees cultivated at larger spacing with expected greater percentage of

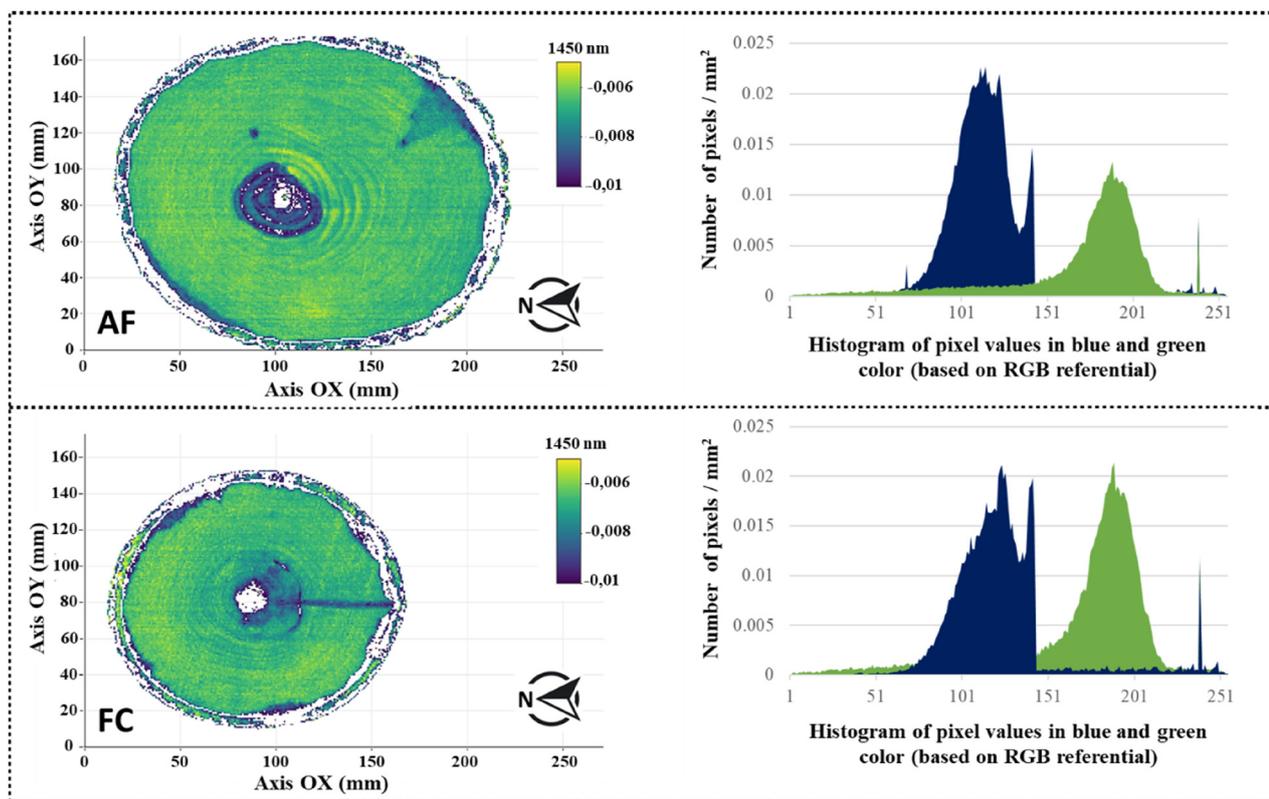


**Figure 4:** (a) Regression coefficients of the 1st component from PLS-DA analyses and (b) difference in average spectrum of walnut wood samples from forestry (FC) and agroforestry (AF) systems before extraction (ETH), after ethanol extraction (AVE) and after water extraction (APR).

**Table 1:** NIRS absorption bands normally associated with the main wood components (cellulose, hemicelluloses, lignin and extractives) contained in the wood specimens. Index numbers (in colour) relate to the specific band in Figure 4.

Index	Wavenumber bands (nm)	Bond vibration	Structure	Remarks	References
1	900–980		Lignin extractives	The major vibrations include the yellow–brown color of the wood that are primarily due to the presence of lignin and extractives	Kelley et al. (2004), Yi et al. (2017)
2	1100–1150	Second overtone C–H stretching of CH <sub>3</sub> groups	Lignin	CH <sub>3</sub> groups and aromatic moieties	Workman and Weyer (2007), Schwanninger et al. (2011)
3	1150–1200	Second overtone asym. C–H, HC=CH stretchings	Lignin		Kelley et al. (2004), Schwanninger et al. (2011)
4	1200–1220	Second overtone C–H stretching	Cellulose	Two to three bands t.a. CH and CH <sub>2</sub> groups, cellulose	Schwanninger et al. (2011)
5	1290–1330	First overtone C–H stretching + C–H deformation	Hemicelluloses all	Tentative assignment to CH <sub>3</sub> groups in acetyl ester groups in hemicelluloses and lignin and all wood components after acetylation	Schwanninger et al. (2011)
6	1350–1400	First overtone C–H stretching and C–H deformation	Hemicelluloses all	Tentative assignment to CH <sub>3</sub> groups in acetyl ester groups in hemicelluloses (normal wood) and all wood components after acetylation	Schwanninger et al. (2011)
7	1420–1460	First overtone O–H stretching	Lignin extractives	Vibration of phenolic hydroxyl groups	Schwanninger et al. (2011)
8	1500–1550	First overtone O–H stretching	Cellulose	Semi-crystalline region of cellulose	Fujimoto et al. (2007), Schwanninger et al. (2011)
9	1570–1600	First overtone O–H stretching	Cellulose	Crystalline region of cellulose in C <sub>1</sub> and C <sub>2</sub>	Tsuchikawa and Siesler (2003), Schwanninger et al. (2011)
10	1600–1610	First overtone O–H stretching	Cellulose	Strongly H-bonded O–H group in cellulose	Schwanninger et al. (2011)
11	1610–1650	First overtone C–H stretching	Extractives		Schwanninger et al. (2011)

Index numbers (in colour) relate to the specific band.



**Figure 5:** Illustrations of NIR absorbance after pretreatment (SNV correction – 2nd derivative) measured at the wavelength of 1450 nm. These images were acquired from agroforestry (AF) and forestry control (FC) slice of air-dried wooden disks, and they were associated to their histograms of pixels values in blue and grey color (based on RGB referential). On the left, the color scale ranged from yellow to dark blue represents the intensity of NIR absorbance at the wavelength of 1450 nm, attributed to first overtone O-H stretching vibration of lignin/extractives compounds (Table 1). On the right, the histograms were issued from the analyses of the wooden disc pictures from hyperspectral camera, using Image J software in order to determine the level of blue pixels representative of lignin/extractives contents.

juvenile wood in its trunk compared with trees at smaller spacing. Juvenile wood has higher lignin content compared with mature wood (Zobel and Van Buijtenen 1989). These chemical composition difference between AF and FC woods could also be explained by the thinning treatments performed in the AF plots. Such silvicultural treatments improve tree growths and delay wood transition from juvenile to mature. Juvenile wood has thin cell wall, shorter fiber length and higher lignin content (Uner et al. 2009). Kramer and Kozłowski (1979) highlighted that wood extractives were products of metabolic tree growth. Hence, forestry treatments, which increase tree growth and vigor, could increase the extractive content in wood or modified their chemical composition (Heim et al. 2022).

### 3.4 Hyperspectral camera analyses

Images from hyperspectral camera analyses, presented on Figure 5, refer to the absorbance spectra collected at the wavelength of 1450 nm, which is attributed to first overtone

O-H stretching vibration of lignin/extractives compounds. This wavelength was chosen due to its most discriminant behavior between AF and FC samples, among all the NIR-S analyses carried out previously on wood powder. The hyperspectral images associated to their respective blue and green color intensities, presented in Figure 5, clearly highlight that AF disk samples contained more lignin/extractives components (high intensity in blue color) than those of FC samples. These results are in agreement with the previous statements about the difference in chemical composition between AF and FC woods.

## 4 Conclusions

This study provides pioneer knowledge on woods formed in agroforestry systems, which are still very under-studied by now. The results highlight the radial evolution in extractives content within a tree and the variability of the chemical characteristics of wood from agroforestry (AF)

hybrid walnut compared to the same species grown in forestry systems (FC). Extractives contents of AF and FC wood specimens are not significantly different. The ethanol and water extractives contents are distributed in a constant way in the radial cross section of the tree, for both AF and CF. However, PLS-DA models developed with NIRS measurements showed that chemical differences exist between AF and FC samples, before and after the two steps extractions processes. These chemical differences are due to the extractive contents but also to the lignin and hemicelluloses distributions in AF and FC wood samples. Such chemical variation (even low) is sufficient to distinguish wood specimens from the two different forestry systems. Hyperspectral imaging allows confirming these tendencies and that AF samples contained more lignin/extractives compounds than FC samples. The methods and results of this work provide a new angle to understand the wood properties of walnut tree growing under different growing conditions allowing to classify the wood quality.

**Author contribution:** All the authors have accepted responsibility for the entire content of this submitted manuscript and approved submission.

**Research funding:** This work was part of the AGROBRANCHE (2018–2022) project (Study of the valuation of branches in agroforestry for bio-based materials and green chemistry), financially supported by the French Environment & Energy Management Agency (ADEME). The authors also gratefully acknowledge the “Fondation de France” association for its financial support attributed to Lucie Heim for her PhD thesis carried out at the Arts et Métiers Institute of Technology.

**Conflict of interest statement:** The authors declare no conflicts of interest regarding this article.

## References

- Beritognolo, I. (2001). *Molecular and biochemical characterization of heartwood formation in black walnut (*Juglans nigra* L.): accumulation of flavonoides and expression of genes controlling their biosynthesis* [in French], Ph.D. thesis. Nancy, France, Université de Lorraine, p. 182, Available at: [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD\\_T\\_2001\\_0260\\_BERITOGNOLO.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2001_0260_BERITOGNOLO.pdf).
- Burtin, P., Jay-Allemand, C., Charpentier, J.P., and Janin, G. (1998). Natural wood coloring process in *Juglans* sp. (*J. nigra*, *J. regia* and hybrid *J. nigra* 23 x *J. regia*) depends on native phenolic compounds accumulated in the transition zone between sapwood and heartwood. *Trees* 12: 258–264.
- Campanhola, C. and Pandey, S. (Eds.) (2019). Chapter 24 – agroforestry. In: *Sustainable food and agriculture*. Academic Press, Rome (Italy), pp. 237–240.
- Fernández-Moya, J., Urbán-Martínez, I., Pelleri, F., Castro, G., Bergante, S., Giorcelli, A., Gennaro, M., Licea-Moreno, R.J., Santacruz Pérez, D., Gutiérrez-Tejón, E., et al. (2019). *Silvicultural guide to managing walnut plantations for timber production*. H2020 EU project “Second generation of planted hardwood forests in the EU - Woodnat”, Coruna (Spain), p. 76.
- Fujimoto, T., Kurata, Y., Matsumoto, K., and Tsuchikawa, S. (2007). Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. *J. Near Infrared Spectrosc.* 16: 529–537.
- Gonçalves, B., Morais, M.C., Pereira, S., Mosquera-Losada, M.R., and Santos, M. (2021). Tree–crop ecological and physiological interactions within climate change contexts: a mini-review. *Front. Ecol. Evol.* 9: 661978.
- Gupta, S.R., Ravindranah, B., and Seshadri, T.R. (1972). *Juglandaceae: poly-phenols of *Juglans nigra**. *Phytochemistry* 11: 2634–2636.
- Hain, A. (2014). *The potential of agroforestry for rural development in the European Union*. In: *Bachelor's thesis (YSS-82812), international development studies Program*. Wageningen University & Research, Netherlands: Available at: <https://edepot.wur.nl/308667>.
- Haupt, M., Leithoff, H., Meier, D., Puls, J., Richter, H.G., and Faix, O. (2003). Heartwood extractives and natural durability of plantation grown teakwood (*Tectona grandis* L.)-a case study. *Eur. J. Wood and Wood Prod.* 61: 473–474.
- Heim, L., Dodeler, R., Brancheriau, L., Marchal, R., Boutahar, N., Lotte, S., Dumarçay, S., Gérardin, P., and Candelier, K. (2022). Comparison of the extractives chemical signatures between branch, knot and bark wood fractions from forestry and agroforestry Walnut (*Juglans regia* × *nigra*), by NIR-spectroscopy and LC-MS analyses. *iFor. Biogeosci. For.* 15: 56–62.
- Hillis, W.E. (1971). Distribution, properties and formation of some wood extractives. *Wood Sci. Technol.* 5: 272–289.
- Kebbi-Benkeder, Z., Colin, F., Dumarçay, S., and Gérardin, P. (2015a). Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species. *Ann. For. Sci.* 72: 277–284.
- Kebbi-Benkeder, Z. (2015b). *Interspecific and intraspecific biodiversity of knot wood extractives* [in French], Ph.D. thesis. Nancy, France, AgroParisTech, p. 206, Available at: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01374613/document>.
- Kelley, S.S., Rials, T.G., Snell, R., Groom, L.H., and Sluiter, A. (2004). Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Sci. Technol.* 38: 257–276.
- Kramer, P.J. and Kozlowski, T.T. (1979). *Physiology of woody plants*. Academic Press, Orlando, FL, USA, p. 811.
- Kulasegaram, S. and Kathiravetpillai, A. (1976). Effect of shade and water supply on growth and apical dominance in tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Trop. Agric.* 53: 161–172.
- Magel, E., Jay-Allemand, C., and Ziegler, H. (1994). Formation of heartwood substances in the stemwood of *Robinia pseudoacacia* L. II. Distribution of nonstructural carbohydrates and wood extractives across the trunk. *Trees* 8: 165–171.
- Mancini, M., Toscano, G., and Rinnan, A. (2019). Study of the scattering effects on NIR data for the prediction of ash content using EMSC correction factors. *J. Chemometr.* 33: e3111.
- Morais, M.C. and Pereira, H. (2012). Variation of extractives content in heartwood and sapwood of *Eucalyptus globulus* trees. *Wood Sci. Technol.* 46: 709–719.

- Muschler, R.G. (2015). Agroforestry: essential for sustainable and climate-smart land use? In: Pancel, L. and Köhl, M. (Eds.), *Tropical forestry handbook*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Myronycheva, O., Sidorova, E., Hagman, O., Sehlstedt-Persson, M., Karlsson, O., and Sandberg, D. (2018). Hyperspectral imaging surface analysis for dried and thermally modified wood: an exploratory study. *J. Spectrosc.* 2018: 7423501.
- Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., and Davies, T. (2004). *A user-friendly guide to multivariate calibration and classification*. NIR Publications, Chichester, UK, p. 344.
- Nair, P.K.R. (2005). Agroforestry. In: Hillel, D. (Ed.), *Encyclopedia of soils in the environment*. Elsevier, pp. 35–44.
- Nasser, A.R. (2008). Specific gravity, fiber length and chemical components of *conocarpus erectus* as affected by tree spacing. *Alexandria J. Agric. Res.* 7: 49–68.
- Novaes, E., Kirst, M., Chiang, V., Winter-Sederoff, H., and Sederoff, R. (2010). Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees. *Physiol.* 154: 555–561.
- Pace, J.H.C., de Figueiredo Latorraca, J.V., Hein, P.R.G., de Carvalho, A.M., Castro, J.P., and da Silva, C.E.S. (2019). Wood species identification from Atlantic forest by near infrared spectroscopy. *For. Syst.* 28: e015.
- Pardon, P., Mertens, J., Reubens, B., Reheul, D., Coussement, T., Elsen, A., Nelissen, V., and Verheyen, K. (2020). *Juglans regia* (walnut) in temperate arable agroforestry systems: effects on soil characteristics, arthropod diversity and crop yield. *Renew. Agric. Food Syst.* 35: 533–549.
- Ramalho, F.M.G., Andrade, J.M., and Hein, P.R.G. (2018). Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. *For. Syst.* 27: e008.
- Rocha, M.F.V., Vital, B.R., De Carneiro, A.C.O., Carvalho, A.M.M.L., Cardoso, M.T., and Hein, P.R.G. (2016). Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. *J. Trop. For. Sci.* 28: 243–248.
- Rowell, R.M., Pettersens, R., Han, J.S., Rowell, J.S., and Tshabalala, M.A. (2005). Cell wall chemistry. In: Rowell, R. (Ed.), *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 35–72, chapter 3.
- Salejda, A.M., Janiewicz, U., Korzeniowska, M., Kolniak-Ostek, J., and Krasnawska, G. (2016). Effect of walnut green husk addition on some quality properties of cooked sausages. *LWT Food Sci. Technol.* 65: 751–757.
- Sandak, A., Sandak, J., and Meder, R. (2016). Assessing trees, wood and derived products with NIR spectroscopy: hints and tips. *J. Near Infrared Spectrosc.* 24: 485–505.
- Savitzky, A. and Golay, M.J.E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal. Chem.* 36: 1627–1639.
- Scheffer, T.C. and Cowling, E.B. (1996). Natural resistance of wood to microbial deterioration. *Annu. Rev. Phytopathol.* 4: 147–168.
- Scheffer, T.C., Morrell, J.J., and Oregon State University (1998). *Natural durability of wood: a worldwide checklist of species*. College of Forestry, Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, OR, USA, p. 62, Available at: [https://ir.library.oregonstate.edu/concern/technical\\_reports/dz010r37p](https://ir.library.oregonstate.edu/concern/technical_reports/dz010r37p).
- Schimleck, L., Evans, R., and Ilic, J. (2003). Application of near infrared spectroscopy to the extracted wood of a diverse range of species. *IAWA J.* 24: 429–438.
- Schwanninger, M., Rodrigues, J.C., and Fackler, K. (2011). A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. *J. Near Infrared Spectrosc.* 19: 287–308.
- Shukla, S., Pandey, V.V., and Kumar, V. (2018). Agroforestry systems as a tool in sustainable rural development, food scarcity and income generation. *Indian For.* 144: 435–441.
- Sollen-Norrlin, M., Ghaley, B.B., and Rintoul, N.L.J. (2020). Agroforestry benefits and challenges for adoption in Europe and beyond. *Sustainability* 12: 7001.
- Taylor, A.M., Gartner, B.L., Morrell, J.J., and Tsunoda, K. (2006). Effects of heartwood extractive fractions of *Thuja plicata* and *Chamaecyparis nootkatensis* on wood degradation by termites or fungi. *J. Wood Sci.* 52: 147–153.
- Terrasse, F., Brancheriau, L., Marchal, R., Boutahar, N., Lotte, S., Guibal, D., Pignolet, L., and Candelier, K. (2021). Density, extractives and decay resistance variabilities within branch wood from four agroforestry hardwood species. *iFor. Biogeosci. For.* 14: 212–220.
- Toshiaki, U. (2001). Chemistry of extractives. In: De David, N.S.H., Nobuo, S. (Eds.), *Wood and cellulosic chemistry. Journal of the American society*. Marcel Dekker Inc., New York, USA, pp. 213–241, Chapter 6.
- Tsuchikawa, S. and Siesler, H.W. (2003). Near-infrared spectroscopic monitoring of the diffusion process of deuterium-labeled molecules in wood. Part I: softwood. *Appl. Spectrosc.* 57: 667–674.
- Uner, B., Oyar, O., Var, A.A., and Altnta, O.L. (2009). Effect of thinning on density of *Pinus nigra* tree using X-ray computed tomography. *J. Environ. Biol.* 30: 359–362.
- Vek, V., Oven, P., Ters, T., Poljanšek, I., and Hinterstoisser, B. (2014). Extractives of mechanically wounded wood and knots in beech. *Holzforschung* 68: 529–539.
- Workman, J.J. and Weyer, L. (2007). *Practical guide to interpretive near infrared spectroscopy*. CRC Press, Boca Raton, USA, p. 344.
- Yi, J., Sun, Y., Zhu, Z., Liu, N., and Lu, J. (2017). Near-infrared reflectance spectroscopy for the prediction of chemical composition in walnut kernel. *Int. J. Food Prop.* 20: 1633–1642.
- Zobel, J.B. and Van Buijtenen, J.P. (1989). *Wood variation: its causes and control*. Springer, New York, USA, p. 363.

### **4.3 Composition biochimique du bois de peupliers agroforestiers**

Les résultats obtenus par imagerie hyperspectrale dans le cas des noyers agroforestiers étant encourageants, la dernière étude de la partie biochimie sera consacrée à la comparaison de la composition biochimique des arbres agroforestiers du bois de tronc des peupliers agroforestiers à celles des peupliers forestiers témoins. L'analyse a été menée principalement sur la teneur en lignine, évaluée par imagerie hyperspectrale NIR, permettant ainsi de déterminer l'impact des pratiques sylvicoles sur la composition chimique du bois de peuplier. En effet, les résultats obtenus sur le noyer nous ont conduits à penser que le suivi de la lignine constituait une bonne piste pour décrire l'effet du traitement sylvicole. La dernière partie de ce travail a consisté à réaliser un focus sur les parties de bois de flexion, de compression et de tensions, à la fois sur les peupliers AF et FC, afin d'évaluer l'impact des conditions de croissance sur la formation de bois de réaction. Les différents protocoles d'analyses mis en place, ainsi que les résultats relatifs à ce travail sont présentés dans l'article suivant, publié dans le journal *Agroforestry System* (HEIM et al., 2023).

**NIR-Hyperspectral camera Analyses for differencing Agroforestry and Forestry  
Poplar Woods.**

Lucie Heim<sup>1,2,3,4</sup>, Loïc Brancheriau<sup>1,2</sup>, Remy Marchal<sup>3</sup>, Nabila Boutahar<sup>1,2</sup>, Eric Badel<sup>4</sup>, Louis  
Denaud<sup>3</sup>, Karima Meghar<sup>5,6</sup> and Kevin Candelier<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, Research Unit BioWooEB, 34000, Montpellier, France.

<sup>2</sup>BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

<sup>3</sup>Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP, UBFC, HESAM Université,  
F-71250 Cluny, France,

<sup>4</sup>Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, 63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>5</sup>CIRAD, Research Unit QualiSud, Montpellier, France.

<sup>6</sup>QualiSud, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

Published in Agroforestry Systems, July 2023

DOI 10.1007/s10457-023-00877-5



# NIR-hyperspectral camera analyses for differencing agroforestry and forestry poplar woods

Lucie Heim · Loïc Brancheriau · Remy Marchal · Nabila Boutahar · Louis Denaud · Eric Badel · Karima Meghar · Kevin Candelier

Received: 1 March 2023 / Accepted: 18 July 2023  
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature B.V. 2023

**Abstract** Wood characteristics of trees grown in agroforestry systems are still little studied, while their growth conditions are different from conventional stands. This work focused on the impact of the agroforestry system on the lignin/cellulose ratio of hybrid poplar trees. One disk sample was harvested on 6 agroforestry (AF) and 6 forest control (FC) poplar trees, at breast height ground level (1.30 m). Every disk was analyzed by Near Infrared Hyperspectral imaging using a Specim FX17 (Specim, Spectral Imaging Ltd.). Images from hyperspectral camera analyses corresponding to absorbance spectra were collected at the wavelength of 1450 nm, attributed

to first overtone O–H stretching vibration of lignin/extractives compounds, in order to clearly observe the chemical difference between AF and FC poplar woods. The results indicated significant difference between the chemical composition, based on estimated lignin content, of AF and FC poplar woods. According to the results from NIR-hyperspectral images analyses, the lignin content appeared to be lower in AF poplar wood ( $9.8 \pm 1.1$  pixels/mm<sup>2</sup>) than in FC poplar wood ( $16.1 \pm 3.8$  pixels/mm<sup>2</sup>). These results could be explained by the different tree growing conditions between the both systems. AF poplar tended to produce more tension wood and more

---

L. Heim · L. Brancheriau · N. Boutahar · K. Candelier (✉)  
CIRAD, UR 114 BioWooEB, CIRAD-Unité de  
Recherches BioWooEB, Montpellier, France  
e-mail: kevin.candelier@cirad.fr

L. Heim  
e-mail: lucie.heim@ensam.eu

L. Brancheriau  
e-mail: loic.brancheriau@cirad.fr

N. Boutahar  
e-mail: nabila.boutahar@cirad.fr

L. Heim · L. Brancheriau · N. Boutahar · K. Candelier  
BioWooEB, CIRAD, University of Montpellier,  
Montpellier, France

L. Heim · R. Marchal · L. Denaud  
Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP,  
HESAM University, 71250 Cluny, France  
e-mail: Remy.marchal@ensam.eu

L. Denaud  
e-mail: louis.denaud@ensam.eu

L. Heim · E. Badel  
INRAE, PIAF, Université Clermont Auvergne,  
63000 Clermont-Ferrand, France  
e-mail: eric.badel@inrae.fr

K. Meghar  
CIRAD, UR 114 BioWooEB, CIRAD-Unité de  
Recherches QualiSud, Montpellier, France  
e-mail: karima.meghar@cirad.fr

K. Meghar  
QualiSud, CIRAD, University of Montpellier, Montpellier,  
France

juvenile wood than FC poplar, which resulted in a lower concentration in lignin.

**Keywords** Cellulose · Flexure wood · Growing conditions · Lignin · *Populus deltoïde* × *Populus nigra* · Koster · NIR-hyperspectral imaging

## Introduction

Agroforestry is a dynamic, ecologically based natural resources management system that, through the integration of trees on farms and in the agricultural landscape, diversifies and sustains production for increased social, economic and environmental benefits for land users at all levels. Today's agroforestry draws from traditional practices but has been adapted to modern farming constraints: specific maintenance techniques, low tree density per hectare, trees aligned and chosen for their compatibility with crops (most often for food use) and their economic or environmental value.

Poplar is a fast-growing tree species that has been extensively planted in many countries and provides industrial wood for paper pulp, light packaging industry, plywood or even furniture or construction (Liesebach 2020). In addition to growing in plantations for wood production, poplar is also planted in agroforestry systems especially as a fast-growing windbreak and/or an extra income stream for farmers. Poplar tree is considered as a good choice for agroforestry systems due to (1) its little shading effect on crops; (2) its contribution to soil fertility through its leaf litter; (3) its suitability with a wide variety of commonly planted inter-crops as wheat, oat, sorghum, maize; (4) its wood production that could generate additional income at the end of the rotation (Chahal et al. 2012).

Indeed, due to its short rotation cycle, generally between 10 and 15 years, poplar provides a quick additional income for plantation owners, compared to other species. In addition, this rotation period can be reduced to 3–5 years for small diameter pulpwood for paper production, 6–8 years for medium diameter poplar, and 10–15 years for large diameter poplar for plywood production, depending on the stand plantation density, genotype and site conditions (Oliveira et al. 2020).

Thus, poplar is a local asset worth preserving and its timber has unique qualities such as resistance and

lightness. Poplars (*Populus spp.*) has a rapid juvenile growth, resulting in a high volume production per hectare. Of course, the logs of the “high-value trees agroforestry system” are the most interesting for both veneer and sawmill processing, especially since these systems are becoming more prevalent.

Aboveground biomass in poplar plantations or forestry system (FS) and agroforestry systems (AF) has been widely studied around the world (Laureysens et al. 2004; Zabek and Prescott 2006; Fang et al. 2007; Christersson 2010; Fortier et al. 2010; Truax et al. 2012). These previous works reported that associating poplar trees and crops is more productive than crop rotations separating crops on one side and trees on the other side. For example, a traditional agroforestry plot, associating poplars with cereals, showed that a 100 ha agroforestry farm produces as much biomass as a 140 ha farm separating its crops (Dupraz and Liagre 2008). Intercrops production seems to be modified year by year by the increase of canopy cover, while wood production is mostly related to site conditions and tree density regulated by periodic thinnings (Etienne and Rapey 1999). Moreover, forestry systems with low planting density require more care and pruning of trees to achieve a high-value clean trunk (Nerlich et al. 2013). Based on growth data after 5–8 years under temperate and Mediterranean conditions, Báder et al. (2022) showed that widely spaced deciduous trees in agroforestry areas have grown very satisfactorily compared to the same species in adjacent forest stands. Van Noordwijk and Lusiana (1999) found that the height of the trees was always greater in the classical forestry timber system compared to the agroforestry system because dense planting of trees underwent competition between trees. Usually, forestry trees are more slender than agroforestry trees. They invest less resources in canopy development and more resources for trunk growth. At the opposite, agroforestry trees seem to develop larger crowns (compared to planted forestry trees). They produce more assimilates and since they are generally more exposed to the wind, they produce a larger trunk diameter, which provides the stem resistance. In other words, agroforestry trees are less slender than planted or control forest systems (Bonnesoeur et al. 2016). These differences could be explained by a difference in wood maturity (part of juvenile wood).

In spite of impacts of forestry conditions on tree growing and on woody biomass production, very

little research has evaluated the quality of wood material coming from agroforestry systems and compared it to forestry systems. Moreover, the few results obtained in the literature are often in contrast to each other. Taghiyari and Sisi (2012) reported that 8 years old *Populus deltoids*, intercropped with maize, had larger wood volume compared to the trees from forestry plantations. They stated that the trunk diameter of *Populus nigra* intercropped with alfalfa was greater than in forestry plantations and the greatest difference in diameter growth occurred from age 3 to about age 7. Peszlen (1993) found that wood properties of poplars had no significant relationship with growth rate. In France, poplars (cultivar I-214) were found to have a nearly cylindrical shape in both agroforestry and forestry plantation systems. Through this study, Peszlen (1993) highlighted that the wood density, microfibril angle and modulus of elasticity were reported very close in agroforestry and forestry trees. Thus, the wood quality of poplar from agroforestry was found to be very similar to wood quality produced in a forest (Kouakou et al. 2016). However, some researches have also emphasized that low stand density, pruning and a higher exposition to the wind within agroforestry systems could highly affect the tree growing kinetic, the wood anatomy and chemical composition, and finally the wood properties (Zobel and Van Buijtenen 1989; Uner et al. 2009; Novaes et al. 2010; Rocha et al. 2016).

NIR spectroscopy is also widely used in wood characterization, mostly to assess material properties based on chemical information (Leblon et al. 2013). The benefits of such a method reside in the lower time-consuming, labor-intensive, expensive and destructive conventional wet chemical analytical methods (Defoirdt et al. 2017). The NIR (Near-Infrared) spectroscopy has been efficiently used for the assessment of chemical properties wood (Terrasse et al. 2021). Schimleck et al. (2003) showed that it is possible to accurately calibrate NIR models for a wide range of species that represent different taxa, wood chemistry and physical properties. More recently, high-resolution near-infrared hyperspectral image acquisition, resulting in an infrared spectrum for each pixel of the image, has been developed. Defoirdt et al. (2017) highlighted the usability of NIR hyperspectral imagery as proxy for density and lignin content of poplar wood, where NIR spectra were used for 2D tension wood and lignin mapping. In addition, this

technic has been showed as a valuable tool to estimate the difference in lignin content between agroforestry and forestry walnut tree (Heim et al. 2022). This study aims to improve the knowledge about the chemical composition, especially based on the lignin content of poplar wood formed in agroforestry context (AF) poplar trees and compared to standard forestry control plots (FC). All samples were analyzed by NIR-spectroscopy hyperspectral camera, in order to evaluate the impact of the two silvicultural practices.

## Materials and methods

### Experimental site

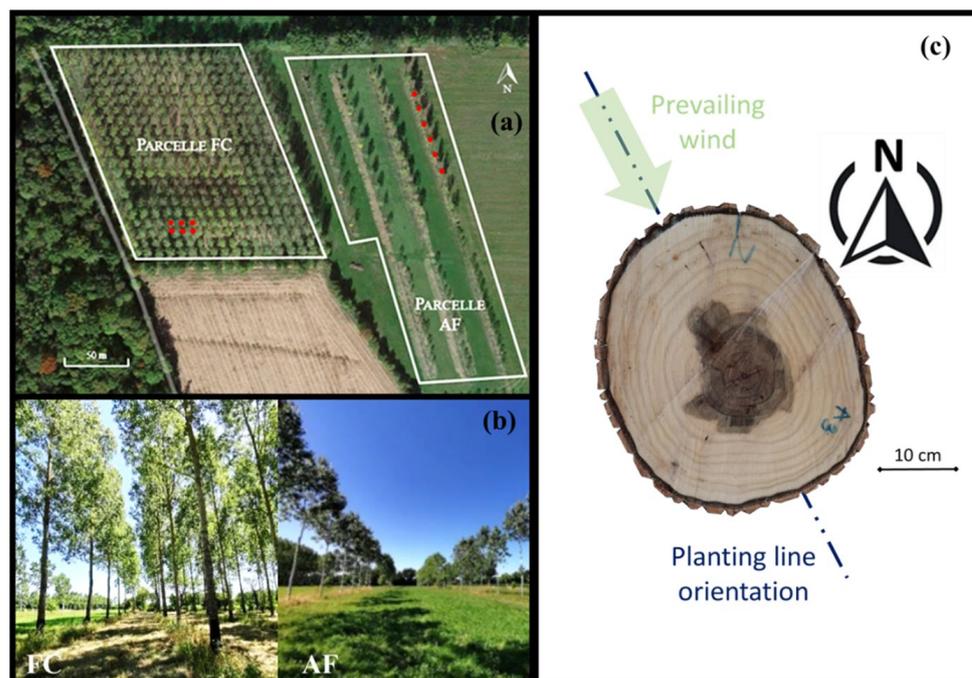
The experiment was carried out in Lent, located in east-middle France (46°05'11.1"N 5°10'22.7"E and elevation 255 m). Two plots composed by 19 years old poplar and 13 years old, respectively in forest control and agroforestry plots, are studied. The poplar cultivar was "Koster" (*Populus deltoïde* × *Populus nigra*), showing a great adaptability in the whole France area (Paillassa 2002). Koster cultivar is supposed to be a good candidate for agroforestry systems: it shows a low sensibility to the wind, a good resistance against pruning, low water requirements and good adaptation to stations located outside the valley (Paillassa 2002; CRPF 2016). In our systems, the tree stand densities were around 50 trees/ha and 200 trees/ha in AgroForestry plot (AF) and Forestry Control (FC) plot, respectively (Fig. 1a). The planting lines of poplar trees were all Northwest–Southwest oriented, within the both plots (Fig. 1a).

Trees were spaced by 5 × 5 m in FC plot and 10 × 20 m in AF plot (10 m within the planting line, 20 m between each planting line) (Fig. 1b). In agroforestry system, fodder grass were annually harvested between each line on a 20 m wide strip for animal feedings. Both plots were exposed to a dominant wind coming from the Northwest direction (Fig. 1c).

### Trees selection

As shown in Fig. 1a, 12 'Koster' poplar trees were selected in the two AF (6 trees) and FC (6 trees) plots. All of the selected poplar trees (AF and FC) were harvested in April 2022, limiting the seasonal impact on wood chemical composition (i.e., starch

**Fig. 1** **a** Poplar trees selection (red bullets) in the agroforestry (AF) and forestry control (FC) plots, in Lent located in east-middle France southern France. **b** Pictures of poplar trees distribution in AF and FC plots. Schematic view of tree position according to the prevailing wind (North-Northwest) direction and the planting line orientation (from Northwest to Southwest)



in sapwood). For each plot, the 6 trees were selected mainly according to constraints related the owner of the plots. However, FC trees were harvested at locations in the plot so that the wind effect would be representative of the entire stand (Fig. 1a). In addition, even if AF trees were collected at the periphery, these are exposed to the wind as the other trees from the plot because of the wide spacing between trees and planting line. The poplar trees issued from AF plot was marked with references from A3 to F3, and the poplar trees coming from FC plots were referred from G3 to L3.

### Sampling

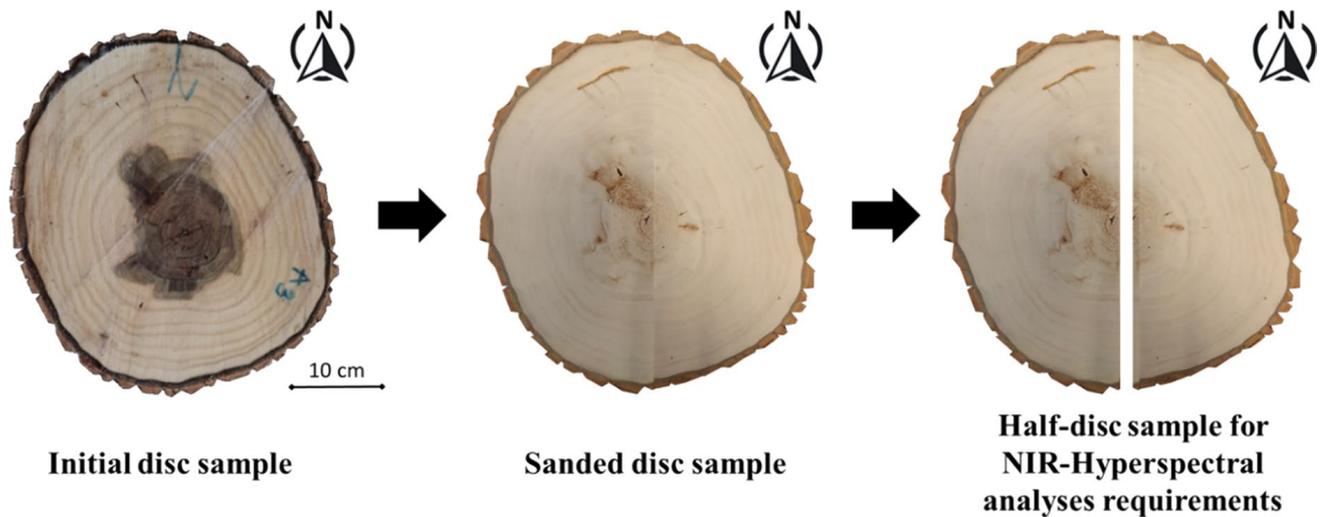
For each poplar tree, a 5 cm thick wooden disc was collected at 1.30 m from the ground. Each disc was lightly sanded in order to get a surface without irregularities limiting high variability in scattering effect during NIR-S measurements (Mancini et al. 2019). The machined face was then vacuum cleaned to avoid the accumulation of wood powder in the wood cells, which could impact the NIR-S measurements. Finally, the discs samples were cut in two equal parts, along the north–south direction, in order to obtain samples with a size adapted to the capacity of the hyperspectral camera device (max: 20×40 cm). All the samples were placed in a conditioning chamber (regulated at

$20 \pm 2$  °C,  $65 \pm 5\%$  Relative Humidity). NIR-Hyperspectral analysis were performed after mass stabilization. The process of wood sampling and preparation is illustrated in Fig. 2.

### NIR-hyperspectral camera analyses

#### *AgroForestry versus forestry wood discs*

Hyperspectral measurements were performed on the half-wooden discs using a Specim FX17 camera (Specim, Spectral Imaging Ltd.). The distance between the objective of the camera and the surface of the wood samples was fixed at 22 cm. The settings were a spectral range of 933–1721 nm and a 3.5 nm increments. Each NIR spectrum was digitized in 224 wavelengths. The spatial resolution was set to 0.27 mm/pixel. For each image, spectral data were collected as a 3D matrix of  $640 \times 1002 \times 224$  values. The dimensions  $640 \times 1002$  were associated with the spatial dimensions of each disc. Images from hyperspectral camera analyses corresponding to absorbance spectra were collected at the wavelength of 1450 nm, attributed to first overtone O–H stretching vibration of lignin/extractives compounds. The both half-wooden discs images from the same tree were merged together. Then, these images were analyzed with Image J 1.53 k software (Rasband 2018) in order



**Fig. 2** Process of wood sampling and preparation for NIR-hyperspectral camera analyses

to determine the values of pixels for each color in the RGB referential. The values of RGB pixels were analyzed on each AF and FC poplar wooden disc without taking the bark into consideration (Fig. 3).

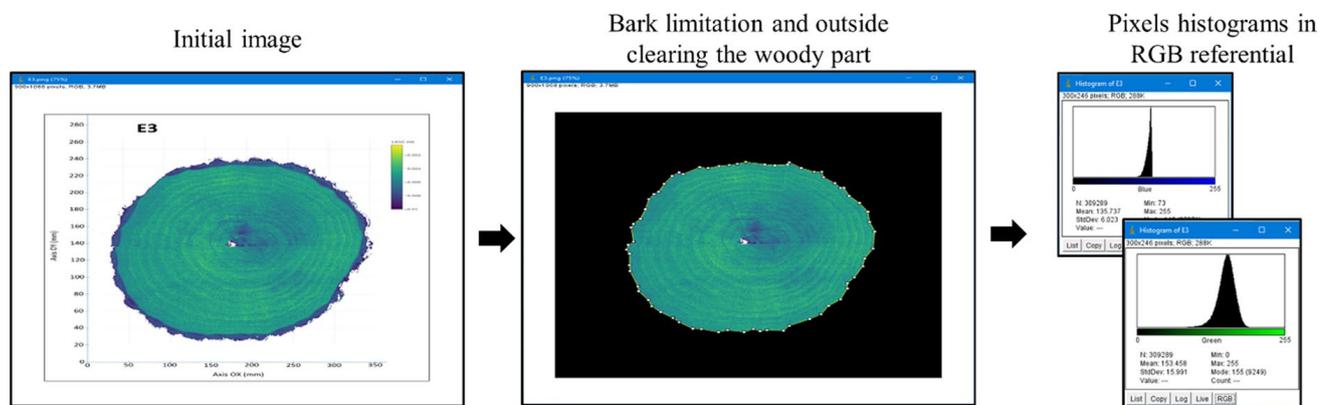
*Flexure woods from agro forestry and forestry poplar trees*

Similar image analyzes were performed on selected areas, representative of Tensile Flexure Wood (TFW) and Compression Flexure Wood (CFW). The TFW and CFW were studied by Roignant et al. (201), and they are represented in Fig. 4. These two areas were analyzed for all AF and FC poplar discs, according to the same protocol previously described. The values

of RGB pixels were then analyzed on each flexural wood and opposite wood areas. The bark portion was removed from the analyses (Fig. 4).

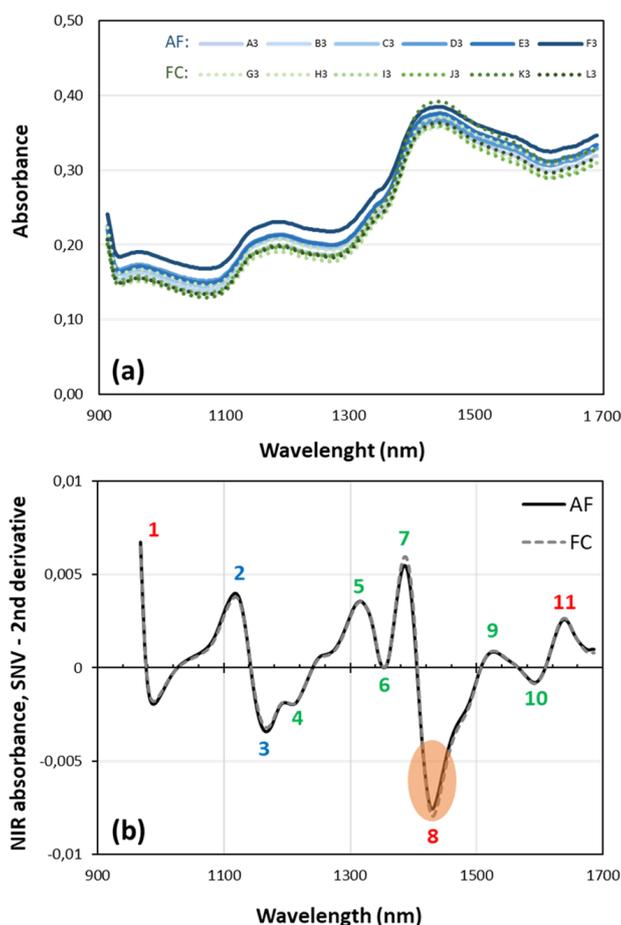
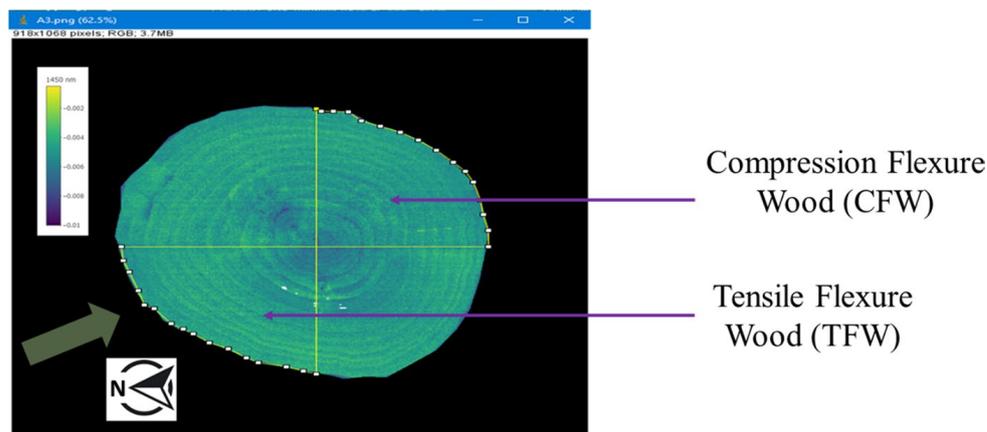
**Results and discussions**

Figure 5 shows the raw and average NIRS spectra of wood samples from poplar trees from FC and AF samples. Table 1 indicates the NIRS absorption bands associated with the main chemical components contained in the wood specimens. It is clear that the differences in chemical composition between AF and FC poplar wood depend mainly on differences in the content of celluloses (peak 7) and on the amount of



**Fig. 3** Process analyze concerning determination of RGB pixels on the images from hyperspectral camera (E3 for example), using Image J 1.53 k software

**Fig. 4** Selection of Tensile Flexure Wood (TFW) and Compression Flexure Wood (CFW) areas for the determination of RGB pixels on the images from hyperspectral camera (A3 for example), using Image J 1.53 k software. The green arrow represents the direction of daily wind



**Fig. 5** **a** Raw absorbance spectra and **b** average absorbance spectra after pretreatments (SNV correction—2nd derivative) of AF and FC poplar trees. The area in orange specifies the wavenumber used for the NIR-hyperspectral camera analyses. Peaks 5 and 6 refer to the hemicellulose. Peaks 4, 7, 9 and 10 refer to the cellulose. Peaks 2 and 3 and peak area delimited around peak 8 refer to lignin. Peaks 1 et 11 refer to extractives

lignin/extractives (peak 8). The highest difference between AF and FC poplar sample was observable for a wavelength of 1450 nm that is identified by peak number 8 in Fig. 5.

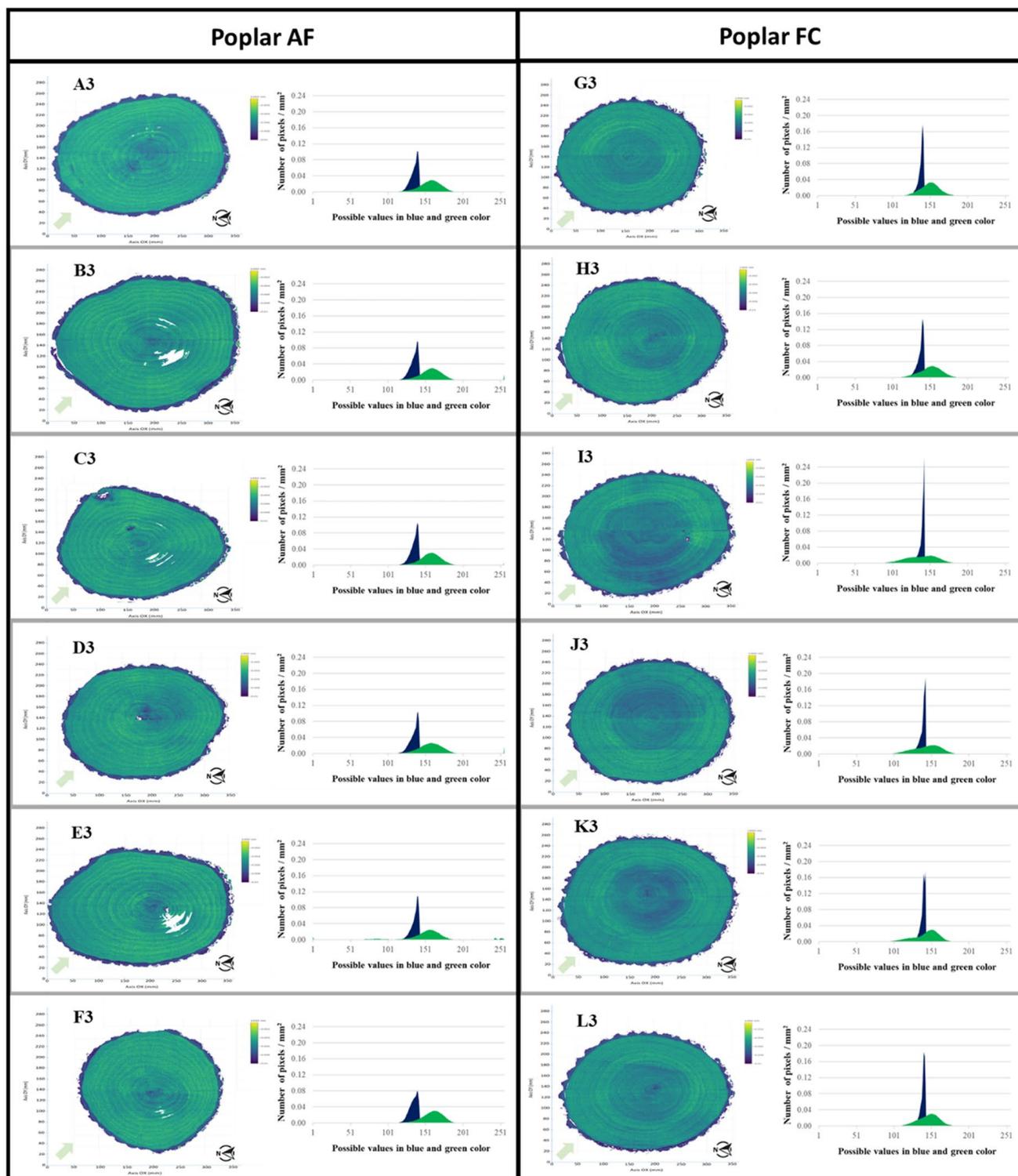
Images from hyperspectral camera analyses, presented on Fig. 6, show the absorbance spectra collected at the wavelength of 1450 nm (most discriminant wavelength between FC and AF), which is attributed to first overtone O–H stretching vibration of lignin/extractives compounds. The hyperspectral images associated to their respective blue and green color intensities, presented in Fig. 6, clearly highlight that AF discs samples contained less lignin/extractives components (low intensity in blue color) than those of FC samples.

In addition, Table 2 presented the average value and the associated standard deviation of the maximal value of the number of green and blue pixels, observed on FA and FC samples. These results show that the AF discs samples have a maximal value of the number of blue pixels /mm<sup>2</sup> of  $9.8 \pm 1.1$ , whereas the AF discs samples have a maximal value of the number of green pixels /mm<sup>2</sup> of  $16.1 \pm 3.8$ , showing that AF poplar contains lower lignin/extractives content (low number of blue pixels) than those of FC samples. Moreover, previous work conducted on AF and FC hybrid walnut (*Juglans regia* × *nigra*) trees shown that the extractives fraction is not sufficient to explain the chemical differences between AF and FC trees and to classify these trees according to the silvicultural system (Heim et al. 2022). Moreover, poplar wood is well known to have a low extractives contents, so the chemical difference between AF and FC poplar is probably mainly due to their lignin contents. These differences in macromolecules

**Table 1** NIRS absorption bands associated with the main wood components (cellulose, hemicelluloses, lignin and extractives) contained in the poplar wood specimens

Index	Wavelength bands (nm)	Bond vibration	Structure	Remarks	References
1	900–980		Lignin / Extractives	The major vibrations include the yellow–brown color of the wood that are primarily due to the presence of lignin and extractives	Kelley et al. (2004) Yi et al. (2017)
2	1100–1150	Second overtone C-H stretching of CH <sub>3</sub> groups	Lignin	CH <sub>3</sub> groups and aromatic moieties	Workman & Weyer (2007) Schwanninger et al. (2011)
3	1150–1200	Second overtone asym. C-H, HC=CH stretchings	Lignin	–	Kelley et al. (2004) Schwanninger et al. (2011)
4	1200–1220	Second overtone C-H stretching	Cellulose	Two to three bands t.a. CH and CH <sub>2</sub> groups, cellulose	Schwanninger et al. (2011)
5	1290–1310	First overtone C-H stretching + C-H deformation	Hemicelluloses / all	Tentative assignment to CH <sub>3</sub> groups in acetyl ester groups in hemicelluloses and lignin and all wood components after acetylation	Schwanninger et al. (2011)
6	1310–1350	First overtone C-H stretching and C-H deformation	Hemicelluloses / all	Tentative assignment to CH <sub>3</sub> groups in acetyl ester groups in hemicelluloses (normal wood) and all wood components after acetylation	Schwanninger et al. (2011)
7	1350–1380	First overtone O-H stretching	Cellulose	Amorphous regions in cellulose	Fujimoto et al. (2007)
8	1420–1460	First overtone O-H stretching	Lignin / Extractives	Vibration of phenolic hydroxyl groups	Schwanninger et al. (2011)
9	1570–1600	First overtone O-H stretching	Cellulose	Crystalline region of cellulose in C <sub>1</sub> and C <sub>2</sub>	Tsuchikawa and Siesler (2003) Schwanninger et al. (2011)
10	1600–1610	First overtone O-H stretching	Cellulose	Strongly H-bonded O–H group in cellulose,	Schwanninger et al. (2011)
11	1610–1650	First overtone C-H stretching	Extractives	–	Schwanninger et al. (2011)

Index numbers (in color) relate to the specific band in Fig. 4b



**Fig. 6** Illustrations of NIR absorbance after pretreatment (SNV correction—2nd derivative) measured for the wavelength of 1450 nm. These images were acquired from agroforestry (AF) and forestry control (FC) slices of air-dried wooden discs. Images were associated to their histograms of pixels values in blue and grey color (based on RGB referential). On the left, the color scale ranges from yellow to dark blue and

represents the intensity of NIR absorbance at the wavelength of 1450 nm, which is attributed to first overtone O–H stretching vibration of lignin/extractives compounds (Table 1). On the right, the histograms were constructed from the analyses of the wooden disc pictures recorded by hyperspectral camera. The blue pixels represent the lignin/extractives contents. The green arrow represents the main direction of wind

**Table 2** Maximum value [and associated standard deviation (SD)] of the numbers of green and blue pixels, observed on the images from AF and FC poplar discs, obtained by NIR hyperspectral Imagery at the wavelength of 1450 nm

Numbers of pixels /mm <sup>2</sup>				
Pixels colors	AF		FC	
	Maximum value	SD	Maximum value	SD
Blue	9.8	± 1.1	16.1	± 3.8
Green	2.8	± 0.2	2.7	± 0.5

chemical composition could be explain by the stand density. Jiang et al. (2007) highlighted that poplar tree growing in a stand with low planting density presented higher proportion of juvenile wood basal area at breast height, with higher fiber length, than those from plot with high stand density. The juvenile wood of poplar usually contains higher content of hollocelluloses than in mature wood (Bao et al. 2001). An inverse correlation was found concerning the lignin fraction (Bao et al. 2001). However, these statements need to be taken with precaution because the AF poplar are three years younger than FC poplar tree, which gives them probably more juvenile wood in relative value.

The results obtained by analyses carried out on tensile flexure wood (TFW) and compression wood (CFW) enlighten that TFW contains lower lignin content than CFW for Agroforestry poplar tree (Fig. 7). The same results were observed for trees growing in forestry system.

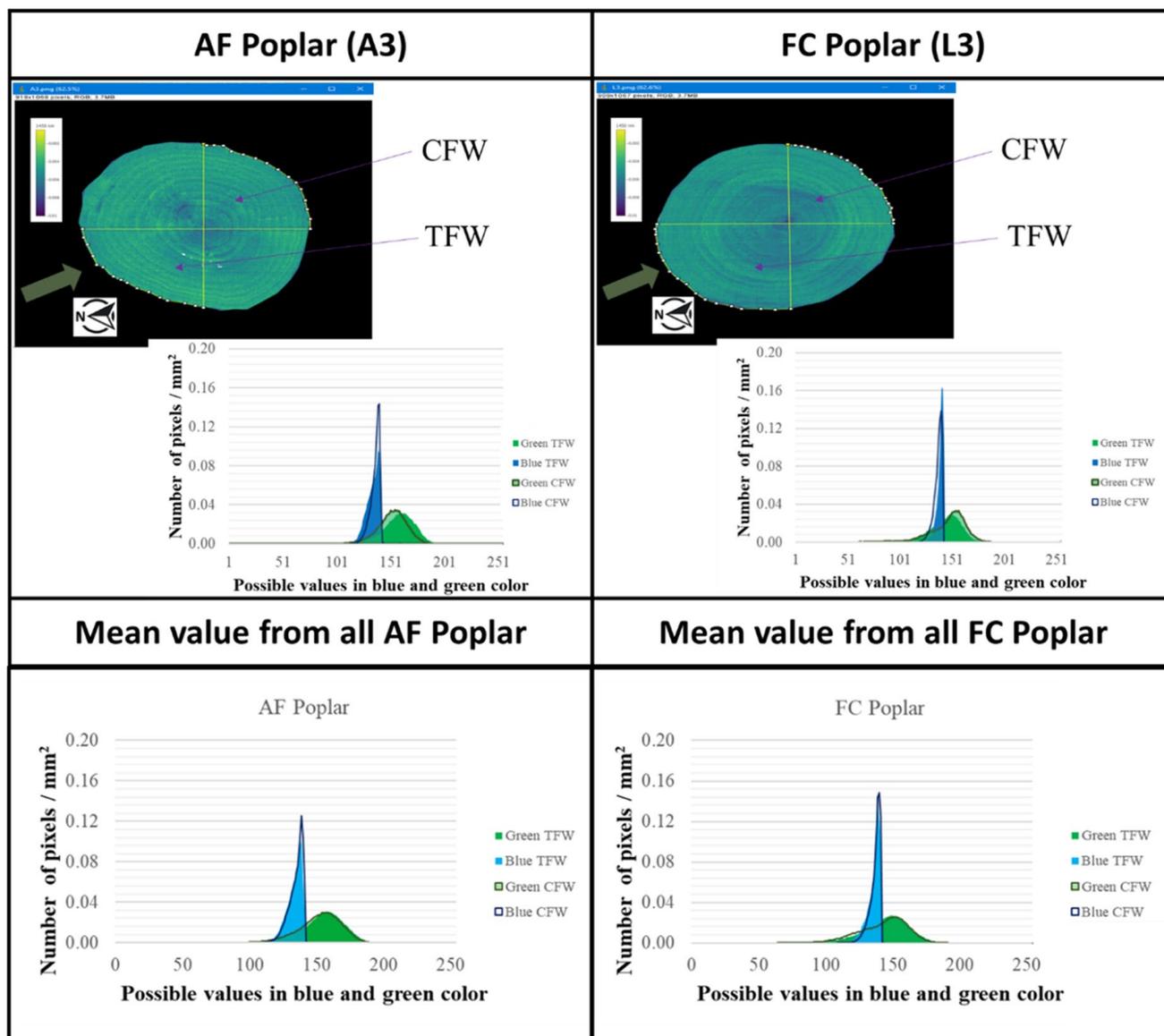
The higher exposition toward dominant wind present within agroforestry plot could also affect the wood chemical composition of trees growing in such system compare to those from traditional forest area. Due to the higher wind exposure, poplar trend to produce flexure wood during its growing. This flexure wood was first defined by Telewski (1989) as the result of the regular mechanical deformations of the stem. In case of poplar, its anatomy was carefully analyzed by Roignant et al (2017) who enlightened several similarities between tension wood and flexure wood formed in the stretched zone, called Tensile Flexure Wood. Especially, it can contain a gelatinous G layer in the stretched cells. In many tree species including *Populus*, tension wood fibers

form a distinctive gelatinous inner wall (GL). This G layer is then thick and is known to have a high cellulose content (Côté et al.1969; Mellerowicz and Sundberg 2008) and a microfibril angle close to zero, i.e. aligned to the cell axis (Prohdan et al. 1995), no lignin (Pilate et al. 2004), and a high mesoporosity (Chang et al. 2009). Our hyperspectral images (Figs. 6 and 7) showed larger areas of tensile flexure wood (green arrow) in all AF samples than in FC samples. Roignant et al. (2017) highlighted that tensile flexure wood is characterized by lower vessel density, higher fiber diameter, thicker S layer, and the presence of G layer but no difference in lignin content; while Pilate et al. (2004) showed also lower lignin content in tension wood of poplar. These statements are in agreement with the results obtained with AF poplar trees.

In addition, Fang et al. (2008) showed that the growing strength intensity (GSI), that is a good indicator of relative longitudinal growth stress magnitude within trees of the same species, affects the chemical composition of poplar wood. The higher the GSI values, the higher the cellulose content of the wood. Opposite trends for lignin and hemicelluloses contents were also observed in this previous study (Fang et al. 2008). With results support our findings concerning the lower amount of lignin content in tension wood compared to those of opposite wood in AF poplar, that are more submitted to wind than FC trees, whereas no difference were observed on FC Poplar.

However, the literature states sometimes that juvenile wood is slightly richer or similar in lignin than in cellulose (Morais et al. 2017; Lu et al. 2021). This would suggest that the effect of flexure wood is dominant over the presence of juvenile wood in the chemical composition comparison between AF and FC poplar trees.

Even if the FC poplars were three years older than the AF poplars, this age differential does not seem to be a parameter that could explain such a difference in chemical composition of these two samples batches. In other words, three years of age difference between AF and FC trees on the average of all the measurements carried out does not seem to be affecting to alter the observed trend. In fact, Krutul et al. (2019) compared several poplar clones and enlightened that their cellulose content did not depend from the species of tree age. Moreover, the lignin content increased slightly as a tree age, but its content



**Fig. 7** Focus on Tensile Flexure Wood (TFW) and Compression Flexure Wood (CFW) wood areas from agroforestry (AF) and forestry control (FC). NIRS Images were associated to their histograms of pixels values in blue and grey color (based on RGB referential). On the left, the color scale ranges from yellow to dark blue and represents the intensity of NIR absorbance at the wavelength of 1450 nm, which is attributed

to first overtone O–H stretching vibration of lignin/extractives compounds (Table 1). On the right, the histograms were constructed from the analyses of the wooden disc pictures recorded by hyperspectral camera. The blue pixels represent the lignin/extractives contents. The green arrow represents the main direction of wind

in 7-year-old wood was already similar to the level found in 30 years-old wood (Krutul et al. 2019).

### Conclusions

The hyperspectral methods, which used a camera, was quick and easy to use. It provided results with a

new angle to understand the wood chemical composition of poplar trees allowing assessing the wood quality when trees grow under different growing conditions. In this article, hyperspectral NIR imaging was used to analyze the quantitative distribution of lignin content in agroforestry and forestry poplar trees.

The use of the method for agroforestry systems allowed enlightening differences of chemical

components between forestry poplars and poplar woods formed in agroforestry systems; which are still very under-studied by now. Hyperspectral imaging highlighted that AF poplar samples contained lower lignin/extractives compounds than FC samples. In addition, higher proportion in lignin content in the tensile flexure wood in comparison to the compression flexure wood were observed from all AF samples than those from FC samples. This suggests that AF poplar samples contain more cellulose than FC poplar trees. This is a typical pattern of trees that daily experience windy environments and who produce flexure wood in order to keep their straightness and verticality. However, the literature states sometimes that juvenile wood is slightly richer or similar in lignin than in cellulose, suggesting that the effect of flexure wood is dominant over the presence of juvenile wood in the chemical composition comparison between AF and FC poplar trees. In this sense, it could be interesting to be carried out, in the near future, micro-density and micro-fibril angle (MFA) analyses do determine the proportion of juvenile wood from AF and FC poplar trees.

**Acknowledgements** The authors gratefully acknowledge the “Fondation de France” association for its financial support attributed to Lucie Heim for her PhD thesis carried out at the “Arts et Métiers Institute of Technology”.

**Author contributions** KC, LH and LB wrote the main manuscript text. KC, LH and LB prepared all the figures and tables. KM and NB helped in the carrying out of the NIRS analyses. All the authors identified the research problematic, determined the sampling and analyses protocols, and interpreted the results. All authors reviewed the manuscript.

#### Declarations

**Competing interests** The authors declare no competing interests.

#### References

- Báder M, Németh R, Vörös Á, Tóth Z, Novotni A (2023) The effect of agroforestry farming on wood quality and timber industry and its supportation by Horizon 2020. *Agrofor Syst* 97(4):587–603. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2049093/v1>
- Bao FC, Jiang ZH, Jiang XM, Lu XX, Luo XG, Zhang SY (2001) Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in china. *Wood Sci Tech* 35:363–375. <https://doi.org/10.1007/s002260100099>
- Bonnesoeur V, Constant T, Moulia B, Fournier M (2016) Forest trees filter chronic wind-signals to acclimate to high winds. *New Phytol* 210:850–860. <https://doi.org/10.1111/nph.13836>
- Chang SS, Clair B, Ruelle J, Beauchêne J, Di Renzo F, Quignard F, Zhao GJ, Yamamoto H, Gril J (2009) Mesoporosity as a new parameter for understanding tension stress generation in trees. *J Exp Bot* 60:3023–3030. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp133>
- Christersson L (2010) Wood production potential in poplar plantations in Sweden. *Biomass Bioenerg* 34(9):1289–1299. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.03.021>
- Côté WA, Day AC, Timell TE (1969) A contribution to the ultrastructure of tension wood fibers. *Wood Sci Technol* 3:257–271. <https://doi.org/10.1007/BF00352301>
- CRPF (2016) Le peuplier—un feuillu performant cultivé en Rhône-Alpes ». Centre Régional de la Propriété Forestière Rhône-Alpe, St-Didier-au-Mont-d’Or, France: 4 p. [https://pefcaura.com/sites/default/files/prgmaccompagnement/exe\\_fiche\\_essence\\_peuplier\\_09\\_2016\\_v2\\_1-1.pdf](https://pefcaura.com/sites/default/files/prgmaccompagnement/exe_fiche_essence_peuplier_09_2016_v2_1-1.pdf)
- Defoirdt N, Sen A, Dhaene J, De Mil T, Pereira H, Van Acker J, Van den Bulcke J (2017) A generic platform for hyperspectral mapping of wood. *Wood Sci Technol* 51:887–907. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0903-z>
- Devender C, Afzal A, Bhatia JN (2012) Assessment of agroforestry based two-tier-cropping system in Ambala district of Haryana. *Agric Update*. 7(3/4):210–213
- Dupraz C, Liagre F (2008) *Agroforesterie—Des arbres et des cultures*. Éditions France Agricole, Paris, France: 410
- Etienne M, Rapey H (1999) Simulating integration of agroforestry into livestock farmers’ projects in France. *Agrofor Syst* 43:257–272. <https://doi.org/10.1023/A:1026493811593>
- Fang S, Xue J, Tang L (2007) Biomass production and carbon sequestration potential in poplar plantations with different management patterns. *J Environ Manage* 85:672–679. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.014>
- Fang CH, Guibal D, Clair C, Gril J, Liu YM, Liu SQ (2008) Influence of growth stress level on wood properties in Poplar I-69 (*Populus deltoides* Bartr. cv. “Lux” ex I-69/55). *Ann for Sci* 65:307–315. <https://doi.org/10.1051/forest:2008008>
- Fortier J, Gagnon D, Truax B, Lambert F (2010) Biomass and volume yield after 6 years in multiclinal hybrid poplar riparian buffer strips. *Biomass Bioenerg* 34:1028–1040. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.02.011>
- Fujimoto T, Yamamoto H, Tsuchikawa S (2007) Estimation of wood stiffness and strength properties of hybrid larch by near-infrared spectroscopy. *Appl Spectrosc* 61(8):882–888. <https://opg.optica.org/as/abstract.cfm?URI=as-61-8-882>
- Heim L, Brancheriau L, Marchal R, Boutahar N, Lotte S, Denaud L, Badel E, Meghar K, Candelier K (2022) Variation analyses of extractive contents by NIR-spectroscopy bring out the differences between agroforestry and forestry walnut (*Juglans regia* × *nigra*) trees. *Holzforchung* 76(9):781–790. <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0055>
- Jiang ZH, Wang XQ, Fei BH, Ren HG, Xing-E Liu XE (2007) Effect of stand and tree attributes on growth and wood

- quality characteristics from a spacing trial with *Populus xiaohei*. *Ann for Sci* 64(8):807–814. <https://doi.org/10.1051/forest:2007063>
- Jourez B, Riboux A, Leclercq A (2001) Anatomical characteristics of tension wood ad opposite wood in young inclined stems of poplar (*populous euramericana* cv “ghoy”). *IAWA J* 22:133–157. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000274>
- Kelley SS, Rials TG, Snell R, Groom LH, Sluiter A (2004) Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Sci Technol* 38:257–276. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0213-5>
- Kouakou SS, Marchal R, Brancheriau L, Guyot A, Guibal D (2016) The quality of poplar wood from agroforestry: a comparison with forest plantation. 3rd European Agroforestry Conference. Montpellier 23–25:273–276
- Krutul D, Antczak A, Radomski A, Drożdżek M, Kłosińska T, Zawadzki J (2019) The chemical composition of poplar wood in relation to the species and the age of trees. *Annals of Warsaw University of Life Sciences—SGGW. For Wood Technol* 107:131–138
- Laureysens I, Bogaert J, Blust R, Ceulemans R (2004) Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *For Ecol Manag* 187(2–3):295–309. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.005>
- Leblon B, Adedipe O, Hans G, Haddadi A, Tsuchikawa S, Burger J, Stirling R, Pirouz Z, Groves K, Nader J, LaRocque A (2013) A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. *For Chronicle* 89(5):595–606. <https://doi.org/10.5558/tfc2013-111>
- Liesebach M (2020) Poplars and other fast growing tree species in Germany: Report of the National Poplar Commission. 2016–2019, Thünen Working Paper, No. 141a, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig. <https://doi.org/10.3220/WP1585727785000>
- Lu C, Wu J, Jiang Q, Liu Y, Zhou L, You Y, Cheng Y (2021) Liu S (2021) Influence of juvenile and mature wood on anatomical and chemical properties of early and late wood from Chinese fir plantation. *J Wood Sci* 67:72. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-02005-2>
- Mancini M, Toscano G, Rinnan A (2019) Study of the scattering effects on NIR data for the prediction of ash content using EMSC correction factors. *J Chemom* 33:e3111. <https://doi.org/10.1002/cem.3111>
- Mellerowicz EJ, Sundberg B (2008) Wood cell walls: biosynthesis, developmental dynamics and their implications for wood properties. *Plant Biol* 11:293–300. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.03.003>
- Morais PH, Longue D, Colodette JL, Morais EH, Jardim CM (2017) Influence of clone harvesting age of *eucalyptus grandis* and hybrids of *eucalyptus grandis* x *eucalyptus urophylla* in the wood chemical composition and in kraft pulpability. *Ciência Florestal*. 27:237–248. <https://doi.org/10.5902/1980509826462>
- Nerlich K, Graeff-Hönninger S, Claupein W (2013) Agroforestry in Europe: a review of the disappearance of traditional systems and development of modern agroforestry practices, with emphasis on experiences in Germany. *Agrofor Syst* 87:475–492. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9560-2>
- Novaes E, Kirst M, Chiang V, Winter-Sederoff H, Sederoff R (2010) Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees. *Physiol* 154:555–561. <https://doi.org/10.1104/pp.110.161281>
- Oliveira N, Pérez-Cruzado C, Cañellas I, Rodríguez-Soalleiro R, Sixto H (2020) Poplar short rotation coppice plantations under Mediterranean conditions: the case of Spain. *Forests* 11(12):1352. <https://doi.org/10.3390/f11121352>
- Paillassa E (2002) Fiche technique cultivar de peuplier : Koster ». *Forêt-entreprise*, n° 146. Institut pour le développement forestier, Orléans, France. [https://www.peupliersdefrance.org/uploads/uploads-FR/fiches-cultivars/cultivarsREP\\_koster\\_1.pdf](https://www.peupliersdefrance.org/uploads/uploads-FR/fiches-cultivars/cultivarsREP_koster_1.pdf)
- Peszlen L (1993) Influence of site, clone, age, and growth rate on wood properties of three *Populus x euramericana* clones. PhD Diss. in Forestry and Forest Products. VPI & SU Blacksburg, Virginia, 175
- Pilate G, Chabbert B, Cathala B, Yoshinaga A, Leplé JC, Laurans F, Lapierre C, Ruel K (2004) Lignification and tension wood. *CR Biol* 327:889–901. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2004.07.006>
- Proadhan AKMA, Funada R, Ohtani J, Abe H, Fukazawa K (1995) Orientation of microfibrils and microtubules in developing tension-wood fibers of Japanese ash (*Fraxinus mandshurica* vat. *japonica*). *Planta* 196:577–585. <https://doi.org/10.1007/BF00203659.pdf>
- Rasband WS (2018) ImageJ, U. S. National institutes of health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>, 1997–2018
- Rocha MFV, Vital BR, De Carneiro ACO, Carvalho AMML, Cardoso MT, Hein PRG (2016) Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of Eucalyptus wood and bark. *J Trop for Sci* 28:243–248
- Roignant J, Badel E, Ruelle J, Leblanc-Fournier N, Brunel-Michac N, Moulia B, Decourteix M (2017) Feeling stretched or compressed? The multiple mechanosensitive responses of wood formation to bending. *Ann Bot* 121(6):1151–1161. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx211>
- Schimleck L, Evans R, Ilic J (2003) Application of near infrared spectroscopy to the extracted wood of a diverse range of species. *IAWA J* 24(4):429–438. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000347>
- Schwanninger M, Rodrigues JC, Fackler K (2011) A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. *J near Infrared Spec* 19(5):287–308. <https://doi.org/10.1255/jnirs.955>
- Taghiyari HR, Sisi DE (2012) The effects of tree-alfalfa intercropped systems on wood quality in temperate regions. In: Kaonga ML (ed) *Agroforestry for biodiversity and ecosystem services—science and practice*. IntechOpen, London, UK, pp 65–86. <https://doi.org/10.5772/35120>
- Telewski FW (1989) Structure and function of flexure wood in *Abies fraseri*. *Tree Physiol* 5:113–121. <https://doi.org/10.1093/treephys/5.1.113>
- Terrasse F, Brancheriau L, Marchal R, Boutahar N, Lotte S, Guibal D, Pignolet L, Candelier K (2021) Density, extractions and decay resistance variabilities within branch

- wood from four agroforestry hardwood species. For *Bio-geosci* for 14(3):212–220. <https://doi.org/10.3832/ifer3693-014>
- Truax B, Gagnon D, Fortier J, Lambert F (2012) Yield in 8 year-old hybrid poplar plantations on abandoned farmland along climatic and soil fertility gradients. For *Ecol Manag* 267:228–239. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.012>
- Tsuchikawa S, Siesler HW (2003) Near-infrared spectroscopic monitoring of the diffusion process of deuterium-labeled molecules in wood Part I: Softwood. *Appl Spectrosc* 57(6):667–674
- Uner B, Oyar O, Var AA, Altnta OL (2009) Effect of thinning on density of *Pinus nigra* tree using X-ray computed tomography. *J Environ Biol* 30:359–362
- Van Noordwijk M, Lusiana B (1999) WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agrofor Syst* 43:217–242. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-0679-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-017-0679-7_14)
- Workman JJ, Weyer L (2007) Practical guide to interpretive near infrared spectroscopy. CRC Press, Boca Raton, USA. <https://doi.org/10.1201/9781420018318>
- Yi J, Sun Y, Zhu Z, Liu N, Lu J (2017) Near-infrared reflectance spectroscopy for the prediction of chemical composition in walnut kernel. *Int J Food Prop* 20(7):1633–1642. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1217006>
- Zabek L, Prescott C (2006) Biomass equations and carbon content of aboveground leafless biomass of hybrid poplar in Coastal British Columbia. For *Ecol Manag* 223:291–302. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.11.009>
- Zobel JB, Van Buijtenen JP (1989) Wood variation: its causes and control. Springer, New York, USA, p 363

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.

L'analyse de la composition biochimique du bois des peupliers agroforestiers clôt cette partie consacrée aux propriétés biochimiques des arbres agroforestiers. La suite de ce chapitre aborde certaines propriétés physiques (teneurs en humidité, masse volumique et angles des microfibrilles) des peupliers agroforestiers qui seront à nouveau comparées à celles des peupliers témoins en culture "traditionnelle". La première partie porte sur l'analyse du taux d'humidité dans le tronc que nous mettrons en lien avec la présence de faux-cœur chez les peupliers AF et FC. L'étude de la densité du bois et de son évolution liée à l'âge cambial de l'arbre sera ensuite réalisée, à l'échelle du tronc mais également à une échelle plus fine avec l'analyse de la variation de la densité à l'échelle du cerne. Enfin, la dernière partie de ce travail portera sur l'analyse de l'angle des microfibrilles (AMF) et sa variabilité en fonction des deux traitements sylvicoles.

#### **4.4 Taux d'humidité du tronc lié à la présence de faux-cœur chez le peuplier agroforestier**

Le faux-cœur est un bois de cœur atypique caractérisé par un taux d'humidité inhabituel, plus élevé que dans l'aubier et facilement identifiable chez les peupliers par sa couleur plus foncée (SANO et al., 1995; SCHINK et al., 1981). Les raisons de sa formation ne sont pas clairement identifiées mais sa présence pourrait être due à un changement de composition chimique causé par une bactérie (CARTER, 1945; X. JIANG et al., 1993; SCOTT et al., 1998; WARD et ZIEKUS, 1980). Le faux-cœur contient davantage de cendres et d'éléments inorganiques et c'est cette modification de sa composition chimique qui lui procure une couleur plus foncée et un taux d'humidité plus élevé que l'aubier. Bien que les origines de sa formation ne soient pas bien établies, différents facteurs semblent influencer et contrôler son développement. Certains facteurs sont intrinsèques à l'arbre, comme l'espèce (WARD et PONG, 1980), l'âge (ETHERIDGE et MORIN, 1962; HAMILTON, 1980), dans le cas du peuplier, il dépend également du génotype des cultivars (ZHUGE et al., 1997). D'autres facteurs influençant le développement du bois de cœur humide sont environnementaux, comme la nature du sol, en particulier son humidité (ZHENG et al., 2006) ou le traitement sylvicole (KRAUSE et GAGNON, 2006; SHAW et al., 1995; X. WANG et al., 2008). Bien que sa présence dans le tronc n'ait pas d'influence significative sur les propriétés mécaniques du bois, sa forte teneur en humidité entraîne des problèmes de séchage avec notamment l'apparition de défauts (J. WANG et al., 1998 KOZLIK et al., 1972; H. A. SCHROEDER et KOZLIK, 1972). Le bois de faux-cœur entraîne une dépréciation des placages, pour des raisons esthétiques mais aussi parce qu'il réduit les capacités d'adhésion de la colle dans les différents produits techniques bois, diminuant ainsi la résistance mécanique des joints de colle (WARD et PONG, 1980).

Le travail qui suit a pour objectif de comparer la proportion de faux-cœur/aubier dans le tronc des peupliers en fonction du traitement sylvicole, mais également de cartographier

## 4.4. TAUX D'HUMIDITÉ ET FAUX-CŒUR

radialement le taux d'humidité dans leur tronc.

### 4.4.1 Matériels et méthodes

Le taux d'humidité du bois et la proportion aubier/faux-cœur ont été caractérisés sur l'ensemble d'un disque prélevé à la base du tronc de chaque peuplier étudié (Figure 2.8).

#### 4.4.1.1 Proportion de faux-cœur dans le tronc des peupliers

Le pourcentage de faux-cœur et d'aubier dans le tronc de chaque arbre a été déterminé en détournant leur périmètre à l'aide du logiciel imageJ. Leur taux d'humidité moyen a été ensuite déterminé à partir des taux d'humidité moyens de chaque échantillon présent dans la zone détournée.

#### 4.4.1.2 Mesure du taux d'humidité

Chaque disque d'une épaisseur de 4 cm a été divisé en cubes de 4 cm de côté et pesé immédiatement à l'état vert, puis séché dans une étuve à 103°C jusqu'à l'obtention de sa masse anhydre. Le Nord a été localisé sur chaque disque permettant ainsi de localiser aisément chaque échantillon prélevé dans le disque.

Le taux d'humidité de chaque cube a ensuite été calculé en utilisant l'équation 4.1 ci-dessous :

$$H_{\%} = \left( \frac{M_1 - M_0}{M_1} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Avec  $M_1$  la masse de l'échantillon à l'état vert, et  $M_0$  la masse de l'échantillon anhydre. Les cartographies d'humidité ont été réalisées en détournant chaque cube grâce au logiciel imageJ, puis en leur attribuant une couleur liée au taux d'humidité grâce à un code écrit en Python.



FIGURE 4.1 – Délimitation du faux-cœur sur le logiciel ImageJ (à gauche) et estimation de la proportion d'aubier et de faux-cœur dans le tronc via un code écrit en Python (à droite) - Peuplier B (parcelle AF)

#### 4.4. TAUX D'HUMIDITÉ ET FAUX-CŒUR

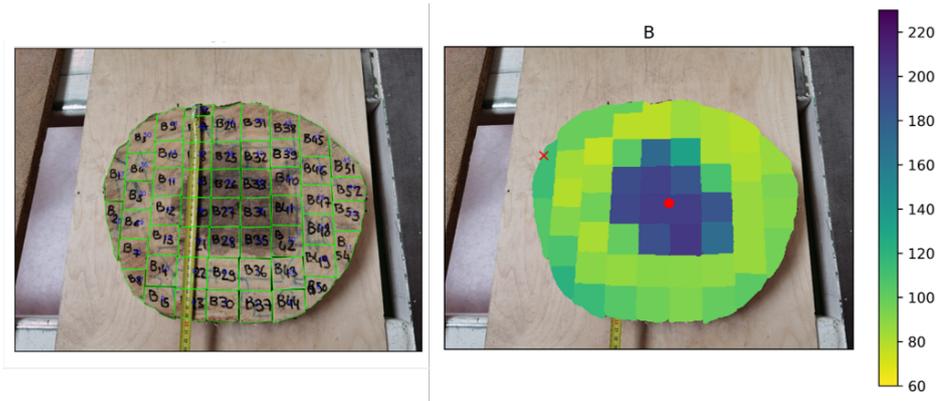


FIGURE 4.2 – Cartographie du taux d’humidité. La croix rouge désigne le Nord tandis que le point rouge localise la moelle. Disque provenant du peuplier B (parcelle AF).

##### 4.4.1.3 Estimation du taux d’humidité moyen de l’aubier et du faux-cœur

Le taux d’humidité moyen du faux-cœur et de l’aubier de chaque disque a été estimé en utilisant le principe de détermination ci-dessous. L’humidité moyenne de chaque cube est considérée comme une combinaison linéaire de la forme (4.2) :

$$H_{moy}(\%) = \alpha H_{aubier} + \beta H_{faux-coeur} \quad (4.2)$$

Avec :

- $H_{moy}$  : humidité moyenne du cube considéré
- $\alpha$  : proportion d’aubier dans le cube considéré
- $\beta$  : proportion de faux-cœur dans le cube considéré
- $H_{aubier}$  : humidité moyenne du cube considéré
- $H_{faux-coeur}$  : humidité moyenne du cube considéré

Dans cette équation,  $\alpha$  et  $\beta$  sont calculés par analyse d’images, et  $H_{aubier}$  et  $H_{faux-coeur}$  sont deux inconnues que l’on souhaite déterminer. Ainsi, pour chaque rondelle, l’ensemble des valeurs d’humidité moyenne des cubes est calculé et comparé à l’humidité réelle des cubes mesurée par double pesée. Les coefficients  $H_{aubier}$  et  $H_{faux-coeur}$  sont alors optimisés afin de limiter l’écart entre l’humidité calculée et l’humidité mesurée (en utilisant le solveur Excel).

#### 4.4.2 Résultats & Discussions

##### 4.4.2.1 Proportion Aubier/Faux-cœur

Les figures 4.3a et 4.3b illustrent la zone d’aubier et de faux-cœur des disques provenant des peupliers AF et FC. On remarque visuellement que la surface occupée par le faux-cœur

#### 4.4. TAUX D'HUMIDITÉ ET FAUX-CŒUR

TABLE 4.1 – Proportion en pourcentage de l'aubier et du faux-cœur dans le tronc de chaque disque de peuplier agroforestier (AF) et témoin forestier (FC).

Parcelle AF			Parcelle FC		
	Proportion dans le tronc (%)			Proportion dans le tronc (%)	
	Aubier	Faux-coeur		Aubier	Faux-coeur
A	79	21	G	51	49
B	77	23	H	47	53
C	80	20	I	48	52
D	81	19	J	50	50
E	82	18	K	51	49
F	77	23	L	49	51
<i>Moy</i>	79	21		49	51

chez les peupliers AF est très réduite par rapport aux peupliers FC. Les proportions de chacune des zones de tronc (aubier et faux-cœur) des Kosters en fonction du traitement sylvicole sont présentées dans le tableau 4.1 ci-dessous.

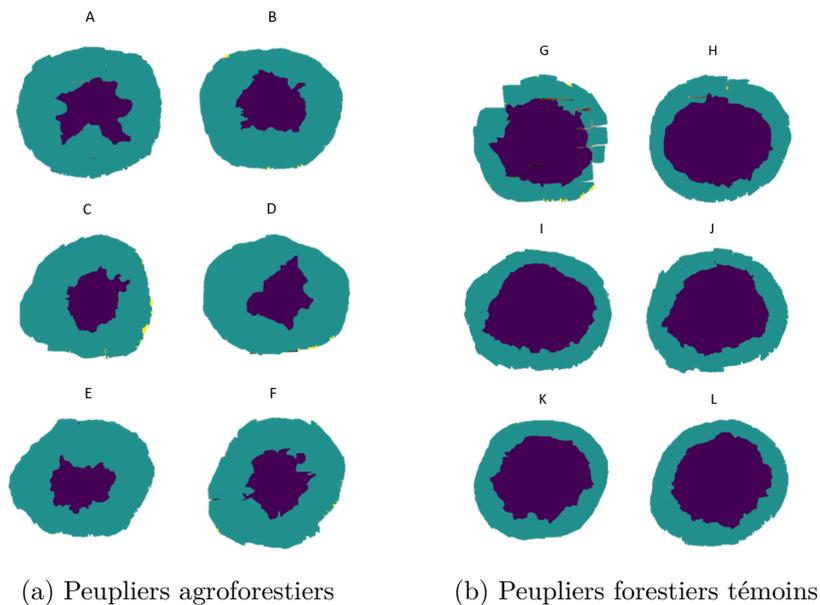


FIGURE 4.3 – Cartographie de la zone d'aubier (en bleu clair) et de faux-cœur (en bleu foncé) des six peupliers agroforestiers (A à F) et des six peupliers forestiers témoins (G à L)

Il apparaît clairement que la proportion de faux-cœur est largement supérieure chez les

#### 4.4. TAUX D'HUMIDITÉ ET FAUX-CŒUR

peupliers forestiers témoins ( $p$ -value  $< 0.01$ ). Plus de la moitié de la surface du tronc des peupliers FC correspond à du bois de faux-cœur (51%) contre seulement 21% en moyenne pour les peupliers AF. Les valeurs obtenues pour les peupliers FC se rapprochent de ceux obtenus par BERTHELOT et al., 2013a qui attribuent une proportion de faux-cœur de 44% à mi-grume au Koster (étude réalisée sur des peupliers âgés de 13 à 18 ans).

Les conditions de croissance de la parcelle agroforestière semblent donc avoir une influence sur la production de faux-cœur chez les peupliers du dispositif de Lent. En effet, Zheng et al. (2006) ont démontré que la proportion de faux-cœur était corrélée positivement au taux d'humidité du sol (ZHENG et al., 2006). Les deux parcelles du dispositif de Lent étant similaires en terme de caractéristiques pédologiques et climatiques, d'autres facteurs sont à l'origine de ces différences de proportions d'aubier et de faux-cœur dans le tronc. La différence d'âge entre les peupliers AF et FC pourrait être un facteur important.

##### 4.4.2.2 Taux d'humidité dans le tronc

Les taux d'humidité moyens du tronc des peupliers étudiés sont présentés dans le tableau 4.2. On remarque que les peupliers agroforestiers présentent une humidité moyenne ( $112\% \pm 38$ ) légèrement inférieure à celle des peupliers témoins ( $119\% \pm 31$ ). Cette différence est significative ( $p$ -value  $< 0.01$ ) et montre ainsi que les conditions de croissance influencent le taux d'humidité du bois de tronc des peupliers.

TABLE 4.2 – Taux d'humidité moyen de l'aubier, du faux-cœur et du disque entier de chaque peuplier agroforestier (AF) et témoin forestier (FC). Les moyennes pour l'aubier et le faux-cœur ont été estimées tandis que la moyenne de chaque disque correspond à la moyenne du taux d'humidité de tous les cubes du disque. *sd* correspond à l'écart-type.

Parcelle AF			Parcelle FC				
Taux d'humidité (%)			Taux d'humidité (%)				
	Aubier	Faux-coeur	Tronc entier		Aubier	Faux-coeur	Tronc entier
A	87	177	$105 \pm 32$	G	78	142	$111 \pm 32$
B	91	193	$113 \pm 41$	H	96	149	$123 \pm 28$
C	99	189	$117 \pm 33$	I	92	155	$124 \pm 31$
D	86	197	$106 \pm 39$	J	94	143	$117 \pm 27$
E	87	199	$108 \pm 40$	K	91	160	$124 \pm 35$
F	101	197	$122 \pm 38$	L	85	136	$112 \pm 28$
	<i>Moy.</i> $\pm 91,7 \pm 6,5$ <i>sd</i>	$192,28 \pm 8,2$	$112 \pm 38$		<i>Moy.</i> $\pm 89,3 \pm 6,8$ <i>sd</i>	$147,5 \pm 8,9$	$119 \pm 31$

Les estimations du taux d'humidité (H%) de l'aubier et du faux-cœur des différents peupliers

#### 4.4. TAUX D'HUMIDITÉ ET FAUX-CŒUR

indiquent que les taux d'H% de l'aubier des troncs au sein des deux parcelles sont statistiquement similaires ( $p$ -value = 0.8). On notera un taux d'humidité moyen des aubiers de  $91.7\% \pm 6.5$  pour les peupliers AF et de  $89.3\% \pm 6.8$  pour les peupliers FC. En ce qui concerne l'humidité du faux-cœur, les peupliers AF présentent des faux-cœurs plus humides que les peupliers FC ( $192.28\% \pm 8.2$  et  $147.5\% \pm 8.9$  respectivement). Ces différences sont significatives ( $p$ -value < 0.01) et se visualisent bien sur la figure 4.4.

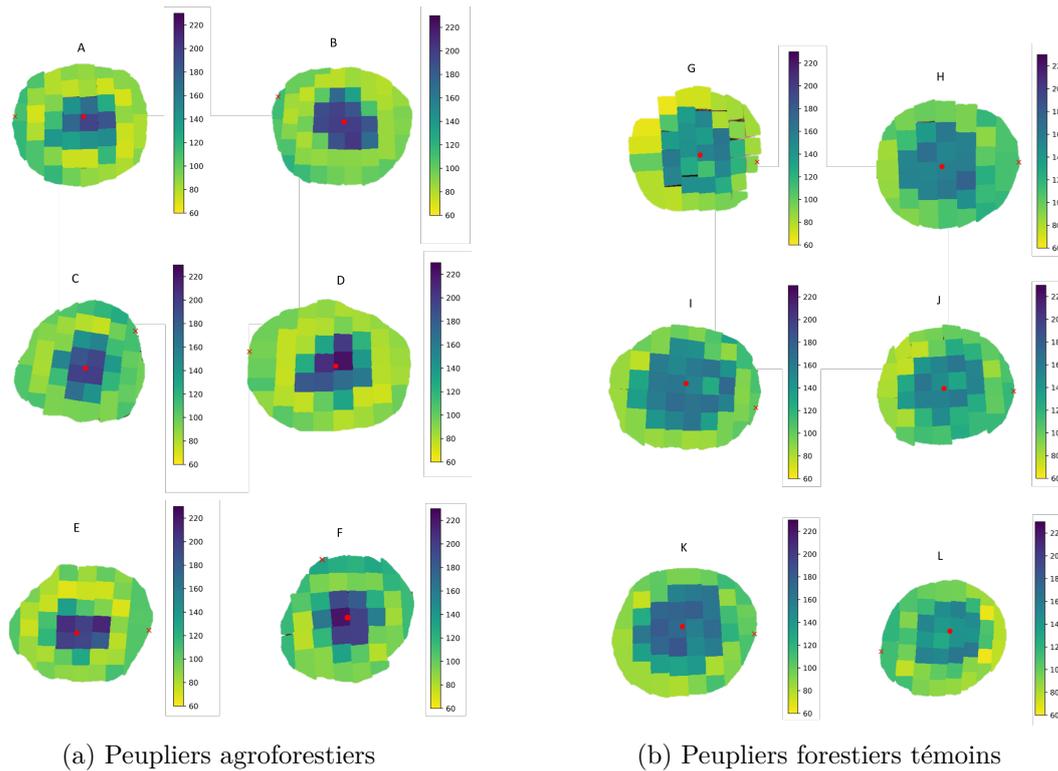


FIGURE 4.4 – Cartographie du taux d'humidité (%) des disques provenant de la base du tronc des peupliers AF (A à F) et FC (G à L). La croix rouge désigne le Nord tandis que le point rouge localise la moelle.

Le taux d'humidité a été mis en lien avec la distance à la moelle et la proportion d'aubier/faux-cœur de l'échantillon sur lequel a été réalisée la mesure (Figures 4.5 et 4.6). Il apparaît que le taux d'humidité diminue à mesure que l'on s'éloigne de la moelle. Les échantillons les plus humides sont ceux les plus proches de la moelle mais également ceux qui sont constitués à 100% de faux-cœur. Les échantillons constitués à 100% d'aubier présentent les taux d'humidité les plus faibles. Enfin, les échantillons composés à la fois de faux-cœur et d'aubier possèdent des taux d'H% intermédiaires, pour certains proches de ceux du bois de faux-cœur et pour d'autres proches de ceux du bois d'aubier. On remarque cependant que le taux d'H% semble légèrement augmenter en périphérie du tronc, et ce à la fois pour les peupliers AF et FC.

#### 4.4. TAUX D'HUMIDITÉ ET FAUX-CŒUR

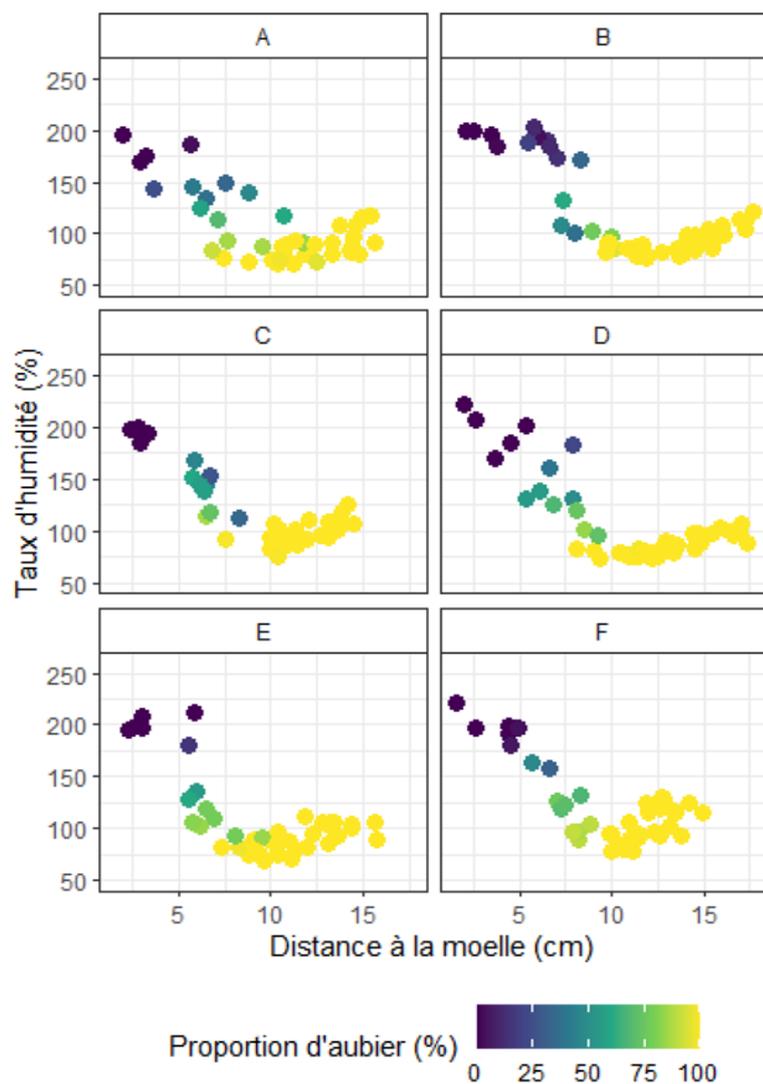


FIGURE 4.5 – Évolution du taux d'humidité (%) en fonction de la distance à la moelle et de la proportion d'aubier et de faux-cœur des échantillons de tronc des peupliers issus de la parcelle AF.

#### 4.4. TAUX D'HUMIDITÉ ET FAUX-CŒUR

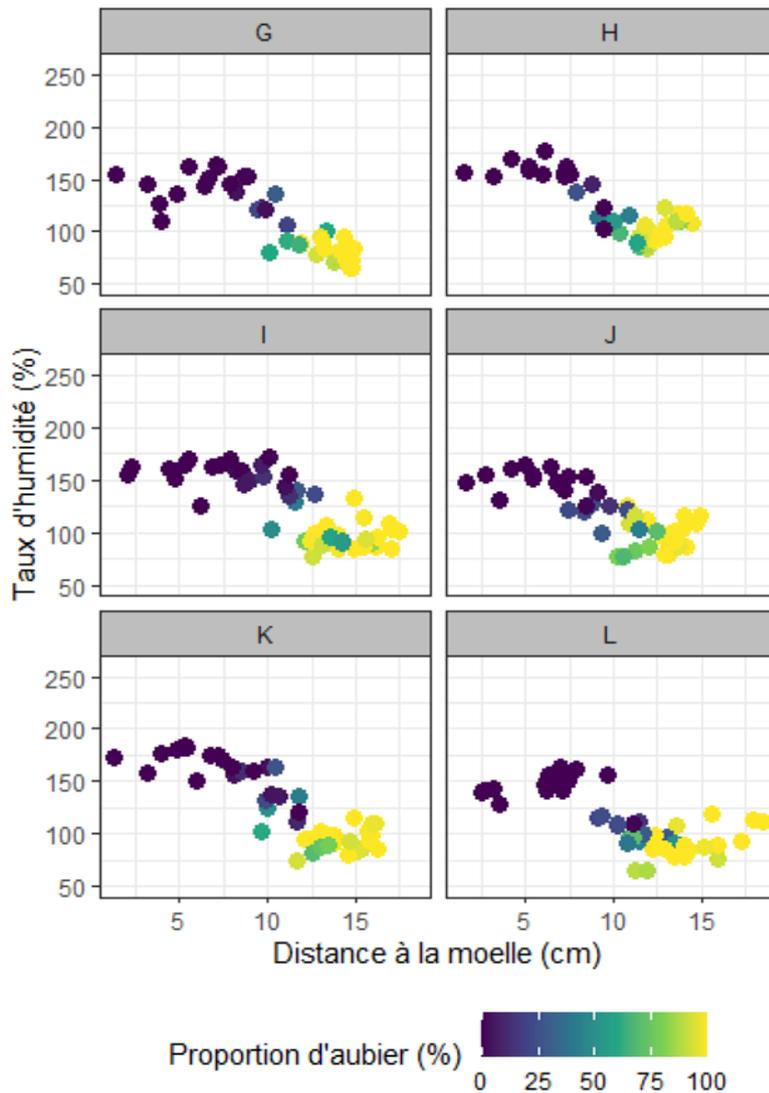


FIGURE 4.6 – Évolution du taux d’humidité (%) en fonction de la distance à la moelle et de la proportion d’aubier et de faux-coeur des échantillons de tronc des peupliers issus de la parcelle FC.

Les coefficients de corrélation ( $R^2$ ) ont été calculés afin de crédibiliser les relations entre la distance à la moelle ou la proportion de faux-coeur dans l’échantillon et le taux d’humidité. Dans le cas de la distance à la moelle, les  $R^2$  dans la parcelle AF et FC sont respectivement de 0.47 et 0.58 (0.50 toutes parcelles confondues). Dans le cas de la proportion aubier/faux-coeur, le  $R^2$  dans la parcelle AF est de 0.86, celui dans la parcelle FC de 0.70 et 0.70 pour toutes parcelles confondues. Le taux d’humidité semble donc davantage lié à la nature du bois (aubier vs faux coeur) qu’à la distance à la moelle.

De manière générale, les résultats obtenus sur l'évolution du taux d'humidité dans des rondelles se rapprochent de ceux reportés dans PAILLASSA et al., 2013 et notamment concernant le cultivar Koster. Dans cette étude, le taux d'humidité de l'aubier du Koster est d'environ 90% tandis que celui du faux-coeur a été estimé entre 195% et 250% environ. Les résultats rapportent une forte corrélation entre le taux d'humidité et la distance à la moelle ( $R^2 = 0.891$  pour l'ensemble des cultivars de l'étude). Leurs résultats indiquent également que le taux d'humidité n'est homogène ni dans le faux-coeur ni dans l'aubier dans lequel il semble plus variable. De plus, nos conclusions doivent prendre en considération l'écart d'âge entre les peupliers AF et FC, qui pourrait expliquer une part des différences de proportion entre le faux-coeur et l'aubier observées sur les deux parcelles.

### 4.5 Variations de la densité du tronc de peupliers agroforestiers à l'échelle du cerne

La densité est l'une des propriétés physiques les plus importantes du bois puisqu'elle définit en grande partie sa qualité (HAYGREEN et BOWYER, 1996 ; PANSWIN et ZEEUW, 1980), à travers notamment ses propriétés mécaniques. Un bois possédant une densité élevée est souvent associé à des propriétés mécaniques supérieures à celles d'un bois ayant une densité plus faible. La densité de la paroi des cellules étant relativement constante, c'est principalement la structure du bois et notamment la quantité d'espaces vides (par exemple la taille du lumen des trachéides ou des fibres, les vides sur la paroi cellulaire et la taille et le nombre de vaisseaux) qui vont influencer la densité du bois. Elle résulte de la combinaison de nombreux paramètres structuraux à l'échelle cellulaire et traduit des caractéristiques de bois et des conditions de croissance au moment où ce dernier s'est formé ; en particulier lors de la genèse du bois initial (BI) et du bois final (BF) (PANSWIN et ZEEUW, 1980). Chez les bois à zone semi-poreuse (ou homogènes) comme le peuplier, la variation de la taille des vaisseaux dans le cerne est relativement faible. La différence de densité entre le bois initial et le bois final est donc moins marquée que pour certains bois à zone initiale poreuse comme le chêne par exemple. Toutefois, des fluctuations de l'épaisseur de la paroi cellulaire entre le BI et le BF du cerne peuvent entraîner des modifications de la densité locale dont la variation peut fortement influencer le comportement mécanique ou les déformations lors du séchage d'un placage de faible épaisseur. Outre les conditions environnementales de croissance, chez le peuplier, de nombreux paramètres peuvent influencer la densité de son bois, notamment, le cultivar, le traitement sylvicole, l'âge cambial et la hauteur de l'arbre (BUTTERFIELD et al., 1993 ; S. Q. LIU et BAO, 2001 ; SZYMANSKI et TAUER, 1991 ; WRIGHT et ENDO, 1993).

L'étude qui suit porte sur l'analyse de la densité du bois de peuplier agroforestier qui sera comparée à celle des peupliers témoins forestiers. L'effet de l'âge cambial mais également de la

## 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

position dans le tronc (évaluée à travers l'étude des rayons Nord/moelle et Est/moelle) et dans le cerne sera déterminé afin de mettre en évidence l'influence des conditions de croissances en milieu agroforestier sur la masse volumique locale du peuplier Koster.

### 4.5.1 Matériels et méthodes

Les mesures réalisées visent à estimer la masse volumique en  $\text{kg/m}^3$  mesurée sur des bois stabilisés avec un taux d'humidité de 12% ( $H=12\%$ ). Dans la suite de ce mémoire, les résultats seront nommés par abus de langage "densité" par soucis de simplification, malgré leur unité.

Des barreaux ont été préalablement découpés sur chacun des billons de peuplier suivant les axes moelle-nord (Rayon 1), moelle-est (Rayon 2) et moelle-sud (Rayon 3)(Figure 4.7a). Ils ont été mesurés puis pesés après sciage (Figure 4.7b). Les mesures de densité à l'échelle du cerne ont été réalisées par microdensitométrie à rayons X grâce à un multiscanner Itrax (<http://coxsys.se>). Des barrettes radiales de 2 mm d'épaisseur, stabilisées à environ 12% d'humidité, ont été radiographiées. Les profils de niveaux de gris sur les images ont été ensuite analysés grâce au programme CERD (MOTHE et al., 1997) qui permet de délimiter les cernes et d'en extraire les valeurs de densité des différentes zones (Figure 4.8).



(a) Orientation des barrettes dans le billon

(b) Barrettes obtenues après découpe

FIGURE 4.7 – Préparation des barrettes de peuplier.

## 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

---

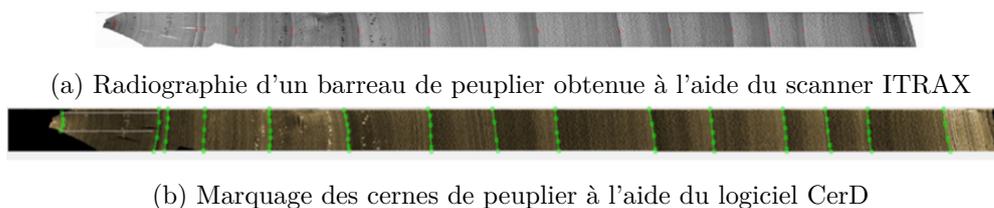


FIGURE 4.8 – (a) Image radiographique obtenue après scan par l'ITRAX et (b) traitement par le logiciel CerD

Différents paramètres de densités et descriptifs de la structure du cernes détaillés ci-dessous ont été déterminés et analysés :

- Densité moyenne de l'arbre ( $D_{moy}$ )
- Densité du bois initial (DBI)
- Densité du bois final (DBF)
- Densité moyenne par largeur de cerne ( $D_{moyLC}$ )
- Largeur de cerne (LC)
- Largeur du bois initial (LBI)
- Largeur du bois final (LBF)
- Texture (rapport entre  $LBF/LC$ )

Les données densitométriques ont été analysées grâce au logiciel R (R-core, 2020), en utilisant principalement les tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis et de Wilcoxon avec un seuil de significativité de 5%.

### 4.5.2 Résultats

#### 4.5.2.1 Paramètres de densité par arbre et par traitement

Les valeurs de densité moyenne par largeur de cerne ( $D_{moy}$ ) mesurées pour les rayons Nord et Est pour les deux itinéraires sylvicoles sont répertoriées dans le tableau 4.3 ci-dessous.

#### 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

TABLE 4.3 – Densité moyenne des peupliers (à H=12%) en fonction de l'orientation du rayon (rayon Nord et rayon Est) et du traitement sylvicole (AF et FC). Les valeurs correspondent aux moyennes  $\pm$  l'écart-type. Les différences significatives sont indiquées par des astérisques : p-value  $\leq 0,05$ \*, p-value  $\leq 0,01$  \*\*, p-value  $\leq 0,001$  \*\*\*, ns pour non significatif.

Parcelle AF				Parcelle FC					
Dmoy (kg/m <sup>3</sup> )				Dmoy (kg/m <sup>3</sup> )					
	Rayon Est	Rayon Nord			Rayon Est	Rayon Nord			
A	332 $\pm$ 37	318 $\pm$ 25	ns	325 $\pm$ 32	G	418 $\pm$ 30	412 $\pm$ 33	ns	415 $\pm$ 31
B	354 $\pm$ 14	356 $\pm$ 46	ns	355 $\pm$ 34	H	441 $\pm$ 26	359 $\pm$ 44	***	400 $\pm$ 55
C	510 $\pm$ 39	365 $\pm$ 53	***	437 $\pm$ 87	I	476 $\pm$ 39	451 $\pm$ 56	***	464 $\pm$ 49
D	487 $\pm$ 26	460 $\pm$ 34	*	474 $\pm$ 32	J	398 $\pm$ 55	455 $\pm$ 32	***	426 $\pm$ 53
E	453 $\pm$ 49	459 $\pm$ 39	ns	456 $\pm$ 44	K	382 $\pm$ 33	356 $\pm$ 40	***	369 $\pm$ 38
F	437 $\pm$ 54	445 $\pm$ 21	ns	441 $\pm$ 40	L	364 $\pm$ 35	367 $\pm$ 31	***	365 $\pm$ 32
<i>Moy.</i>	429 $\pm$ 75	398 $\pm$ 67		414 $\pm$ 73	<i>Moy.</i>	413 $\pm$ 53	400 $\pm$ 58		406 $\pm$ 55

Ce tableau reprend les effets statistiques du rayon pour chaque arbre en fonction du scénario. Une variabilité de la densité moyenne est observée entre les arbres au sein de chaque traitement sylvicole. La figure 4.9 illustre cette variabilité avec des coefficients de variation de la Dmoy au sein des parcelles AF et FC respectivement de 17% et 14%. Pour chaque parcelle, tous rayons confondus, la différence de Dmoy entre les arbres est significative (p-value  $< 0.01$  pour chaque parcelle). Au regard de l'orientation du rayon dans l'arbre, il apparaît que la densité moyenne n'est pas identique entre les rayons Nord et Est chez tous les peupliers. Dans la parcelle agroforestière, seuls deux peupliers (C et D) présentent des densités moyennes significativement différentes (Tab. 4.3) et notamment un arbre (C) qui associe les extremums des valeurs de densité. Dans la parcelle FC, ce nombre est plus élevé ; les peupliers H, I, J et K présentant des densités moyennes significativement différentes (Tab. 4.3). D'une manière générale, la variabilité de ce paramètre entre les arbres d'un même traitement est bien plus importante chez les arbres agroforestiers que chez les témoins.

Dans la parcelle AF une différence significative est observée entre les rayons Est et Nord, la densité moyenne du rayon Est étant très légèrement supérieure (p-value  $< 0.01$ ). La densité moyenne du rayon Nord est de  $398 \pm 67$  kg/m<sup>3</sup> pour les peupliers agroforestiers contre  $400 \pm 58$  kg/m<sup>3</sup> pour les forestiers (Figure 4.10), tandis que la densité moyenne du rayon Est est de  $429 \pm 76$  kg/m<sup>3</sup> pour la parcelle AF et de  $413 \pm 53$  kg/m<sup>3</sup> pour la parcelle FC. Notons que, malgré des cinétiques de croissance bien différentes, tous rayons confondus, la densité moyenne des peupliers AF ( $414 \pm 73$  kg/m<sup>3</sup>) ne diffère pas significativement de la densité moyenne des peupliers FC ( $406 \pm 55$  kg/m<sup>3</sup>) (p-value = 0.3). À l'échelle de la parcelle cependant, une différence significative

#### 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

est observée entre la densité moyenne du rayon Est AF et celle des autres rayons (voir Figure 4.10, Dmoy Nord AF, Dmoy Nord FC, Dmoy Est FC, p-value < 0.01), les densités moyennes des rayons Nord et Est au sein de la parcelle FC et du rayon Nord AF étant statistiquement identiques (p-value = 0.05).

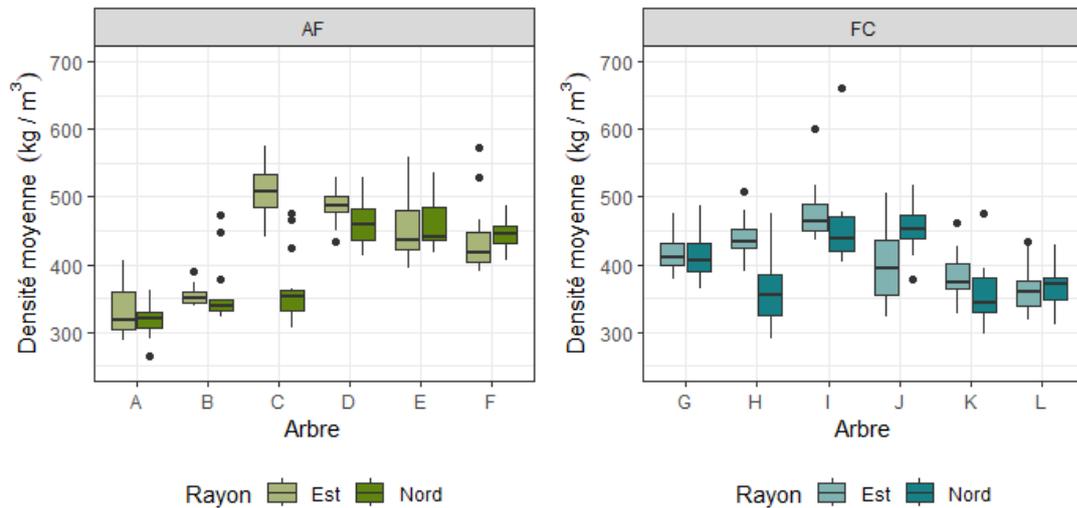


FIGURE 4.9 – Densité moyenne des peupliers agroforestiers (AF) et forestiers (FC) mesurée sur les rayons Nord et Est. (H=12%)

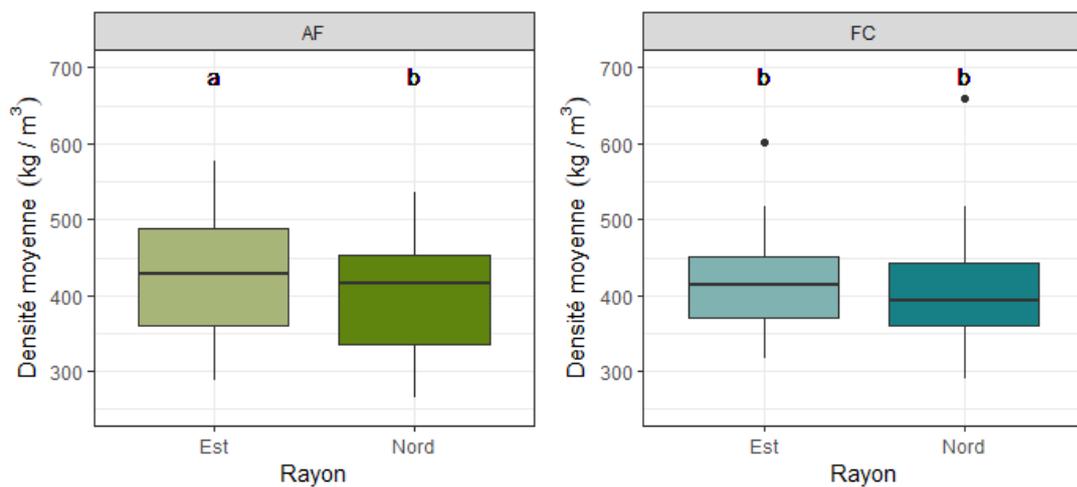


FIGURE 4.10 – Densité moyenne au sein des parcelles agroforestière (AF) et forestière (FC) mesurée sur les rayons Nord et Est. (H=12%)

La comparaison annuelle de la densité moyenne durant toute la croissance des peupliers ne laisse apparaître aucune différence significative d'une année à l'autre dans la parcelle agrofores-

#### 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

tière ( $p$ -value = 0.85). Dans la parcelle forestière témoin en revanche, les analyses statistiques révèlent que certaines années sont significativement différentes de certaines autres ( $p$ -value = 0.005), mais aucune vraie tendance n'est observée et aucune année ne se démarque réellement (Figure 4.11).

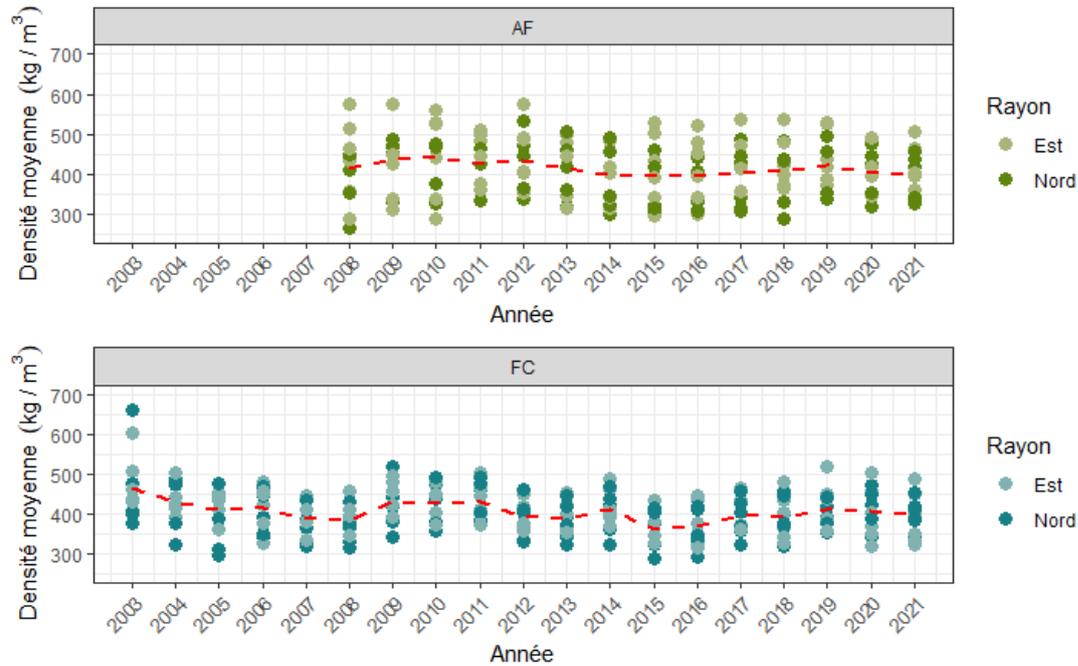


FIGURE 4.11 – Évolution annuelle de la densité moyenne des peupliers étudiés au sein des parcelles agroforestière (AF) et forestière (FC) mesurée sur les rayons Nord et Est. La courbe rouge en pointillés correspond à l'évolution moyenne annuelle par parcelle de la densité moyenne de tous les peupliers. (H=12%)

Concernant la variabilité de la densité du bois au sein du cerne, l'analyse de la densité du bois initial n'a pas fait ressortir de différence significative entre les peupliers agroforestiers et les peupliers forestiers ( $p$ -value = 0.26)(Figure 4.12). Dans le cas du bois final, les peupliers AF présentent une densité statistiquement plus élevée que celle du bois final des peupliers témoins FC ( $p$ -value = 0.014) mais cette différence reste mesurée en valeur (483 kg/m<sup>3</sup> et 465 kg/m<sup>3</sup>, respectivement, Tableau 4.4). Malgré son caractère dit "homogène", les peupliers montrent un bois final plus dense que leur bois initial ( $p$ -value < 0.01 dans les deux parcelles)(Figure 4.13).

#### 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

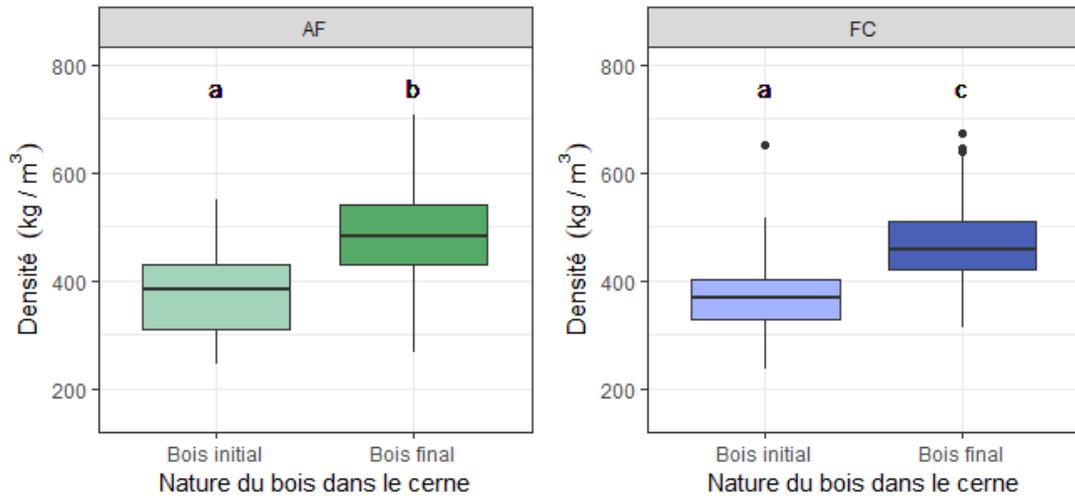


FIGURE 4.12 – Densité moyenne du bois initial et du bois final des peupliers agroforestiers (AF) et forestiers (FC) tous rayons confondus. (H=12%)

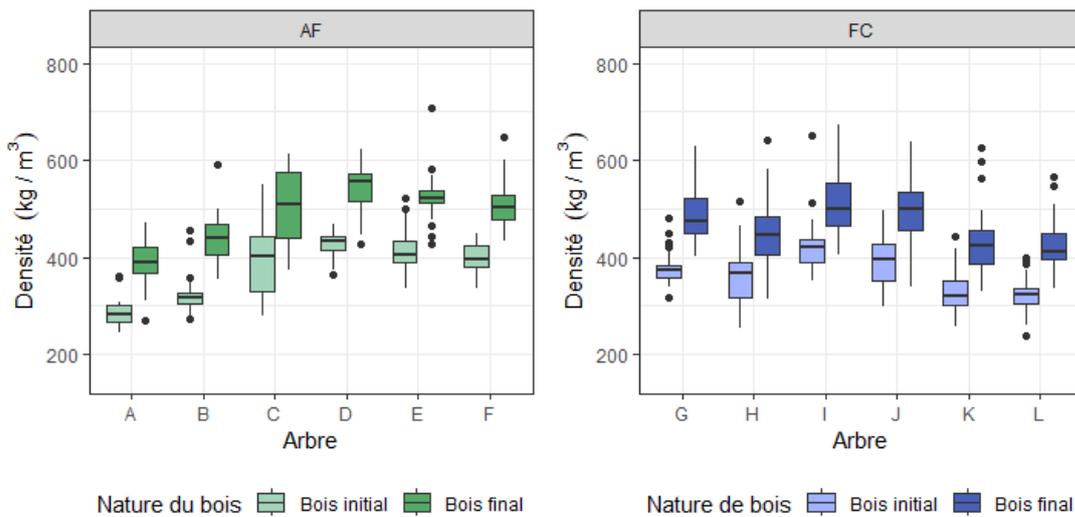


FIGURE 4.13 – Densité moyenne du bois initial et du bois final des peupliers agroforestiers (AF) et forestiers (FC) mesurée sur les rayons Nord et Est. (H=12%)

#### 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

TABLE 4.4 – Densité moyenne ( $H=12\%$ ) des peupliers en fonction de la nature du bois dans le cerne (bois initial et bois final), l'orientation du rayon (rayon Nord et rayon Est) et du traitement sylvicole (AF et FC).

<i>Densité (kg/m<sup>3</sup>, H=12%)</i>	Parcelle AF		Parcelle FC	
	Bois initial	Bois final	Bois initial	Bois final
Rayon Nord	363±63	473±74	362±61	452±69
Rayon Est	381±70	492±78	372±53	478±66
<i>Rayons confondus</i>	372±67	483±77	367±57	465±69

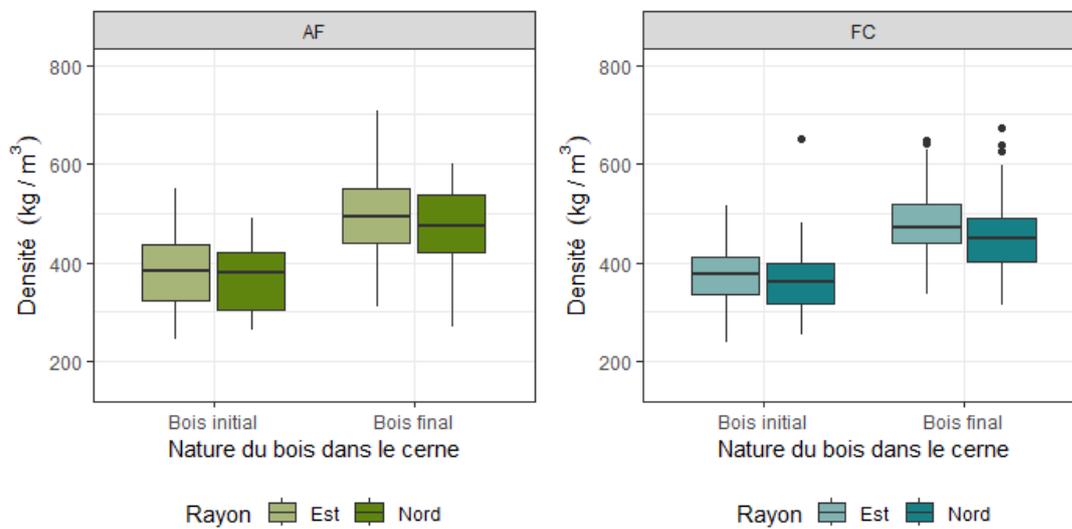


FIGURE 4.14 – Densité intra-cerne des peupliers dans les parcelles AF et FC en fonction de l'orientation du rayon (Nord ou Est). ( $H=12\%$ )

La comparaison de la densité du bois initial et du bois final entre les rayons Nord et Est fait apparaître que les densités du rayon Est, tous types de bois confondus, sont légèrement supérieures à celle du rayon Nord (Figure 4.14). Ces tendances sont observables pour les deux traitements sylvicoles mais ne sont cependant pas significatives, excepté pour le bois final du rayon Est des peupliers FC qui est statistiquement différent du bois final du rayon Nord des peupliers FC ( $p\text{-value} < 0.01$ ).

## 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

### 4.5.2.2 Étude de la structure du cerne

La texture est définie par la proportion de bois final par rapport à la largeur totale du cerne. Les valeurs moyennes de la texture, de la largeur de cerne, de la largeur du bois initial et de la largeur du bois final par rayon et par parcelle sont reportées dans le tableau 4.5. Il apparaît que la texture pour les peupliers agroforestiers (38.97%) est significativement inférieure à celle des peupliers forestiers (43.51%). Les mêmes tendances sont observées pour les rayons Nord et Est de la parcelle AF. En moyenne, les peupliers AF forment des cernes plus larges que les témoins forestiers ce qui témoigne d'une croissance plus rapide mais qui se traduit principalement sur la largeur du BI. De plus, les résultats indiquent des différences significatives entre les rayons Nord et Est au sein de la parcelle agroforestière ; la largeur de cerne étant significativement supérieure à celle du rayon Est (p-value < 0.01). La même différence est observée au sein de la parcelle FC (p-value = 0.018).

TABLE 4.5 – Paramètres de largeurs de cernes moyens et de texture en fonction de l'orientation du rayon (confondus, Nord et rayon Est) et du traitement sylvicole (AF et FC). Les valeurs correspondent aux moyennes  $\pm$  l'écart-type.

	Rayon	LC (mm)	LBI (mm)	LBF (mm)	Texture
Parcelle AF	Nord	11.81 $\pm$ 4.31	7.96 $\pm$ 3.94	3.84 $\pm$ 2.69	34.24 $\pm$ 21.00
	Est	9.3 $\pm$ 3.72	5.63 $\pm$ 3.41	3.68 $\pm$ 1.95	43.47 $\pm$ 19.12
	<i>Rayons confondus</i>	10.53 $\pm$ 4.2	6.77 $\pm$ 3.90	3.76 $\pm$ 2.33	38.97 $\pm$ 20.52
Parcelle FC	Nord	8.38 $\pm$ 6.32	4.99 $\pm$ 4.90	3.39 $\pm$ 2.38	45.07 $\pm$ 21.49
	Est	6.70 $\pm$ 5.10	4.17 $\pm$ 4.00	2.53 $\pm$ 2.06	41.96 $\pm$ 22.88
	<i>Rayons confondus</i>	7.54 $\pm$ 5.79	4.58 $\pm$ 4.48	2.96 $\pm$ 2.26	43.51 $\pm$ 22.20

Le rapport entre la densité moyenne et la largeur de cerne (DMoyLC) permet de caractériser le lien qui existe entre masse volumique du cerne et largeur du cerne et de comparer les populations. Plus ce ratio est important pour des densités comparables et plus la vitesse de croissance de l'échantillon observé sera faible. Le ratio montre une différence significative de la densité moyenne par largeur de cerne entre les traitements (p-value < 0.01)(Figure 4.15) : les peupliers issus de plantation conventionnelle (FC) présentent un ratio largement supérieur aux arbres agroforestiers (FC = 103.63  $\pm$ 8.80 contre AF = 59.95  $\pm$ 16.10). Un arbre qui croît en condition agroforestière a donc une croissance plus rapide qu'en condition forestière, sans pour autant limiter sa masse volumique ; ce qui traduit bien une augmentation sensible de la production de biomasse (la croissance en hauteur reste plus modérée pour le peuplier AF en général).

## 4.5. DENSITÉ DU BOIS DES PEUPLIERS

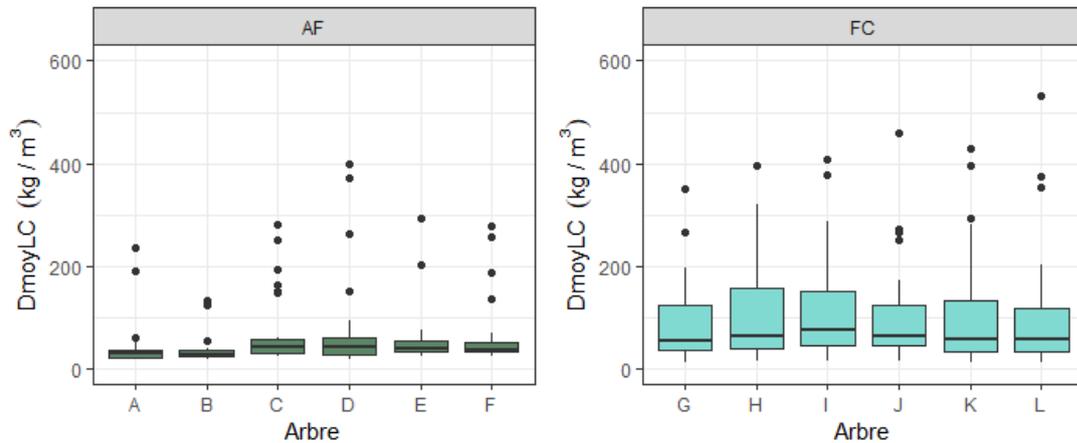


FIGURE 4.15 – Densité moyenne par largeur de cerne (DmoyLC) des peupliers en fonction des traitements sylvicoles. (H=12%)

### 4.5.3 Discussions

Les résultats obtenus ont mis en avant certaines différences entre les arbres agroforestiers et forestiers, à travers les critères morphologiques des arbres mais également en termes de variations de densité du bois. La texture plus faible des peupliers agroforestiers traduit une proportion de bois initial plus importante que pour les peupliers forestiers. C'est d'ailleurs la texture du rayon Nord des bois AF, nettement plus faible que son homologue des bois FC, qui accentue cette différence. C'est bien la signature d'une acclimatation des arbres aux conditions environnementales. Ces résultats montrent également qu'il n'existe pas de différence significative pour la densité moyenne entre les traitements. Dans le cas de la parcelle agroforestière seulement, l'orientation du rayon influence la densité moyenne de l'arbre, le bois prélevé sur le rayon Est présentant une densité moyenne très légèrement supérieure au bois du rayon Nord. Concernant les variations de densité en fonction de l'âge cambial, aucune tendance nette de la densité moyenne annuelle n'a été soulevée en fonction de l'âge cambial, quels que soient le rayon et le traitement sylvicole. Dans la parcelle forestière témoin, il existe néanmoins des différences sensibles entre les années. Ces résultats sont assez cohérents avec l'étude de PAILLASSA et al., 2013 qui observe une dynamique d'évolution de la densité relativement stable chez certains cultivars de peupliers dont le Koster fait partie. Ces résultats indiquent que la vitesse de croissance n'a pas ou peu d'influence sur la densité du bois issu des deux traitements sylvicoles différents, paramètre plutôt favorable à l'exploitation agroforestière, permettant de produire plus de bois dans un laps de temps plus court, tout en conservant une densité de bois équivalente à celle des bois issu de milieux forestiers. De plus, la largeur de cerne plus importante dans l'axe Nord-Sud, axe du vent dominant dans la région dans laquelle se sont développés les peupliers, peut traduire de la présence de bois de flexion, mis en évidence précédemment, dont la densité peut être supérieure à celle du

bois normal (NIEZ et al., 2020).

### 4.6 Évolution radiale de l'angle des microfibrilles de cellulose chez le peuplier agroforestier

L'analyse de la variation radiale, dans le tronc, de l'angle des microfibrilles de la paroi des peupliers agroforestiers et témoins forestiers a été réalisée sur un disque prélevé à 1,30 m dans chacun des peupliers échantillonnés (Figure 2.8). Cette partie est détaillée et discutée dans le chapitre 5, du fait que les résultats sont présentés au sein d'un même article scientifique avec les propriétés des placages ainsi que des propriétés mécaniques des panneaux de LVL conçus à partir de ces placages de peuplier.

### 4.7 Synthèse

Le chapitre 4 avait pour objectif d'explorer quelques-unes des propriétés physiques et chimiques des arbres agroforestiers. Le travail a été divisé en deux grands volets. Dans le premier, centré sur les propriétés chimiques, le noyer et le peuplier ont été au cœur des investigations. Les deux premières études se sont concentrées sur l'analyse du bois de noyer en tant que ressource riche en différents composés chimiques. La première visait à améliorer nos connaissances sur les teneurs en composés extractibles provenant des fractions de bois, de nœuds et d'écorce de noyer, récoltés dans des systèmes d'agroforesterie (AF) et de contrôle forestier traditionnel (FC) et extraits à l'éthanol et à l'eau. L'identification de la composition de ces extraits a été réalisée par des analyses LC-MS. Chacun des échantillons a été analysé par spectroscopie proche infra-rouge (NIR) dans le but de développer un outil rapide pour distinguer le bois issu des branches de noyer, des nœuds et d'écorce provenant d'arbres cultivés dans des dispositifs agroforestiers ou plus conventionnels. Les résultats obtenus ont indiqué que les teneurs en extractibles des échantillons et leurs compositions chimiques étaient légèrement différentes entre les branches, les nœuds et l'écorce pour les deux systèmes sylvicoles. Toutefois, les modèles PLS-DA basés sur les mesures NIRS ont permis de distinguer des différences entre les échantillons de bois de noyers cultivés sous différents régimes. Les analyses en composantes principales (ACP) basées sur la spectrométrie NIR des échantillons bruts ont également révélé que la composition chimique des bois de branches et de nœuds est similaire et très différente de celle des échantillons d'écorce.

La seconde étude portant sur la composition chimique du bois des noyers agroforestiers s'est concentrée sur le processus de formation du duramen dans le tronc des arbres étudiés à travers l'analyse de leurs taux d'extractibles. À nouveau, des extractions successives à l'eau et à l'éthanol ont été réalisées sur des échantillons prélevés radialement dans le tronc de noyers agroforestiers et forestiers, permettant ainsi d'obtenir la distribution radiale des teneurs en

## 4.7. SYNTHÈSE

---

composés extractibles. Chacun des échantillons a ensuite été analysé par spectroscopie NIR et imagerie hyperspectrale NIR ce qui a mené à nouveau au développement de modèles statistiques discriminants permettant de classer les échantillons issus des deux systèmes sylvicoles en fonction de leur composition chimique. Les résultats obtenus n'ont pas mis en évidence de différences significatives entre le taux d'extractibles des bois de noyers AF et FC, et à l'échelle du tronc, la teneur en extractibles n'augmente pas de manière significative à mesure que l'on se rapproche de la moelle. Ces observations sont notamment expliquées par le processus de duraminisation qui n'a pas encore pleinement débuté dans les noyers de notre étude. Les modèles de régression développés à partir des mesures NIRS, ont tout de même montré que des différences chimiques significatives existent entre les arbres AF et FC, notamment pour la composition en extractibles et la teneur en lignine. De manière générale, ces deux études apportent de nouvelles connaissances sur la composition biochimique du bois issu du tronc, des branches, des nœuds et de l'écorce des noyers issus de plantations et de parcelles agroforestières. Les analyses par spectroscopie NIR et le développement de modèles basés sur ces analyses apportent une nouvelle vision dans l'évaluation non destructive de la qualité de bois de noyer en terme de composition chimique notamment en lien avec leurs conditions de croissances. Elles permettraient d'établir rapidement un profil biochimique du bois issu de parcelles agroforestières afin d'en évaluer la qualité, sans abattre les arbres. En suivant son évolution à travers le temps, elles permettraient alors d'adapter et d'ajuster la période d'exploitation des arbres.

La dernière étude menée sur les propriétés chimiques de bois agroforestier s'est concentrée sur le cas du peuplier. L'imagerie hyperspectrale a été utilisée afin d'analyser les teneurs en lignine et en extractibles dans le bois de tronc des peupliers AF et FC. Les résultats obtenus ont mis en évidence une différence significative de composition chimique, basée sur la teneur estimée en lignine, entre des bois de peuplier AF et FC. Cette teneur, plus faible chez les peupliers AF, pourrait traduire la présence de bois de tension ou de bois juvénile, dont la formation plus importante pourrait être due aux conditions de croissance des arbres de la parcelle AF qui sont plus exposés au vent en raison de la plus faible densité de plantation (voir HEIM et al., 2023 présenté dans la partie 4.3).

Le deuxième volet de ce chapitre, consacré aux propriétés physiques, s'est concentré sur quelques propriétés du bois issu des peupliers AF et FC. Le travail réalisé s'est à nouveau divisé en trois parties. La première s'est intéressée au taux d'humidité dans le tronc des peupliers et a mis en lien ces variations avec la présence de bois de faux-cœur. Nos résultats indiquent que les peupliers AF et FC présentent des taux d'humidité similaires. Des différences sont cependant observées dans le cas du faux-cœur, le traitement agroforestier conduisant à la formation d'un faux-cœur significativement plus humide que dans la parcelle forestière témoin. Toutefois, la surface occupée par le faux-cœur dans les troncs AF étant largement plus faible que dans les troncs FC, cela conduit à un taux d'humidité moyen inférieur chez les peupliers AF. De manière

## 4.7. SYNTHÈSE

---

générale, que ce soit pour les peupliers AF ou FC, les taux d'humidité observés dans notre étude sont proches de ceux obtenus pour le Koster dans PAILLASSA et al., 2013.

Notre travail s'est ensuite porté sur la comparaison de la densité du bois de ces mêmes peupliers. Ces investigations ont été réalisées en collaboration avec la plate-forme Sylvatech d'INRAE Grand-Est (Nancy). L'analyse a été faite sur la densité moyenne des cerne, celle du bois initial et du bois final, le tout en fonction de plusieurs facteurs tels que l'âge cambial et l'orientation dans le tronc. La structure intra-cerne a également été étudiée à travers la largeur du cerne, la largeur des bois initial et final ainsi que la densité par largeur de cerne. Les résultats obtenus n'ont pas mis en évidence de différences significatives entre les densités moyennes des peupliers en fonction du traitement sylvicole AF ou FC. Une différence est cependant observée au sein de la parcelle AF dans laquelle la densité moyenne des peupliers est légèrement supérieure au niveau du rayon Est. Aucune variation de densité moyenne n'est observée radialement dans la parcelle agroforestière, les densités moyennes étant similaires d'une année sur l'autre. Une légère variabilité de la densité moyenne est à relever dans la parcelle FC, sans que cela soit vraiment significatif. Le traitement sylvicole n'a pas influencé la densité moyenne du bois initial. Seules les valeurs de densité de bois final divergent d'une parcelle à l'autre. Au niveau de la structure, la valeur de la texture est plus faible chez les peupliers agroforestiers et se traduit par une proportion de bois initial plus importante que pour les peupliers forestiers. La zone de bois initial est nettement plus importante dans le cas d'arbres AF et d'autant plus dans le rayon aligné avec les vents dominants. Les densités moyennes sont cependant comparables entre traitements. Ces résultats indiquent que la vitesse de croissance et les conditions de croissance de la parcelle agroforestière n'influencent que très peu la densité du bois des arbres qui y évoluent ; confirmant le caractère très homogène du bois de peuplier. Enfin, l'analyse de la densité moyenne par largeur de cerne indique que cette dernière est plus importante dans l'axe Nord-Sud qui correspond à l'axe du vent dominant. Cette différence peut probablement être attribuée à la présence de bois de flexion, mis en place par les arbres particulièrement exposés au vent dominant suivant cet axe. Ces résultats sont particulièrement intéressants car généralement, une augmentation de la vitesse de croissance s'accompagne d'une diminution de la densité du bois. Or, ici, la croissance accrue des peupliers agroforestiers n'est pas associée à une perte de densité, notamment grâce au caractère très homogène du bois de peuplier (Koster), permettant ainsi à l'agriculteur de produire davantage de volume de bois sans impacter la densité du matériau.

Ce volet s'est ensuite poursuivi avec l'étude de l'angle des microfibrilles. Afin d'éviter les redondances, cette partie est détaillée dans le chapitre 5, à travers un article soumis dans un journal à facteur d'impact.

Ainsi, l'ensemble de ces travaux ont permis d'aborder l'influence des conditions de croissance dans les milieux agroforestiers sur quelques propriétés physiques et chimiques importantes du bois. Ils constituent un préalable utile afin d'appréhender le chapitre suivant, portant sur

#### 4.7. SYNTHÈSE

---

l'évaluation de la qualité du bois des peupliers AF en terme de valorisation et de transformation par déroulage. La liste des propriétés que nous avons choisi d'étudier ici n'est cependant pas exhaustive et devra être complétée, notamment par une analyse fine de la structure anatomique, ou de l'orientation de la pente de fil, qui impactent fortement les propriétés mécaniques. La comparaison de la couleur du bois des troncs et notamment du duramen chez les noyers AF et FC serait également à explorer afin d'établir le lien entre les propriétés chimiques et l'aspect esthétique du bois de noyer agroforestier.

## Chapitre 5

# Valorisation des arbres agroforestiers appliquée au cas du déroulage

### 5.1 Introduction

Pour terminer ce travail de recherche portant sur la croissance et les propriétés physiques et chimiques des arbres agroforestiers, nous consacrerons ce dernier chapitre à la qualité de ces arbres en terme de valorisation. La qualité de leur bois, comme évoqué précédemment, est une vaste notion dont la définition diffère selon les points de vue (ZHANG, 2003). Nous la définirons ici comme l'adéquation du bois à une utilisation finale particulière (JOZSA et MIDDLETON, 1994), qui résulte des caractéristiques physiques et chimiques d'un arbre, ou d'une partie d'un arbre, permettant à ce dernier de répondre aux exigences de propriétés des différents produits finis (MITCHELL, 1961).

Les trois essences étudiées au cours de cette thèse ont toutes des usages finaux différents : de l'emballage léger aux contreplaqués pour le peuplier, dans le domaine de la construction pour le robinier, et dans le cas du noyer, dans l'ameublement et l'ébénisterie à haute valeur esthétique. Cependant, les robiniers du dispositif DIAMs étant encore très jeunes, il était difficile d'en évaluer la qualité finale. De la même manière, les noyers de Restinclières n'avaient pas encore atteint l'âge d'exploitation et leur processus de duraminisation n'avait pas été encore amorcé dans les deux parcelles (voir chapitre 4 - partie 4.2.2). De ce fait, de nombreux critères de qualité liés à la duraminisation n'ont pas pu être évalués lors de ce travail de thèse, tels que leur durabilité ou l'esthétique liée à la couleur de leur bois. Les peupliers du dispositif de Lent en revanche étaient suffisamment âgés pour envisager d'être exploités et évalués pour leur qualité finale. C'est une essence couramment transformée par déroulage en vue d'en faire des emballages ou des matériaux d'ingénierie de type contreplaqué. Un important travail mené sur l'aptitude au déroulage et sur la caractérisation des panneaux de LVL de peuplier a notamment été réalisé

## 5.2. COMPLÉMENT BIBLIOGRAPHIQUE

---

par H. El Haouzali en 2009 (HAOUAZALI, 2009). Afin de répondre à l'une des problématiques soulevées par la filière populicole française qui anticipe une tension sur la ressource dans les années à venir puisque le nombre de plants vendus est passé de 2 000 000 en 1996 à 800 000 en 2018 (CODIFAB, 2016, mise-à-jour en 2019), l'évaluation de la qualité du peuplier agroforestier à destination de l'industrie du contreplaqué s'est ainsi révélée pertinente.

L'objectif global de ce dernier chapitre consiste donc à évaluer la qualité technologique des placages et de LVL (Laminated Veneer Lumber) conçus à partir de peupliers agroforestiers. Le LVL a été privilégié car il permet d'homogénéiser les propriétés du matériau et de limiter l'impact de la nodosité en particulier lors de sa fabrication. Ce travail a notamment cherché à :

- Déterminer les propriétés mécaniques de panneaux de LVL issus de peupliers ayant poussé dans des conditions agroforestières puis comparer ces propriétés à celles des panneaux de LVL des témoins FC.
- Mettre en lien ces propriétés mécaniques avec les caractéristiques physiques et morphologiques de ces mêmes arbres, en s'intéressant notamment à l'influence du bois juvénile sur la qualité des panneaux de LVL agroforestiers.
- Caractériser les déformations des placages par l'observation de leurs ondulations après séchage, les fortes ondulations réduisant la qualité de ces derniers (MERELA et al., 2016).

## 5.2 Complément bibliographique

Afin d'aborder la question des modifications engendrées par les pratiques agroforestières sur la déroulabilité et sur la qualité technologique des placages et des matériaux composites obtenus à terme, il convient de rappeler quelques notions sur ce processus de première transformation et sur le LVL.

### 5.2.1 Le déroulage

Le déroulage est un procédé de première transformation dont le mode de coupe est orthogonal en mode  $0^\circ/90^\circ$ , c'est à dire que l'angle entre l'arête de l'outil et le fil du bois est de  $0^\circ$ , que celui entre la direction de coupe et le fil est de  $90^\circ$ , et que le vecteur vitesse de coupe est toujours perpendiculaire à l'avance (THIBAUT et MARCHAL, 2015). Le billon mis en rotation est usuellement fixé par l'intermédiaire de deux griffes placées aux extrémités et un couteau vient alors rentrer en contact avec le billon et dérouler la matière en continu. Le copeau obtenu constitue le produit fini qui est ensuite massicoté sous forme de feuilles de placages qui peuvent ensuite être utilisées pour la fabrication de matériaux composites tels que les contreplaqués et les LVL. Dans les contreplaqués, les placages sont collés à fils croisés, c'est à dire que les placages sont placés en alternant l'orientation de leur fil. Cette alternance des plis permet d'obtenir des pan-

## 5.2. COMPLÉMENT BIBLIOGRAPHIQUE

---

neaux pouvant être sollicités dans deux directions et stables vis à vis des variations hydriques. Dans le cas du LVL, l'ensemble des placages peuvent être collés avec une même orientation du fil. Cette orientation parallèle des plis permet ainsi d'obtenir un matériau aux propriétés mécaniques élevées et très homogène pouvant être utilisé comme structure capable de résister à des sollicitations mécaniques longitudinales.



FIGURE 5.1 – Dérouleuse instrumentée du LaBoMaP (ENSAM, Cluny)

### 5.2.2 Le LVL

Le LVL (Laminated Veneer Lumber, traduit Lamibois en français) est un matériau d'ingénierie appartenant à la famille des bois composites structurels, composé de feuilles de placages principalement collées fil parallèle. L'épaisseur de ces feuilles de placage varie généralement entre 0,8 et 4 mm, la fabrication des LVL préconisant une épaisseur standard de 3 mm (FEDERATION OF THE FINNISH WOODWORKING INDUSTRIES, 2019). L'intérêt de la lamellation est de pouvoir purger ou de distribuer les gros défauts de manière homogène dans le panneau. On obtient ainsi un matériau multicouches plus stable dimensionnellement et aux propriétés mécaniques plus homogènes et plus élevées que pour du bois massif ou du lamellé-collé grâce à la répartition aléatoire des défauts et à la purge facilitée des plus importants d'entre eux (BURDURLU et al., 2007 ; ERDIL et al., 2009 ; HARDING et ORANGE, 1998 ; KAMALA et al., 1999).

Les propriétés mécaniques et la qualité globale des LVL sont étroitement liées à sa masse volumique et dépendent de la matière première ainsi que des paramètres technologiques de la production et de la construction du matériau final (KAWAI et al., 1993). D'autres paramètres liés à la structure anatomique du bois et aux conditions de croissance du milieu peuvent affecter les propriétés du matériau LVL final. C'est notamment le cas du taux d'humidité du bois, de la présence et de la quantité de bois juvénile et/ou de nœuds, de la masse volumique, et de la variation de la pente de fil. On notera que la fissuration des placages affecte les propriétés mécaniques du LVL, en diminuant notamment sa résistance à la rupture (PURBA et al., 2019). À l'échelle industrielle, le module d'élasticité, le module de rupture et la masse volumique sont

### 5.3. DÉROULAGE ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES LVL DE PEUPLIER

les trois propriétés majoritairement utilisées pour la classification structurelle du bois.

L'une des méthodes permettant de déterminer les propriétés mécaniques du LVL consiste en la réalisation d'essais de flexion. La flexion 4-points, contrairement à la flexion 3-points, permet d'obtenir les propriétés mécaniques longitudinales d'une zone centrale soumise à un moment de flexion constant. Elle conduit au calcul de deux modules élastiques :

- Le module élastique global, déterminant la rigidité de toute la partie fléchie de l'éprouvette,
- Le module élastique local, calculé entre les points d'application des efforts, c'est-à-dire uniquement dans la zone de moment fléchissant constant.

L'essai de flexion 4-points permettant d'obtenir la rigidité des éprouvettes est également utilisé pour calculer leur module de résistance en flexion. Nous noterons ici que le LVL présente la particularité de pouvoir être sollicité à plat ou sur chant (Figure 5.2). Cette configuration sur chant présente l'avantage de solliciter tous les placages selon les mêmes contraintes et de diminuer l'impact d'un pli de basse qualité sur la tenue mécanique du matériau, son comportement mécanique étant ainsi moyenné avec celui des autres plis.

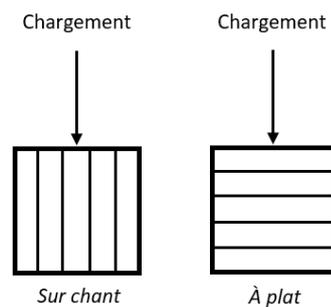


FIGURE 5.2 – Directions de chargement des panneaux de LVL

### 5.3 Influences des conditions de croissance en milieu agroforestier sur l'aptitude au déroulage du peuplier et sur les propriétés mécaniques des LVL élaborés à partir de son bois

Cette première partie a pour objectif d'évaluer les propriétés mécaniques de peupliers agroforestiers du dispositif peuplier de Lent et de les comparer à leurs témoins issus d'une plantation conventionnelle. Le module élastique (MOE) et le module de rupture (MOR) sont obtenus lors d'essais de flexion 4-points sur des éprouvettes issues de panneaux de LVL. Ces propriétés ont été mises en relation avec d'autres propriétés physiques telles que leur masse volumique ou encore l'angle de microfibrilles de leurs parois cellulaires mesuré sur un secteur déterminé. Les détails de cette étude sont présentés dans l'article suivant, en cours de préparation afin d'être valorisé

### 5.3. DÉROULAGE ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES LVL DE PEUPLIER

---

dans une revue scientifique.

**Mechanical characterisation of LVL panels from the peeling of agroforestry poplars**

Lucie Heim<sup>1,2,3,4</sup>, Rémy Marchal<sup>1</sup>, Joffrey Viguier<sup>1</sup>, Bertrand Marcon<sup>1</sup>, Julien Ruelle<sup>5</sup>, Kevin Candelier<sup>2,3</sup>, Eric Badel<sup>4</sup> and Louis Denaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP, UBFC, HESAM Université,  
F-71250 Cluny, France

<sup>2</sup>CIRAD, Research Unit BioWooEB, 34000, Montpellier, France

<sup>3</sup>BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

<sup>4</sup>Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, 63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>5</sup>UMR Silva, Université de Lorraine, INRA, 54000 AgroParisTechNancy, France

In the process of preparation for publication in a scientific journal

# Mechanical characterisation of LVL panels from the peeling of agroforestry poplars

Lucie Heim<sup>1,2,3,4</sup>, Rémy Marchal<sup>1</sup>, Joffrey Viguière<sup>1</sup>, Bertrand Marcon<sup>1</sup>, Julien Ruelle<sup>5</sup>, Kevin Candelier<sup>2,3</sup>, Eric Badel<sup>4</sup> and Louis Denaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP, UBFC, HESAM Université, F-71250 Cluny, France

<sup>2</sup>CIRAD, Research Unit BioWooEB, 34000, Montpellier, France

<sup>3</sup>BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

<sup>4</sup>Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, 63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>5</sup>UMR Silva, Université de Lorraine, INRA, 54000 AgroParisTechNancy, France

---

## Abstract

**Context:** The French poplar industry is facing the challenge of replenishing its resources, with multiple factors contributing to concerns of a potential shortage of poplar wood in the near future. To address this issue, the industry may need to consider alternative methods, such as agroforestry, instead of relying solely on valley bottom plantations. While agroforestry systems are environmentally friendly and suitable for combating climate change, they provide different growing conditions for trees compared to traditional plantations. **Aims:** This study aims to evaluate how these growth conditions impact the growth of agroforestry poplars and the mechanical properties of Engineered wood products made from the peeling process. **Methods:** We conducted a comparative analysis of the radial and height growth of trees and mechanical properties of LVL panels from agroforestry (AF) and control forest (FC) poplars, and also analyzed the microfibril angle of the cell walls of each tree. **Results:** We found that AF poplars exhibited significant higher radial growth compared to FC poplars. Moreover, the LVL materials based on agroforestry poplar woods have higher mechanical properties (MOE and MOR in bedding) than those elaborated from conventional forestry poplars. These results are consistent with previous studies on the behavior of mechanically stimulated trees. **Conclusions:** Agroforestry poplars are better adapted to wind-induced bending, leading to increased diameter growth and production of mechanically resistant wood. In summary, this study demonstrates that agroforestry poplars may offer a promising solution to the challenges faced by the poplar industry. By taking advantage of the unique growing conditions offered by agroforestry, the industry may be able to sustainably produce high-quality poplar wood products.

**Keywords :** Agroforestry , poplar , Koster , LVL , mechanical properties , growth , thigmomorphogenesis

---

# 1 Introduction

Poplar wood is the second most harvested hardwood species in France, accounting for 26% of the hardwood harvest and occupying approximately 200,000 hectares of the country's surface area. The production of poplar wood has increased by 13.6% in recent years, reaching 1.4 million cubic meters in 2017. Poplar wood is mainly used in peeling and sawing industries, which represent two-thirds and one-third of production, respectively, for the production of plywood, light packaging, pallets, crates, and plywood. Plywood accounts for 32% of the final uses of poplar wood, and its production has increased by 40% since 2015. However, the French poplar resource has significantly decreased since the 1990s, from 2.3 million trees planted per year to 800,000 plants/year in 2017 (CODIFAB, 2016, updated in 2019), due to several factors such as structural constraints, human or natural factors, the price of wood, and competition with agricultural land (Badel et al., 2021). As a result, a third of the exploited areas are not reforested today, and the current rate of replanting will not be able to cover the future demand for poplars by industries. Despite this decreasing availability of poplar wood, consumption is expected to remain relatively stable in the coming years, with certain trends indicating an increase in demand, such as the significant increase in the use of plywood and the valorisation of poplar wood as a substitute for tropical or local species. The war in Ukraine has also affected the plywood market in Europe, and poplar plywood can be used as a substitute for birch plywood. These factors have led to concerns of strong reconstitution tensions within the sector in the coming year. Therefore, the French poplar industry is mobilizing to increase the rate of tree replanting, and agroforestry approaches appear to be a credible alternative for contributing to the sustainability or even the increase of the poplar wood resource. Poplar trees produced wood material with many interesting properties for various wood sector industries. Resistant, very

light and easy to work, poplar wood is mostly used in two industries: peeling (2/3 of production) and sawing (1/3 of production), for the production of plywood, light packaging, pallets and crates.

In this context, agroforestry is an increasingly credible alternative for contributing to the sustainability or even the increase of the poplar wood resource. Combining a tree component with crops and/or livestock on the same agricultural plot, agroforestry practices have been gradually recovering in Europe for several years. They offer many economic and ecological advantages, adapting ancestral methods to the current problems of modern intensive agriculture in order to increase biomass production per hectare while taking into account environmental issues. The introduction of poplars as a fast-growing windbreak species or as an additional source of income for farmers in agroforestry systems is a relatively common practice and this specie is particularly well suited for association with other crops due to its low shade and good compatibility with many common inter-crops such as wheat or maize (Chahal et al., 2012). As a fast-growing specie, poplar provides a rapidly mobilisable wood resource (about 18 years from planting to harvesting but this could be earlier for light packaging applications), allowing for a quick income supplement compared to other species that reach harvest maturity later.

However, the growing conditions in agroforestry systems are quite different from those in conventional plantations, particularly because of the lower planting densities. Although the recommended densities for poplar plantations are relatively low (from 157 trees/ha to 204 trees/ha depending on soil potential), they are still slightly higher than those for agroforestry plots, which can decrease to 50 trees/ha. These very low planting densities lead to higher wind exposure, which generate daily repeated mechanical stresses. It has been shown in numerous studies that trees are able to perceive these mechanical stimuli (Coutand and Moulia, 2000; Coutand, 2010) and adjust

the development of their stem and branches accordingly (Jaffe et al., 1984; Kern et al., 2005; Niez et al., 2018). Several studies reported a reduction in the longitudinal growth of the axes (trunk and branches)(Coutand, 2010; Coutand et al., 2008; Meng, Lieffers, et al., 2006; Meng, Rudnicki, et al., 2006; Morel et al., 2012) and an increase in radial growth (Coutand, 2010; Coutand et al., 2009; Jacobs, 1954), with sometimes an associated ovalisation of the trunk in case of directional stresses (Jaffe et al., 1984; Kern et al., 2005; Niez et al., 2018; Roignant et al., 2018; Telewski and Pruyn, 1998). All of these developmental changes in the tree are known as the thigmomorphogenesis process (Jaffe, 1973), which leads to the formation of a specific wood that is anatomically and functionally different from normal wood, and called flexure wood (Telewski, 1989). All these thigmomorphogenetic responses allow the trees to become more resistant to wind solicitations (Bonnesoeur et al., 2016; Niez et al., 2018).

Although there has been some research on tree growth in agroforestry environments, studies on the formation of their wood and the quality of the final products from these trees are scarce. This is particularly important, as the quality of the final products is strongly linked to the species and growing conditions of the environment. The agroforestry poplar, for example, has potential use in the veneer industry, especially for plywood manufacturing, but further knowledge of its peeling ability and the quality of the resulting panels is required. While engineered wood products are more tolerant to variations in wood properties than sawn lumber, the initial quality of the wood still has a significant impact on the manufacturing process and the final product properties.

In particular, the presence of tension wood can affect the peeling process (Balatinecz and Kretschmann, 2001) and juvenile wood can reduce the mechanical properties of wood composite panels (Cloutier et al., 2007; Girardon et al., 2016; Nazerian et al., 2011). Juvenile

wood, formed by a juvenile cambium, differs in part from mature wood in its anatomical structure, in particular by shorter fibers, thinner cell walls, and a higher microfibril angle (MFA) in the cell wall than those of mature wood. Both its mechanical strength and elastic modulus (MOE) are also lower than in mature wood (Panshin and Zeeuw, 1980). The transition from juvenile to mature wood in the tree is generally accompanied by a high decrease in the microfibrils angle from pith to bark in both hardwoods and softwoods (Cave and Walker, 1994; Evans et al., 2000). As crystalline cellulose in the S2 layer of the fiber wall is highly responsible for cell wall stiffness and strength, the variation of its angle can significantly impact the macroscopic MOE and MOR (Alteyrac et al., 2007; Yang and Evans, 2003). However, the transition age from juvenile to mature wood varies according to many factors. Zhang et al., 2004 demonstrated that a rapid growth rate induces a larger proportion of juvenile wood, a lower wood density and numerous knots that depreciate the quality of the final products.

The possible presence of flexure wood in trees may also influence their mechanical properties. Especially the stresses caused by wind action impact the wood formation and finally its anatomy. In particular, Roignant *et al* have observed that flexure wood shows less vessels density, thicker fibres cell walls and that fibres show a higher proportion of G-layer with a smaller microfibril angle (Roignant et al., 2018). A few studies have investigated the mechanical properties of wood from trees that were highly exposed to wind, but the results have been inconsistent. Some studies suggest that the longitudinal stiffness (MOE) of the flexure wood in species such as *Abies fraseri* and some hybrid poplars with high wind exposure may be lower compared to normal wood. Similarly, Kern *et al* observed lower strength (MOR) in tension wood (Kern et al., 2005). However, Niez *et al* in 2018 observed that young poplars subjected to repeated stem bending had flexure wood with a higher MOR

compared to their control counterparts (Niez et al., 2020).

The purpose of this study was to investigate the impact of growing conditions in an agroforestry setting on the technological quality of poplar wood. Specifically, the mechanical and physical properties of laminated veneer lumber (LVL) panels made from agroforestry poplars (AF poplars) and their forest control counterparts (FC poplars) were evaluated to determine their suitability as raw materials for product applications. The study focused on poplars that were more than 10 years old. The modulus of elasticity (MOE) and modulus of rigidity (MOR) were determined using a four-point bending test. To minimize the influence of wood density on the bending properties, the specific modulus of elasticity (SMOE) was also estimated. (Bal and Bektas, 2012; Bao et al., 2001; Lee et al., 1999). These properties were characterised for LVL panels manufactured with veneers taken close to the pith and others located at the trunk periphery in order to assess the influence of structural and anatomical variations of the wood within the trunk. The AMF of each poplar from the two treatments AF and FC were analysed to discuss the differences observed between the mechanical properties of LVL panels from the two modalities.

## 2 Materials and methods

### 2.1 Experimental site

The experiment was carried out in a plot of land located in Lent, France (46°05'04.7"N 5°10'24.6"E and elevation 61 m). The silvicultural system was made of two plots: a forest control plot (FC plot) installed in 2003 with a planting density of 200 trees/ha, and an agroforestry plot (AF plot) planted in 2008 with a planting density of 50 trees/ha (Fig.1). In both plots, tree rows were north-south oriented and exposed to a dominant wind from the North and Northwest directions. Trees were spaced by 5 x 5 m in FC plot and 10 x 20 m in AF plot.

Fodder grass were annually harvested on a 20 m wide strip for animal feedings in the AF plot. The cultivar mainly present on these two plots is "Koster", which is a hybrid variety (*Michigan cottonwood X black poplar "Vereecken"*) that was selected in 1966 (Paillassa, 2002) and well adapted to the stations on the whole French territory. This cultivar is known to be not very sensitive to wind and easy for pruning. Its low water requirements and its good adaptation to non-valley sites (CRPF, 2016; Paillassa, 2002), making it a good candidate for production in agroforestry systems. The great advantage of this experimental site is the similar environmental conditions of AF and FC plots in terms of soils, wind exposure, and other climatic conditions. The main drawback is the difference in plantation age to simply and only compare the two sets. Ours analysis must take into account this limit.

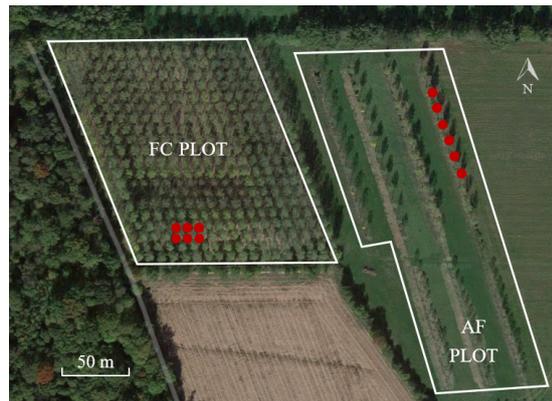


Figure 1: AF and FC plots of the Lent poplar system. Sampled trees are represented by red dots.

### 2.2 Tree selection

Six trees were sampled in each plot in April 2022. FC trees were 18 years old and the AF trees were 14 years old. A letter from A to F was assigned to each of the six AF trees, for the six FC trees a letter from G to L. For each tree, a 650 mm long bolt was cut from the butt log. The diameter at breast height (DBH) and the height (H) of each tree were measured before cutting down. The North-Pith (named R1) and South-Pith (named R2) radii were measured in order to quantify eccentricity of the pith, indicating the potential

presence of tension wood. The H/D ratio was calculated as the ratio of the whole height to the DBH of the tree (H/DBH). For each tree again, a 5 cm thick disk has been sampled for MFA measurement (Fig. 2)

The ovalisation(%) of the trunk has been defined by the equation below:

$$Ovalisation(\%) = \frac{DBH_{N-S} - DBH_{E-W}}{DBH_{E-W}} \times 100 \quad (1)$$

With DBH N-S the DBH oriented in the North-South axis and DBH E-W the one oriented East-West.

### 2.3 Measurement of the MFA

The rings are cut on plates previously stabilised at about 12% relative humidity, which are 2x5 mm in LT and with a variability in R that depends on the ring width. For rings smaller than 5mm we keep the width of the ring, otherwise we cut the ring in samples of 2 to 3 mm. The cellulose microfibril angle (MFA) measurements were then performed at the SILVATECH platform (INRAE, Nancy, France). Average MFA was estimated using an X-ray diffractometer (Supernova, Oxford-Diffraction). The Supernova system consists of a kappa geometry including a sample holder, CCD detector and X-ray tube, with a copper source. The tangential face of the samples were exposed to an X-ray beam (Cu-K $\alpha$  X-rays. wavelength  $\lambda = 1.542 \text{ \AA}$ , beam diameter 300  $\mu\text{m}$ ) and the 002 equatorial reflection was measured. The evaluation of MFA is extracted from the 002 arc intensity curve using the method given in Verrill et al., 2006, as :

$$MFA = 0.8 \times 0.6 \times (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

where  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  are the widths of the Gaussian fits of the diffraction curves.

### 2.4 Peeling and panels manufacturing

The 12 green sampled logs were peeled in May 2022 on the instrumented light packag-

ing scale lathe (SEMS500—knife length 900 mm) equipped with an angular pressure bar, in LABOMAP (Arts et Métiers de Cluny, France). It was used to peel 3 mm thick veneer with a cutting speed of 1 m.s<sup>-1</sup>. The logs were centered on the pith to be able to know the distance to the pith of each veneer, using the Xylomat software, devoted to recording many data from the lathe automation. The veneers obtained were 650 x 550 x 3 mm (length x width x thickness), ready to make panels. After peeling, veneers were dried in an air dryer at 35°C for 24 hours. For each tree, two LVL panels were produced, one with the five veneers closest to the pith, named "Inner LVL panels", the second with the five veneers furthest from the pith, named "Outer LVL panels" (Fig.2). However, the first veneers obtained during peeling were eliminated in order to avoid selecting too thin veneers due to the progressive entry of the knife into the log. This selection was performed using the cutting force sensors instrumented in the peeling machine to ensure that the cutting mechanism was studied.

The adhesive Polyvinyl acetate (PVAc) was spread at 200 g/m<sup>2</sup>. The glued veneers were pressed together in a hydraulic press at 5 bars for at least 1 hour. The impact of the glue type is supposed to be negligible since the tests are performed only edgewise (Bal and Bektas, 2012). This edgewise configuration allows all the veneers to be stressed to the same degree and reduces the impact of a low quality ply on the mechanical strength of the material, its mechanical behaviour being averaged with that of the other plies.

Ten beams of dimensions 600 (L) x 15 (R) x 20 (T) mm were cut from each panel, parallel to the grain orientation and stabilised for 15 days in a Binder climatic chamber at 20°C and 65% relative humidity to achieve a wood moisture content of about 12%. The total number of beams per LVL panel type and treatment modality is summarised in Table 1.

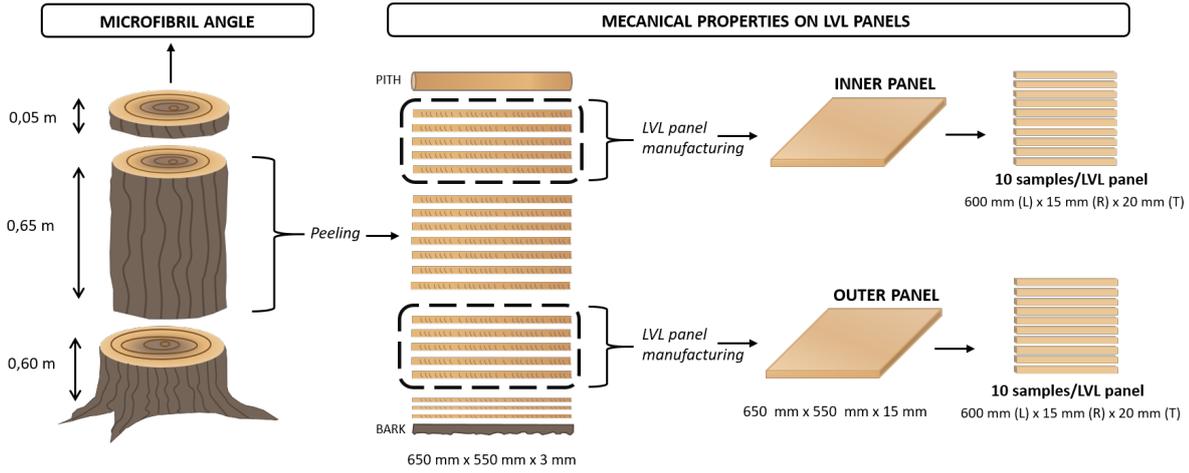


Figure 2: Schematic representation of the experimental protocol for measuring the radial variation of MFA in the trunk and the mechanical properties of LVL panels from agroforestry poplars and their forest controls obtained by peeling.

Table 1: Samples count summary table

	AF plot	FC plot	Total
Inner LVL panels	61	60	121
Outer LVL panels	64	60	124
<i>Total</i>	<i>125</i>	<i>120</i>	<i>245</i>

## 2.5 Density

The density of each beam, stabilized at a moisture content of about 12% ( $D_{12}$ ), was determined by measuring the mass and volume of each sample just before bending tests. The dimensions of each beam were measured using a sliding caliper and their mass with an analytical balance (Scaltec). After the bending test, all of the 245 beams were oven dried at  $103 \pm 2$  °C until weight stabilisation in order to control their moisture contents. The mean moisture content was on average of  $11,3\% \pm 0,31\%$ .

## 2.6 Four-point bending test

The modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) were measured using a four-point edge bending tests according to EN 408, 2010. The tests were performed using a Zwick-Roell 250 kN universal testing

machine coupled with a Baumer distance sensor (OM30-L0550.HV.YUN). The beams were loaded edgewise, parallel to the glue-line.

The MOE was determined using the formula 3 where  $b$  and  $h$  are respectively the thickness and the height of the rectangular beam (mm),  $a$  is equal to  $6h$ ,  $l$  is the span (mm).  $F_2 - F_1$  is an increment of load (N) on the linear regression (on the load *vs.* displacement curve), with a correlation coefficient at least of 0,99.  $w_2 - w_1$  is the increment of global displacement (mm) corresponding to the load increment  $F_2 - F_1$  :

$$MOE = \frac{3al^2 - 4a^3}{4bh^3 \times \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1}} \quad (3)$$

The MOR was calculated using the formula 4, where  $F_{max}$  is the maximum load (N) during the bending test:

$$MOR = \frac{3F_{max}a}{bh^2} \quad (4)$$

determine by the following equation 5 where  $\rho$  is the wood density  $D_{12}$ .

Specific modulus of elasticity (SMOE) is 
$$SMOE = \frac{MOE}{\rho} \quad (5)$$

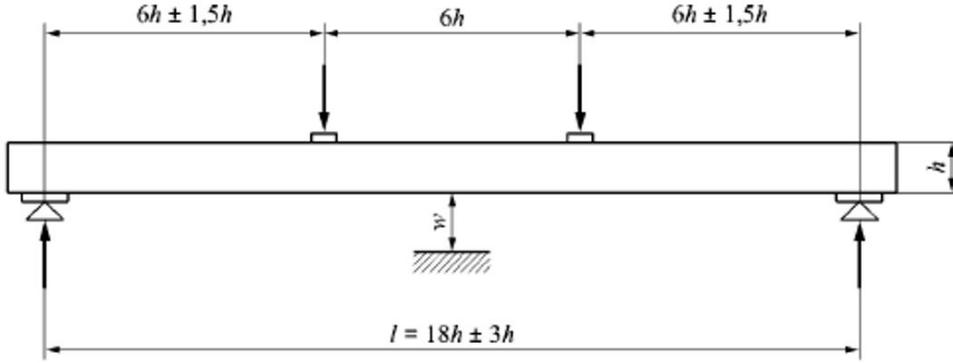


Figure 3: Four-point bending test setup according to EN 408, 2010

## 2.7 Statistical analysis

Statistical analysis were performed with the R studio software, version 4.2.2. Differences between groups were considered significant at  $p$ -value  $< 0.05$ . We used the non-parametric Wilcoxon test to compare the height and diameter growths of poplar trees depending on the plot and the orientation (in the case of DBH). The comparisons of mechanical and physical properties (MOE, MOR,  $D_{12}$ , and SMOE, MFA) between Inner and Outer LVL panels in the two plots were performed using a non-parametric Kruskal-Wallis test.

## 3 Results

### 3.1 Comparison of primary and secondary growth of AF and FC poplars

The DBH (cm) and height (m) of AF and FC poplars are presented in the Table 2.

The average height of the AF poplars is significantly lower than the FC poplars ones, with a difference of less than 2 m (19.9 m and 21.6 m respectively,  $p$ -value  $< 0.01$ ), which is quite low considering the age difference be-

tween the two sets.(Fig. 2). On the other hand, their mean diameters are statistically similar, regardless of their orientation, with a  $p$ -value = 1 for the North-South oriented diameter, and a  $p$ -value = 0.2 for the West-East diameter. This results in a higher H/DBH ratio for the forest poplars than for agroforestry poplars (65.38 for FC poplars and 62.05 for AF poplars,  $p$ -value = 0.04).

Furthermore, the N-S diameters appear to be slightly larger than the W-E diameters in both plots, indicating an ovalisation in the axis of the prevailing wind, even if these differences are not significant. The average ovalisation of the trunks indicates a much greater average ovalisation of the trunks in the AF plot (11.2%) than in the FC plot (6.7%), demonstrating a greater ovalisation of the trunks in the axis of the dominant wind in the AF plot. Moreover, the ratio between the length of the North-Pith radius (R1) and the South-Pith radius (R2) was used to evaluate the growth eccentricity of the poplars cross sections. A significant difference was found between the two silvicultural treatments: agroforestry trees, supposed to be more exposed to the wind, had a higher R1/R2 ratio ( $R1/R2 = 1.20 \pm 0.29$ ) than the forest trees ( $R1/R2 = 1.10 \pm 0.29$ ).

Table 2: DBH (cm) and height (m) of AF and FC poplars in the Poplar System of Lent. Two DBH have been measured: one in the North-South direction (N-S DBH) and one in the West-East direction (W-E DBH).

AF plot				FC plot			
	DBH (cm)		Height(m)		DBH (cm)		Height (m)
	N-S	W-E			N-S	W-E	
A	30.4	30.0	20.0	G	35.5	33.0	21.2
B	37.0	34.0	20.2	H	32.0	29.0	20.8
C	33.0	28.5	19.3	I	36.0	32.0	22.0
D	37.5	30.0	20.8	J	30.0	33.5	21.0
E	33.0	29.0	19.7	K	36.0	33.0	23.0
F	28.5	31.5	19.5	L	35.0	31.5	21.5
Mean	33.8	30.5	19.9	Mean	34.1	32.0	21.6

### 3.2 Radial variation of the microfibril angle of AF and FC poplars

The radial variations of MFA from the pith to the bark, of poplar trees from AF and FC plot are illustrated in Fig. 4.

A decrease in microfibril angle was observed from the pith to the bark in poplars from both plots. The closest to the pith rings have significantly higher MFA than the closest to the bark. During the 6 first years of growing, the microfibril angles of AF poplars were lower

than those of FC poplars probably due to the presence of more and more flexure wood over the year. In the control forest plot, the evolution of this MFA value varied greatly from tree to tree until 2010, after which the MFAs of the 7-year-old FC poplars decreased gradually and stabilized at about  $10^\circ$  in 2021. This evolution is similar for all control trees. For the AF poplars, the mean value of the microfibril angle also decreased over the years. There is no progressive stabilization of this value as it was observed in the FC poplars from 7 years.

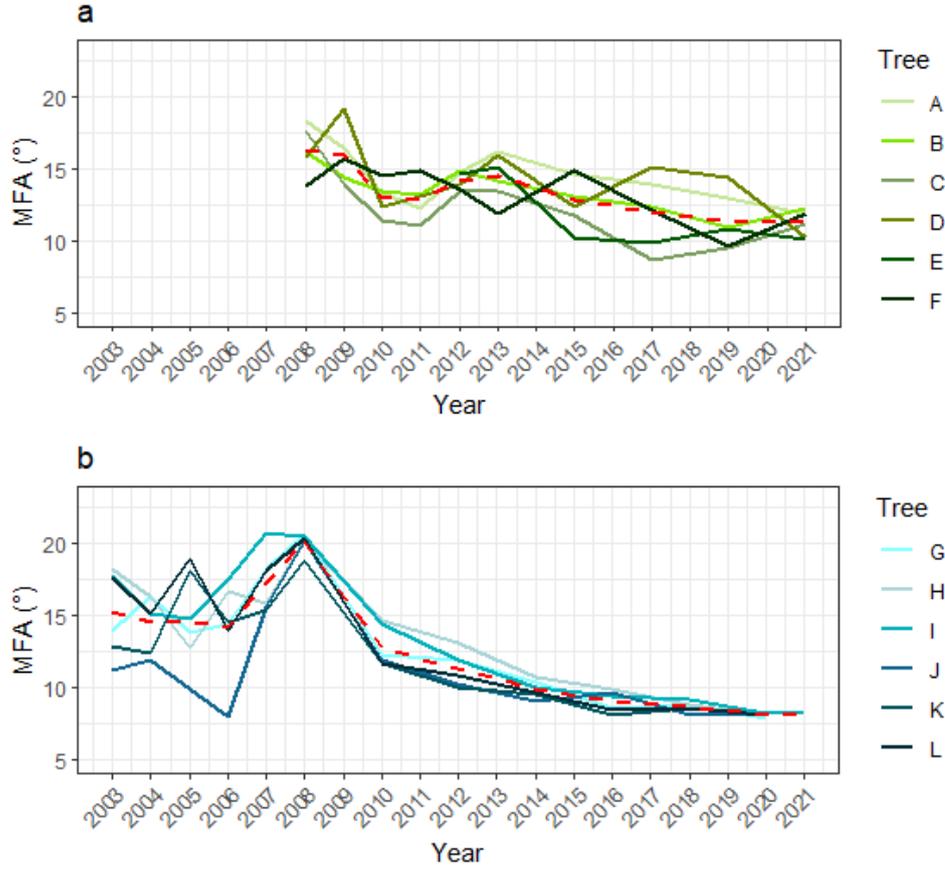


Figure 4: Radial variation of MFA from the pith to the bark for each poplar tree. Cases of AF plot (a) and FC plot (b). The red dotted lines illustrate the average values of all trees of each plot.

### 3.3 Mechanical properties of LVL panels

Table 3 provides the mean values and the standard deviations of MOE, MOR,  $D_{12}$  and SMOE and MFA for the Outer and Inner test samples of LVL panels produced with poplars coming from agroforestry and forest control plots.

The MOE values were significantly increasing when moving from the pith to the bark, both in AF and FC poplars (Fig 5). For AF poplars, average MOE values of  $8846.0 \pm 656.9$  MPa were obtained for samples from Outer panels (far from the pith), and  $7501.6 \pm 671.6$  MPa for samples from Inner LVL panels (close to the pith) (Table 3, p-value < 0.01). In the case of the FC poplars, the MOE of the samples located close to the pith averages

$5740.5 \pm 703.3$  MPa and increased with distance from the pith; with a MOE average value of  $8320.6 \pm 703.8$  MPa for the specimens in the Outer panels (Table 3, p-value < 0.01).

Similarly, a decrease of the MOR was observed when approaching the pith. This decrease is significant for both AF poplars ( $67.1 \pm 5.4$  MPa for Outer panels and  $58.7 \pm 4.0$  MPa for Inner panels, p-value < 0.01) and FC poplars ( $61.7 \pm 4.8$  MPa and  $49.2 \pm 4.0$  MPa for Outer and Inner panels, respectively, p-value < 0.01)(Table 3). Moreover, both AF Inner and Outer LVL panels showed a higher modulus of rupture than their respective FC panels. MOR of AF Inner panels were significantly higher than for the FC Inner panel (p-value < 0.01); MOR of AF Outer panels were significantly higher than for the FC Outer panel (p-value < 0.01)(Fig. 6).

Table 3: Mean values  $\pm$  standard deviation of the structural and mechanical properties of LVL panels of AF and FC. Different lowercase letters indicate significant differences between plots or radial positions of the LVL panels in the trunk.

Plot	LVL Panel	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	SMOE (GPa)	MFA (°)
		Mean $\pm$ sd	Mean $\pm$ sd	Mean $\pm$ sd	Mean $\pm$ sd	Mean $\pm$ sd
AF	Outer	8846.0 $\pm$ 656.9	a 67.1 $\pm$ 5.4	a 477.7 $\pm$ 22.6	a 18.4 $\pm$ 1.0	a 12.8 $\pm$ 2.5
AF	Inner	7501.6 $\pm$ 671.6	b 58.7 $\pm$ 4.0	b 438.8 $\pm$ 16.5	b 17.0 $\pm$ 1.0	b 14.4 $\pm$ 2.0
FC	Outer	8320.6 $\pm$ 703.8	c 61.7 $\pm$ 4.8	c 429.7 $\pm$ 16.6	c 19.3 $\pm$ 1.3	c 11.3 $\pm$ 1.6
FC	Inner	5740.5 $\pm$ 703.3	d 49.2 $\pm$ 4.0	d 418.9 $\pm$ 14.9	d 13.8 $\pm$ 1.3	d 19.5 $\pm$ 2.8

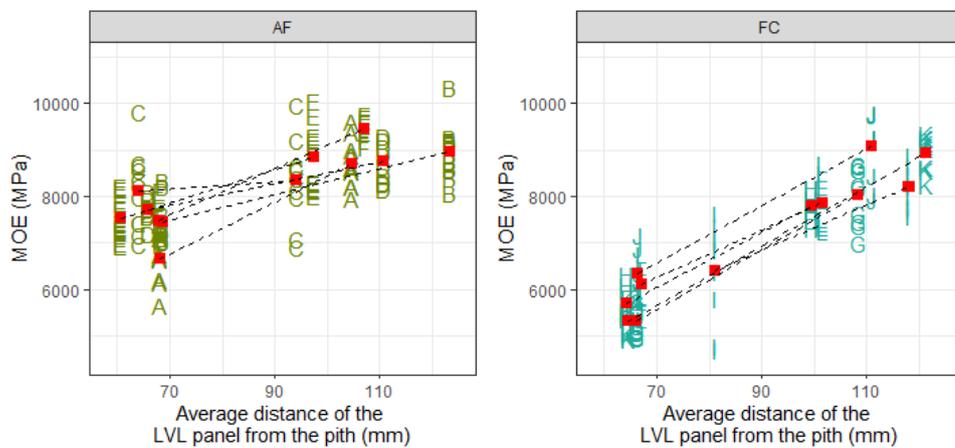


Figure 5: Radial variation of the modulus of elasticity from the pith to the bark in AF and FC plot. The letters correspond to the letter assigned to each individual poplar. The red squares represent the average values of each tree for each panel. The evolutions between the Inner and Outer LVL panels are illustrated by a dotted line.

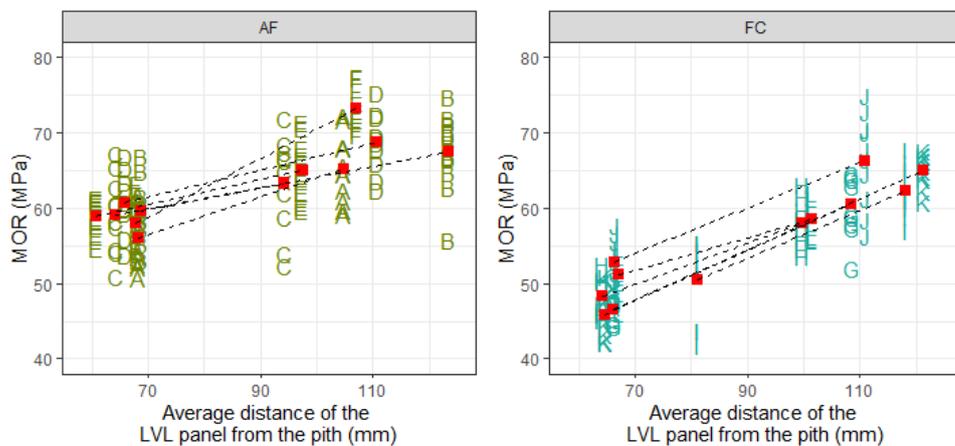


Figure 6: Radial variations of the modulus of rupture (MOR) from the pith to the bark for AF and FC plots. The letters correspond to the letter assigned to each poplar. The red squares represent the average values of each tree for each panel. The evolution between the Inner and Outer LVL panels are illustrated by a dotted line.

In both plots, the average value of the density ( $D_{12}$ ) increased from the pith to the bark in a range from  $438.8 \pm 16.5 \text{ kg/m}^3$  for AF Inner panels to  $477.7 \pm 22.6 \text{ kg/m}^3$  for AF Outer panels ( $p\text{-value} < 0.01$ ) and from  $418.9 \pm 14.9 \text{ kg/m}^3$  to  $429.7 \pm 16.6 \text{ kg/m}^3$  for FC Inner and Outer panel respectively ( $p\text{-value} < 0.01$ ). However, for both Inner and Outer panels, higher densities were observed in the case of AF poplars; the average  $D_{12}$  of Inner AF panels being significantly higher than Outer and Inner FC panels. Moreover, the variation of the  $D_{12}$  from the pith to the bark was more pronounced in the case of agroforestry panels, with an increase of +8.1% from the Inner panel to the Outer panel. In comparison with the FC

plot, this increase is about +2.5%.

Finally, we observed a significant difference for the specific modulus between the agroforestry LVL panels and the forestry controls ( $p\text{-value} < 0.01$ ). In both plots, the Outer panels showed a higher SMOE than the Inner panels. This difference was much more pronounced in the FC plot, with a significant increase ( $p\text{-value} < 0.01$ ) of +39.9% between Inner FC panels ( $13.8 \pm 1.3 \text{ GPa}$ ) and Outer panels ( $19.3 \pm 1.3 \text{ GPa}$ ). In the agroforestry plot, the SMOE of the Outer panels ( $18.4 \pm 1 \text{ GPa}$ ) was significantly higher than that of the Inner panels ( $17.0 \pm 1 \text{ GPa}$ ), with a smaller increase (+8.2%,  $p\text{-value} < 0.01$ ).

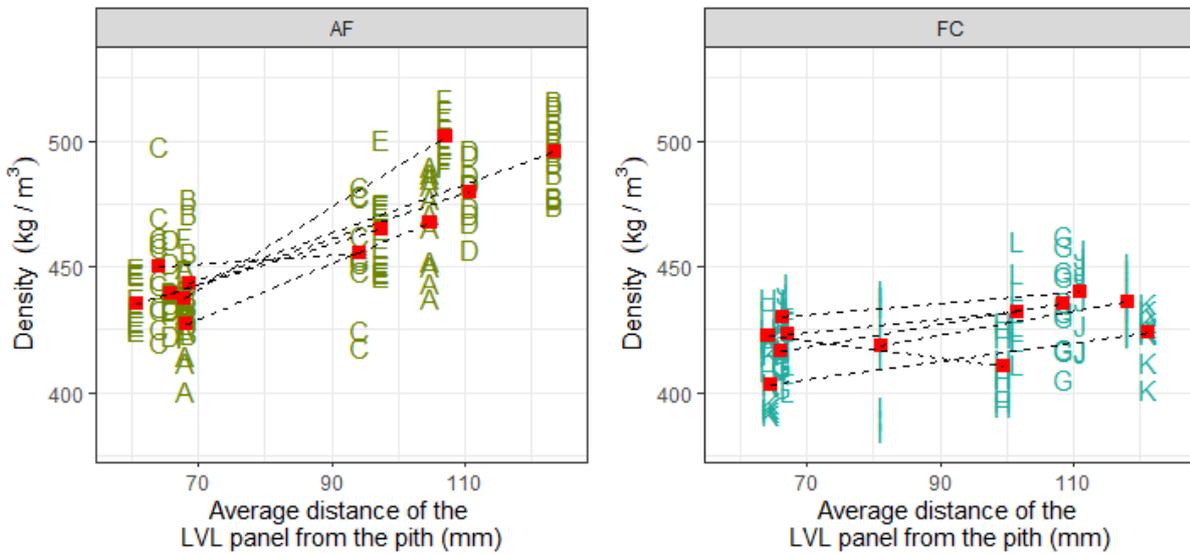


Figure 7: Radial variations of the density from the pith to the bark in AF and FC plots. The letters correspond to the letter assigned to each individual poplar. The red squares represent the average values of each tree for each panel. The evolutions between the Inner and Outer LVL panels are illustrated by a dotted line.

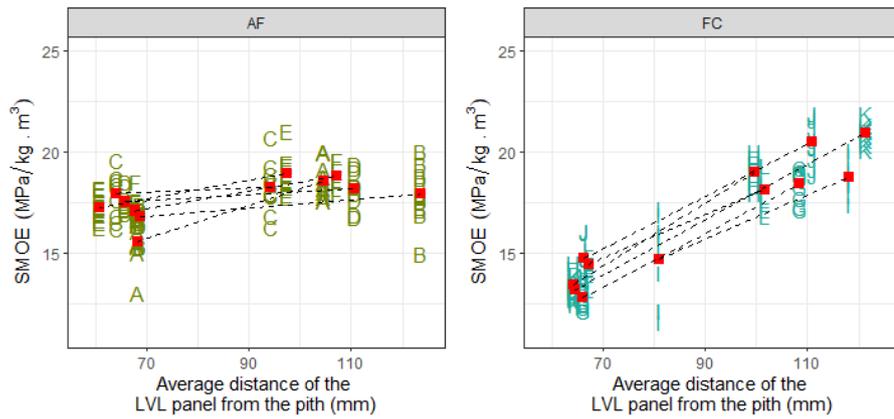


Figure 8: Radial variation of the specific modulus of elasticity (SMOE) from the pith to the bark for AF and FC plots. The letters correspond to the letter assigned to each poplar. The red squares represent the average values of each tree for each panel. The evolution between the Inner and Outer LVL panels are illustrated by a dotted line.

Knowing the average MFA value of each ring, the radial position of each ring and the distance from the pith of each panel, the average microfibril angle of each LVL panel was estimated (Fig. 9). The veneers for the Outer AF panels were taken from rings 9/10, which corresponded to the years 2016/2017. In the case of the Inner AF panels, the veneers come from ring 6 (2013). For the panels in the FC plot, the Outer LVLs also came from rings 9/10 (2011/2012) and the Inner LVLs from

ring 6 again (2008). The mean MFA in the Inner FC panels was significantly higher than in Outer FC panels:  $19.5 \pm 2.8^\circ$  versus  $11.3 \pm 1.6^\circ$  respectively (+72.5%, p-value < 0.01). Similarly, the mean MFA in the Inner panels in the AF plot was slightly higher than in the Outer panels, although this increase in MFA near the pith was less pronounced than in the FC plot ( $14.4 \pm 2.0^\circ$  and  $12.8 \pm 2.5^\circ$  respectively, +12.5%, p-value < 0.01)(Fig. 5).

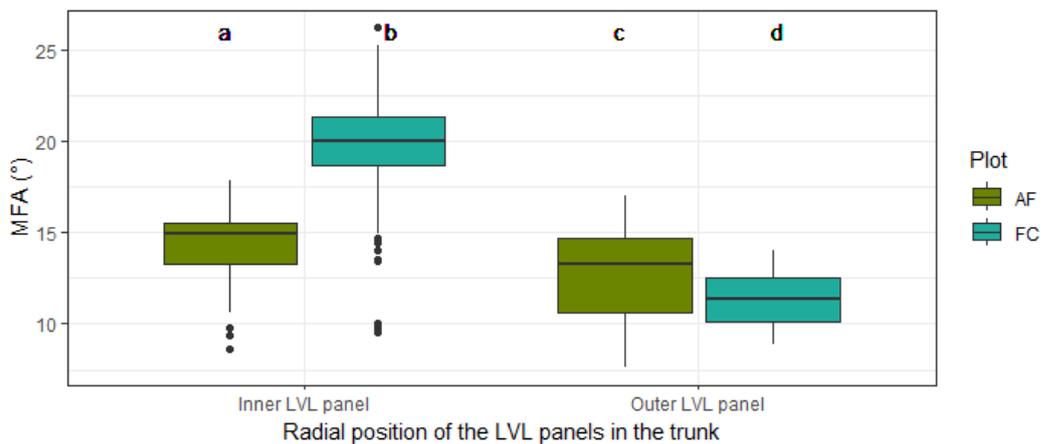


Figure 9: Evolution of mean MFA of LVL panels according to radial position in the trunk and plot. Each box represents the quartile below (Q1) and above (Q3) the median value. Vertical bars represent minimum and maximum values. Dots depict outliers

## 4 Discussions

All the values of rigidity and strength obtained in this study are in line with results reported by Paillassa et al., 2013. dealing with the wood quality of new poplar cultivars, who assigned a MOE of 8496 MPa and a MOR of 54.0 MPa to LVL panels of Koster (Paillassa et al., 2013). In our study, agroforestry poplars showed significantly higher MOE, MOR and density than control forest poplars.

While the value of the poplar stiffness was related to its density, a strong increase in the SMOE was observed from the pith in FC poplars (+39.9%). The same trend was observed in AF poplars, but the increase was much less pronounced (+8.2%) than in control poplars. However, the difference in density between the LVL Inner and Outer FC panels, although significant, was less important than between the Inner and Outer AF panels. Numerous studies have shown that flexure wood has a higher infra-density and lower specific modulus than non-mechanically stimulated trees (Kern et al., 2005; Niez et al., 2020; Pruyt et al., 2000; Telewski and Jaffe, 1986a, 1986b). Our results seem to be in line with quoted studies. Poplars more exposed to the wind (AF poplars) showed lower elastic moduli in relation to their higher densities than the control poplars (FC poplars) that were less exposed to wind.

Numerous previous studies have also highlighted the relationship between the modulus of elasticity of dry wood and the angle of the microfibrils (Evans and Ilic, 2001; Xu and Liu, 2004; Yang and Evans, 2003). The same conclusions were recently reported by Niez et al., 2020 who revealed the strong correlation between the specific elastic modulus and the variation of the angle of the microfibrils of fresh wood of young poplars; confirming the high role of microfibril angle in the cell wall mechanical properties. Our results present the same tendencies (Fig. 10): we observed a correlation between the SMOE and the MFA, both for AF and FC poplars; this correlation being stronger

for FC poplars ( $R^2=0.91$ ) than for AF poplars.. Moreover, our results indicate that LVL panels composed of the veneers far from the pith had a lower mean MFA and a higher specific modulus than LVL panels composed of the veneers close to the pith. However, the radial variation of the MFA was much less pronounced in agroforestry poplars, whereas the MFA decreased significantly and stabilised around a value of  $10^\circ$  for all FC poplars. This little variation in the MFA of the agroforestry poplars during their growth may partly explain the small, although significant, differences in the mechanical properties of the Inner and Outer LVL panels. The MFA has already been identified as a good marker of the transition from juvenile to mature wood in hardwood species, notably in Oak and Beech (Purba et al., 2021). This variation has also been studied in poplar by Fang et al. (2006) who found stabilisation of the MFA after the 5th ring which was used as a marker of the transition from juvenile to mature wood (Fang et al., 2006). In our study, the stabilisation of the MFA value in control poplars after the 8th annual ring suggested that the transition from juvenile to mature wood started around 2010. In the case of agroforestry poplars, the stabilisation of the MFA was more difficult to observe. However, a decrease between 2008 and 2021 of -31% can be estimated. The difference in the variations of the microfibril angle between the AF and FC poplars suggests different strategies for their development, particularly in terms of the juvenile/mature wood transition. Previous studies have observed in some poplar clones, that the juvenile transition, including Koster, takes place between 10 and 13 years old (Peszlen, 1994; Rahayu-Sekartiing, 2016). Thus, it can be assumed that the Outer FC LVL panels were composed of mature wood veneers, while the Inner FC panels were composed of juvenile wood veneers. In the case of agroforestry poplars, the Inner and Outer panels are probably all composed by juvenile wood. Furthermore, a comparison of the biochemical composition of the wood of the same poplars revealed that AF poplars had a lower lignin

content than FC poplars. These differences could be explained by the growing conditions between the two systems and suggested that

agroforestry poplars tended to produce more flexure wood and more juvenile wood than FC poplars (Heim et al., 2023).

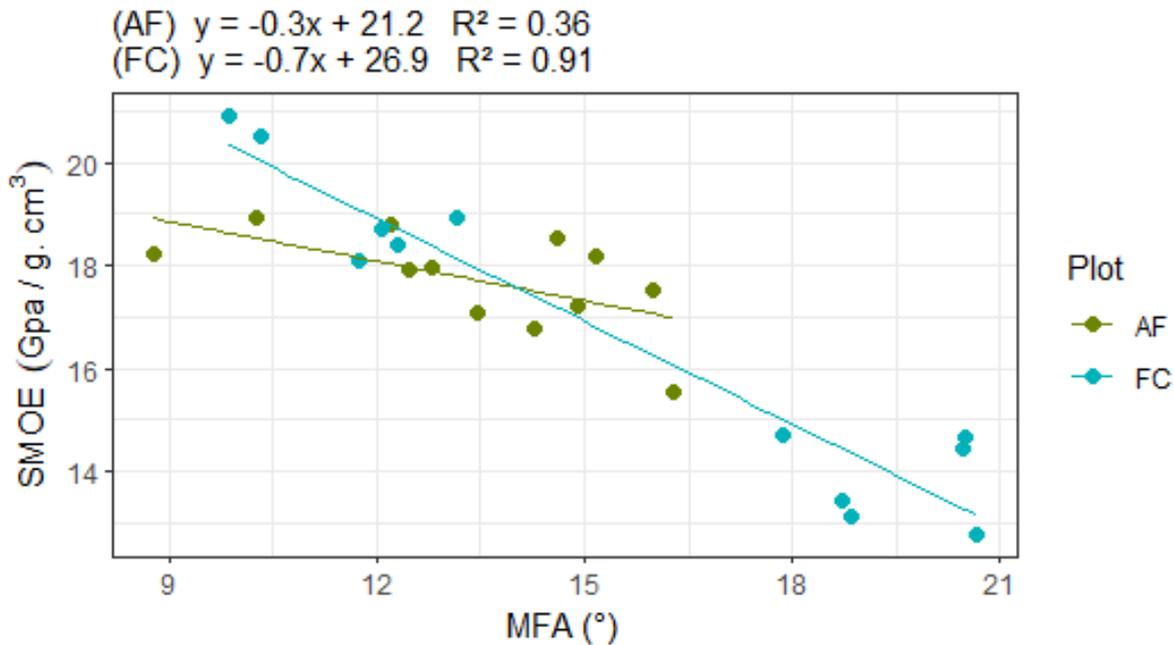


Figure 10: Relationship between the specific modulus of LVL panels of poplars and their microfibril angle - The SMOE and MFA correspond to the mean values of each panel and per tree. The lines represent the linear regression for both plots. The equations of these two lines are reported above the graph.

The studies carried out on the effect of mechanical stimulation on stem strength differ in the results they obtained. In 2005, Kern et al observed that the MOR of mechanically stimulated hybrid poplars were not different or even lower than non-stimulated poplars (Kern et al., 2005). In contrast, Telewski and Jaffe, 1986b observed that Loblolly pine stems acclimated to mechanical stimulations showed greater resistance to high intensity bending than non-stimulated trees. Similarly, Niez et al., 2020 demonstrated on poplar seedlings that repetitively mechanically stimulated trees were more resistant to damage and had an higher mechanical resilience than normal wood. They also observed greater mechanical resistance of the stem to bending and concluded that trees subjected to repetitive mechanical stimuli adjusted their plastic behaviour to improve their mechanical safety. Their results showed a high

correlation between variations in the specific modulus of fresh poplar wood and variations in the angle of the microfibrils in their cell walls (Niez et al., 2020). Our results seem to agree with these conclusions (Niez et al., 2020; Telewski and Jaffe, 1986b). Indeed, the poplars most exposed to the wind, which were have developed in the agroforestry plot, have significantly higher MOR than the less stimulated poplars in the control plot.

In addition, the poplars grew faster in diameter in the agroforestry plot. Indeed, the AF poplars, although 5 years younger, had diameters significantly similar to those of the FC poplars. In both plots, a slight ovalization of the trunks was observed, the North-South DBH (direction of the prevailing wind) being slightly higher than the East-West DBH (not significant). The height of the AF poplars remained statistically lower than that of the FC

poplars but this could also be slightly due to their age difference. This increase in the radial growth of the AF poplars and the eccentricity of the pith suggests that trees experienced a thigmomorphogenic process. This process is a physiologic response of trees to windy environments that provided the acclimation of the stems to the higher mechanical stresses induced lower planting densities environment. This is in agreement with the many previous studies in which the trees more exposed to the wind were reported as smaller and wider than the accompanied trees and therefore better protected from the wind (Bonnesoeur et al., 2016; Niez et al., 2018). This modification of the biomass allocation of agroforestry poplars, coupled with an increase in their stiffness and bending strength, demonstrates the acclimation of agroforestry trees to a more fluctuating windy environment than poplars growing in usual conditions.

## 5 Conclusion

The main objective of this study was to evaluate the technological quality of poplars grown under agroforestry conditions by comparing their mechanical properties with poplar growing in conventional plantations. For this purpose, samples from LVL panels obtained after peeling were tested with 4-point bending. Our observations indicate that agroforestry poplars have very good mechanical properties in terms of stiffness, bending strength and density. An increase in these properties was observed with increasing distance from the pith in both plots. However, we observed that these differences between the Inner and Outer panels were less pronounced in the agroforestry plot. This can be explained by the small variation in MFA in the agroforestry plot, compared to the difference in MFA between the Inner FC and Outer FC panels, which suggests that the juvenile transition of the wood in the forest control plot was complete and that the Outer panels are composed of mature wood with higher mechanical properties than juve-

nile wood. In the agroforestry plot, this transition of juvenile wood is not complete and we assume, based on the criterion of MFA variation (Fang et al., 2006), that both the Inner AF and Outer AF panels were composed of juvenile wood. Nevertheless, the strength and stiffness of AF poplars was significantly higher than for FC poplars. These results, coupled with the very rapid radial growth of AF poplars, suggest that trees in agroforestry environments, which are particularly mechanically stimulated by wind due to their high exposure, acclimate their development by forming flexure wood capable of resisting the many stimuli they daily experience. In addition to the improvement of the knowledge of the thigmomorphogenesis phenomenon by studying the behaviour of trees in an environment that is far removed from forestry and conventional plantings, are very promising for the poplar sector and suggest a potential use of agroforestry poplars in the industrial sector for Engineered Wood Products (EWP). However, this work should be completed by a more detailed analysis of the anatomical characteristics of wood from agroforestry trees and could be extended to other poplar cultivars in order to ensure the sustainability of the resource in France.

## Acknowledgment

The authors thank Mr Vincent, the owner of the fields, for the use of his poplars, as well as Mr Trompille for his invaluable help in transporting the trunks. The authors also thank the SILVATECH platform (INRAE, Nancy) for the MFA measurements. This work was financed by the Fondation de France as part of its 2019 call for projects "Research on agroforestry".

## References

- Alteyrac, J., Cloutier, A., Ung, C.-H., & Zhang, S. Y. (2007). Mechanical properties in relation to selected wood char-

- acteristics of black spruce. *Wood and Fiber Science*, 229–237.
- Badel, E., Bastien, C., Baubet, O., Berthelot, A., Boutte, B., Chazallon, G., Cochard, H., Fabre, B., Fichot, R., Francois, D., Gobin, R., Havard, M., Herbette, S., de Lagausie, O., Legrand, G., Marchal, R., Marron, N., Montagne, E., Mourlan, B., ... Villar, M. (2021). *26e session de la CIP - activités liées à la culture et à l'utilisation des peupliers, des saules et d'autres arbres à croissance rapide (2016-2019)*. <https://hal.inrae.fr/hal-03545811>
- Bal, B., & Bektas, I. (2012). The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber. *BioResources*, 7, 3104–3112.
- Balatinecz, J. J., & Kretschmann, D. E. (2001). Properties and utilization of poplar wood. In *Poplar culture in north america* (Edited by D.I. Dickmann, J.G. Isebrands, J.E. Eckenwalder and J. Richardson, pp. 277–291). NRC Research Press, National Research Council of Canada.
- Bao, F., Fu, F., Choong, E., & Hse, C.-Y. (2001). Contribution factor of wood properties of three poplar clones to strength of laminated veneer lumber. *Wood and Fiber Science*, 33, 345–352.
- Bonnesoeur, V., Constant, T., Moulia, B., & Fournier, M. (2016). Forest trees filter chronic wind-signals to acclimate to high winds [Publisher: Wiley]. *New Phytologist*, 210(3), 850–860. <https://doi.org/10.1111/nph.13836>
- Cave, I. D., & Walker, J. C. F. (1994). Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: The influence of microfibril angle. *Forest products journal (USA)*.
- Chahal, D., Ahmad, A., & Bhatia, J. N. (2012). Assessment of agroforestry based two-tier-cropping system in ambala district of haryana. *Agriculture Update* 7 (3/4): 210-213.
- Cloutier, A., Ananias, R. A., Ballerini, A., & Pecho, R. (2007). Effect of radiata pine juvenile wood on the physical and mechanical properties of oriented strand-board. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(2), 157–162. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0148-2>
- CODIFAB. (2016). *Sécurisation des approvisionnements en Peuplier (mis à jour 2019)*. <https://www.codifab.fr/actions-collectives/securisation-des-approvisionnement-en-peuplier-1636>
- Coutand, C., & Moulia, B. (2000). Biomechanical study of the effect of a controlled bending on tomato stem elongation: Local strain sensing and spatial integration of the signal. *Journal of Experimental Botany*, 51(352), 1825–1842. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.352.1825>
- Coutand, C. (2010). Mechanosensing and thigmomorphogenesis, a physiological and biomechanical point of view. *Plant Science*, 179(3), 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.05.001>
- Coutand, C., Dupraz, C., Jaouen, G., Ploquin, S., & Adam, B. (2008). Mechanical stimuli regulate the allocation of biomass in trees: Demonstration with young prunus avium trees. *Annals of Botany*, 101(9), 1421–1432. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn054>
- Coutand, C., Martin, L., Leblanc-Fournier, N., Decourteix, M., Julien, J.-L., & Moulia, B. (2009). Strain mechanosensing quantitatively controls diameter growth and *PtaZFP2* gene expression in poplar. *Plant Physiology*, 151(1),

- 223–232. <https://doi.org/10.1104/pp.109.138164>
- CRPF. (2016, September). *Le peuplier - un feuillu performant cultivé en rhône-alpes*. Centre Régional de la Propriété Forestière Rhône-Alpe. [https://pefcaura.com/sites/default/files/prgm-accompagnement/exe\\_fiche\\_essence\\_peuplier\\_09\\_2016\\_v2\\_1-1.pdf](https://pefcaura.com/sites/default/files/prgm-accompagnement/exe_fiche_essence_peuplier_09_2016_v2_1-1.pdf)
- EN 408. (2010, November). Timber structures - structural timber and glued laminated timber - determination of some physical and mechanical properties.
- Evans, R., Kibblewhite, R. P., & Stringer, S. (2000). Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine eucalyptus nitens trees.
- Evans, R., & Ilic, J. (2001). Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *Forest Products Journal*, *51*, 53–57.
- Fang, S., Yang, W., & Tian, Y. (2006). Clonal and within-tree variation in microfibril angle in poplar clones. *New Forests*, *31*(3), 373–383. <https://doi.org/10.1007/s11056-005-8679-7>
- Girardon, S., Denaud, L., Pot, G., & Rahayu, I. (2016). Modelling the effects of wood cambial age on the effective modulus of elasticity of poplar laminated veneer lumber. *Annals of Forest Science*, *73*(3), 615–624. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0569-y>
- Heim, L., Brancheriau, L., Marchal, R., Boutahar, N., Denaud, L., Badel, E., Meghar, K., & Candelier, K. (2023). NIR-hyperspectral camera analyses for differencing agroforestry and forestry poplar woods. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00877-5>
- Jacobs, M. R. (1954). The effect of wind sway on the form and development of pinus radiata d. don.
- Jaffe, M. J. (1973). Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation. *Planta*, *114*(2), 143–157. <https://doi.org/10.1007/BF00387472>
- Jaffe, M. J., Telewski, F. W., & Cooke, P. W. (1984). Thigmomorphogenesis: On the mechanical properties of mechanically perturbed bean plants. *Physiologia Plantarum*, *62*, 73–78. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1984.tb05925.x>
- Kern, K. A., Ewers, F. W., Telewski, F. W., & Koehler, L. (2005). Mechanical perturbation affects conductivity, mechanical properties and aboveground biomass of hybrid poplars. *Tree Physiology*, *25*(10), 1243–1251. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.10.1243>
- Lee, J., Tang, R., & Kaiserlik, J. H. (1999). Edgewise static bending properties of yellow-poplar laminated veneer lumber: Effect of veneer-joint designs. *Forest Products Journal*, *49*(7).
- Meng, S. X., Lieffers, V. J., Reid, D. E. B., Rudnicki, M., Silins, U., & Jin, M. (2006). Reducing stem bending increases the height growth of tall pines. *Journal of Experimental Botany*, *57*(12), 3175–3182. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl079>
- Meng, S. X., Rudnicki, M., Lieffers, V. J., Reid, D. E. B., & Silins, U. (2006). Preventing crown collisions increases the crown cover and leaf area of maturing lodgepole pine. *Journal of Ecology*, *94*(3), 681–686. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01121.x>
- Morel, P., Crespel, L., Galopin, G., & Moulia, B. (2012). Effect of mechanical stimulation on the growth and branching

- of garden rose. *Scientia Horticulturae*, 135, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.12.007>
- Nazerian, M., Ghalehno, M., & Kashkooli, A. (2011). Effect of wood species, amount of juvenile wood and heat treatment on mechanical and physical properties of laminated veneer lumber. *Journal of Applied Sciences*, 11(6), 980–987. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.980.987>
- Niez, B., Dlouha, J., Gril, J., Ruelle, J., Toussaint, E., Moulia, B., & Badel, E. (2020). Mechanical properties of “flexure wood”: Compressive stresses in living trees improve the mechanical resilience of wood and its resistance to damage. *Annals of Forest Science*, 77(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-0926-8>
- Niez, B., Dlouha, J., Moulia, B., & Badel, E. (2018). Water-stressed or not, the mechanical acclimation is a priority requirement for trees. *Trees - Structure and Function*, 33(1), 279–291. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1776-y>
- Paillassa, E. (2002). Fiche technique cultivar de peuplier : Koster. *Forêt-entreprise*, (146).
- Paillassa, E., Berthelot, A., Reuling, D., Robert, A., Lanvin, J., Legrand, J., Moreau, J., & Denaud, L. (2013). *Etude des qualités du bois des nouveaux cultivars de peuplier (rapport final)* (Rapport final).
- Panshin, A. J., & Zeeuw, C. (1980). *Textbook of wood technology vol i*. McGraw Hill Book Company Inc.
- Peszlen, I. (1994). Influence of age on selected anatomical properties of populus clones. *IAWA Journal*, 15(3), 311–321. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000613>
- Pruyn, M. L., Ewers, B. J., & Telewski, F. W. (2000). Thigmomorphogenesis: Changes in the morphology and mechanical properties of two populus hybrids in response to mechanical perturbation. *Tree Physiology*, 20(8), 535–540. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.8.535>
- Purba, C. Y. C., Dlouha, J., Ruelle, J., & Fournier, M. (2021). Mechanical properties of secondary quality beech (*fagus sylvatica* l.) and oak (*quercus petraea* (matt.) Liebl.) obtained from thinning, and their relationship to structural parameters. *Annals of Forest Science*, 78(3), 81. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01103-x>
- Rahayu-Sekartiing, I. (2016, August 24). *Characteristics of lathe check and surface roughness of fast growing wood veneers and their performance on laminated veneer lumber* (Doctoral dissertation). Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM.
- Roignant, J., Badel, E., Leblanc-Fournier, N., Brunel-Michac, N., RUELLE, J., Moulia, B., & Decourteix, M. (2018). Feeling stretched or compressed? the multiple mechanosensitive responses of wood formation to bending. *Annals of Botany*, 121(6), 1–11. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx211>
- Telewski, F. W. (1989). Structure and function of flexure wood in *abies fraseri* [Publisher: Oxford Academic]. *Tree Physiology*, 5(1), 113–121. <https://doi.org/10.1093/treephys/5.1.113>
- Telewski, F. W., & Jaffe, M. J. (1986a). Thigmomorphogenesis: Anatomical, morphological and mechanical analysis of genetically different sibs of *pinus taeda* in response to mechanical perturbation. *Physiologia Plantarum*, 66(2),

- 219–226. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1986.tb02412.x>
- Telewski, F. W., & Jaffe, M. J. (1986b). Thigmomorphogenesis: The role of ethylene in the response of *pinus taeda* and *abies fraseri* to mechanical perturbation. *Physiologia Plantarum*, *66*(2), 227–233. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1986.tb02413.x>
- Telewski, F. W., & Pruyn, M. L. (1998). Thigmomorphogenesis: A dose response to flexing in *ulmus americana* seedlings. *Tree Physiology*, *18*(1), 65–68. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.1.65>
- Verrill, S. P., Kretschmann, D. E., & Herian, V. L. (2006). *JMFA 2 - a graphically interactive java program that fits microfibril angle x-ray diffraction dat.*
- Xu, P., & Liu, H. (2004). Models of microfibril elastic modulus parallel to the cell axis. *Wood Science and Technology*, *38*(5). <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0235-7>
- Yang, J. L., & Evans, R. (2003). Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh- und Werkstoff*, *61*(6), 449–452. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0424-3>
- Zhang, S. Y., Yu, Q., & Beaulieu, J. (2004). Genetic variation in veneer quality and its correlation to growth in white spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, *34*(6), 1311–1318. <https://doi.org/10.1139/x04-015>

### 5.4 Caractérisation de l'ondulation des placages issus de peupliers agroforestiers

Le défaut de planéité d'un placage est un inconvénient majeur dans la fabrication des matériaux techniques bois tels que les LVL ou les contreplaqués. Cette ondulation peut notamment provoquer un redressement du placage et entraîner sa fissuration lors du processus de pressage en fabrication ou sa rupture mais elle est également liée à un risque de décollement de l'adhésif et donc à la formation d'une couche d'adhésif d'épaisseur variable pouvant affecter le comportement mécanique des panneaux. L'objectif de cette étude est de caractériser les déformations des placages obtenus lors du déroulage d'arbres agroforestiers, toujours en comparant les résultats obtenus avec ceux issus des témoins (FC), et d'évaluer s'ils sont compatibles avec une utilisation industrielle.

#### 5.4.1 Matériels et Méthodes

##### 5.4.1.1 Déroulage et préparation des placages

Six billons AF et six billons FC du dispositif de Lent présenté précédemment, de longueur 650 mm, ont été déroulés à l'état vert sur la dérouleuse instrumentée du LaBoMaP (Arts & Métiers, Cluny, Figure 5.1) en mai 2022. Lors de notre campagne de déroulage, les paramètres de coupe ont été les suivants :

- Épaisseur du placage : 1 mm
- Longueur du billon : 650 mm
- Longueur de massicotage : 620 mm
- Pression appliquée de la barre de pression : 10%
- Déroulage à l'état vert
- Centrage des broches sur la moelle

Après déroulage, les placages de dimensions 650 mm x 620 mm x 1 mm ont été immédiatement placés dans des claies puis séchés pendant 24h dans un séchoir à 35°C. Ils ont ensuite été stockés pendant plusieurs semaines dans un environnement intérieur d'humidité et de température relativement stables, disposés verticalement pour éviter un écrasement des placages qui seraient placés en bas de la pile. Tous les placages ont été pesés avant leur passage dans le SWAN (système de caractérisation de l'ondulation développé au LaBoMaP, voir partie 5.4.1.2), puis une partie d'entre eux ont été séché à 103°C jusqu'à stabilisation de la masse afin de déterminer leur taux d'humidité relatif au moment de la mesure (8.49 % d'humidité en moyenne).

La présence de faux-coeur dans l'arbre peut déprécier la qualité esthétique de ses placages

## 5.4. CARACTÉRISATION DE L'ONDULATION DES PLACAGES

et réduire la résistance de la colle dans les matériaux composites (WARD et PONG, 1980). Afin de déterminer l'influence du faux-cœur sur leur déformation, les placages de chaque billon ont été classés visuellement en trois catégories correspondant aux trois zones de tronc suivantes et illustrées par les figures 5.3a et 5.3b :

- La zone d'aubier : les placages de cette catégorie sont uniquement composés d'aubier.
- La zone de transition : ces placages sont constitués à la fois de zones d'aubier et de zones plus foncées correspondant au bois de faux-cœur.
- La zone de faux-cœur : ces placages sont composés uniquement de bois de faux-cœur.

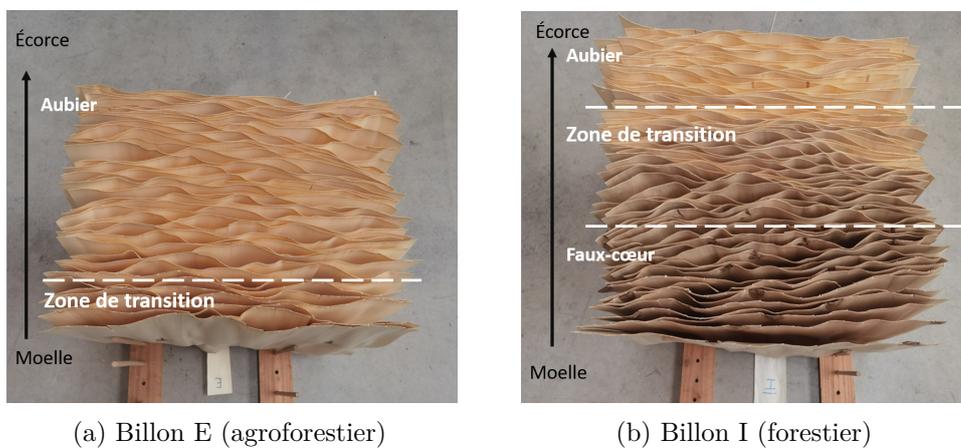


FIGURE 5.3 – Photographies de l'ensemble des placages caractérisés pour deux billons (un AF et un FC), rangés radialement de la moelle vers l'écorce et illustration des trois zones de tronc (aubier, zone de transition et faux-cœur).

### 5.4.1.2 Mesure de l'ondulation

L'ondulation des placages a été caractérisée à l'aide d'un système d'analyse de l'ondulation (System of WAviness Analysis, SWAN) développé au LaBoMaP, Arts Métiers (Figure 5.4a). Ce système de mesure est équipé d'une caméra et d'une ligne laser qui se déforme en suivant la forme du placage. La caméra utilise la triangulation laser pour mesurer la distance : le placage est éclairé par une ligne laser depuis une direction, et la caméra observe le placage depuis une autre direction. La ligne laser apparaît comme une section transversale du placage sur le capteur de la caméra, et la hauteur de chaque point est calculée à partir de la déformation de la ligne laser sur l'image de la caméra (Figure 5.4b). Les placages sont placés sur un tapis roulant, permettant à la ligne laser de balayer l'ensemble du placage. Les ondulations sont mesurées avec une résolution spatiale de l'ordre de 0.8 mm perpendiculairement au défilement et le pas d'acquisition constant dans le sens du défilement est de l'ordre de 2.6 mm. La précision suivant l'altitude du placage est de l'ordre de 0.6 mm.

## 5.4. CARACTÉRISATION DE L'ONDULATION DES PLACAGES

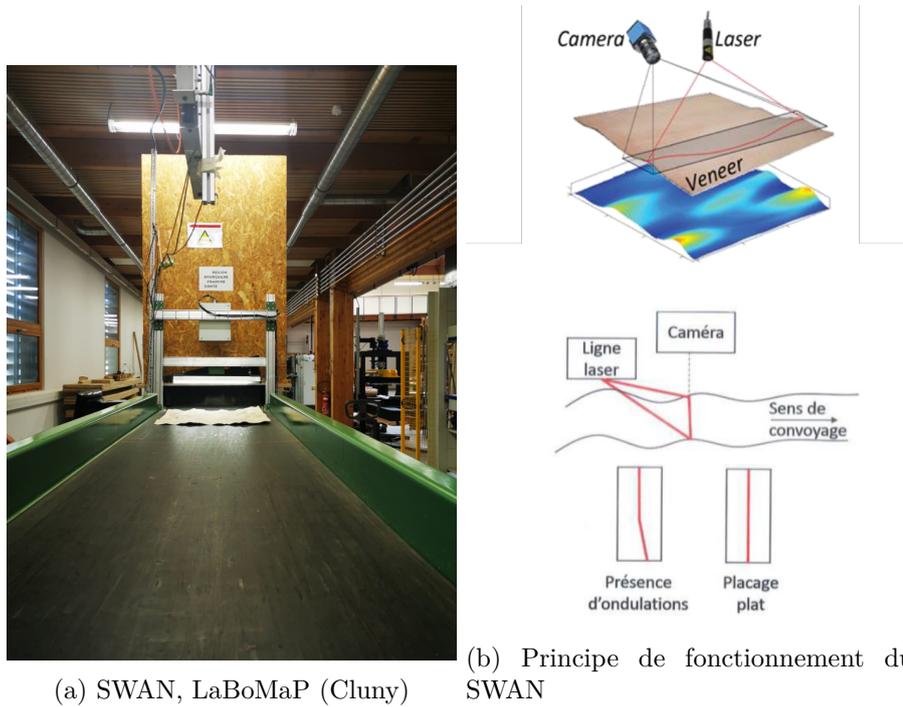


FIGURE 5.4 – System of Waviness Analysis, SWAN - (a) Représentation schématique du principe de mesure de l'ondulation des placages et (b) illustration du fonctionnement sur un placage.

L'ensemble des placages a été caractérisé pour chaque billon, sur des placages situés les plus proches de la moelle jusqu'à ceux situés à proximité de l'écorce, permettant ainsi d'obtenir l'évolution de leurs déformations en fonction de leur position radiale dans le tronc. Au total, 314 placages agroforestiers et 406 placages forestiers témoins ont été étudiés (Tableau 5.1).

TABLE 5.1 – Nombre de placages caractérisés par arbre et par parcelle.

Parcelle AF		Parcelle FC	
Arbre	nombre de placages	Arbre	nombre de placages
A	53	G	68
B	75	H	57
C	55	I	74
D	38	J	67
E	44	K	76
F	49	L	64
<i>Total</i>	<i>314</i>		<i>406</i>

Un filtrage des données est ensuite réalisé afin d'éliminer les mesures parasites, puis les

## 5.4. CARACTÉRISATION DE L'ONDULATION DES PLACAGES

différents paramètres d'ondulation ont été calculés. Il existe de nombreux paramètres permettant de caractériser l'ondulation des placages. Nous avons choisi pour cette étude de nous concentrer sur deux de ces paramètres qui donneront une mesure globale de l'ondulation des placages issus des peupliers AF et FC. Ces paramètres sont :

- Sa, qui correspond à la hauteur moyenne arithmétique, en valeur absolue, de la différence de hauteur de chaque point par rapport au plan moyen de la surface.
- Sz, qui correspond à la hauteur maximale du placage, c'est-à-dire la somme de la hauteur de crête maximale et de la profondeur du puits la plus importante sur l'intégralité du placage.

### 5.4.1.3 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel libre R studio, version 4.0.4. Elles ont été considérées comme significatives à une valeur  $p - value < 0,05$ . Les comparaisons des paramètres d'ondulation entre les arbres issus des deux parcelles ont été faites à l'aide des tests non paramétriques de Wilcoxon et de Kruskal-Wallis.

## 5.4.2 Résultats

### 5.4.2.1 Cartographie des ondulations

Après traitement des mesures obtenues par le SWAN, la cartographie de l'ondulation de chaque placage a été réalisée. Un exemple des résultats obtenus pour un placage situé dans la zone d'aubier du billon A agroforestier est présenté sur la figure 5.5.

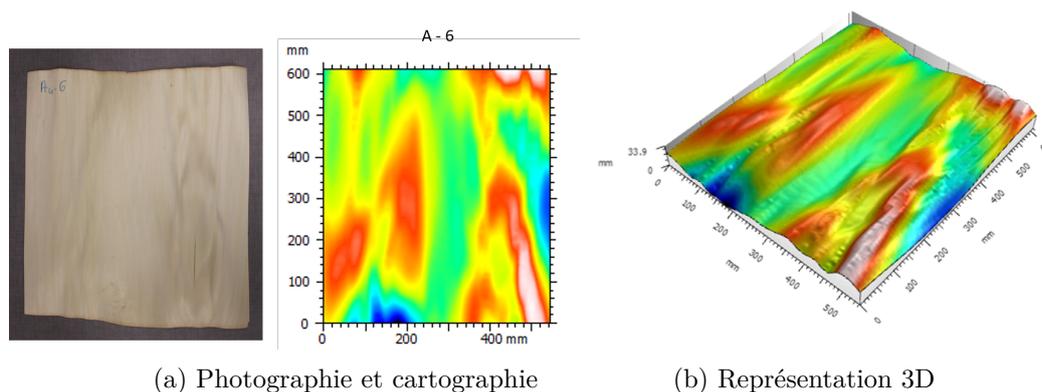


FIGURE 5.5 – Cartographie de l'ondulation du placage 6 provenant du billon A agroforestier. Placage situé dans la zone de bois d'aubier, (a) photographie et cartographie 2D, (b) représentation 3D.

## 5.4. CARACTÉRISATION DE L'ONDULATION DES PLACAGES

### 5.4.2.2 Comparatif général des paramètres d'ondulations entre les parcelles

Les valeurs des différents paramètres d'ondulations obtenus pour les peupliers des deux parcelles AF et FC sont répertoriées dans le tableau 5.2 ci-dessous et illustrées par les figures 5.6 et 5.7.

TABLE 5.2 – Paramètres mesures ondulation

Paramètres d'ondulation	Parcelle AF	Parcelle FC	
	Moyenne $\pm$ sd	Moyenne $\pm$ sd	
Sa (mm)	3.346 $\pm$ 0.548	2.502 $\pm$ 0.546	***
Sz (mm)	25.617 $\pm$ 4.287	20.366 $\pm$ .026	***

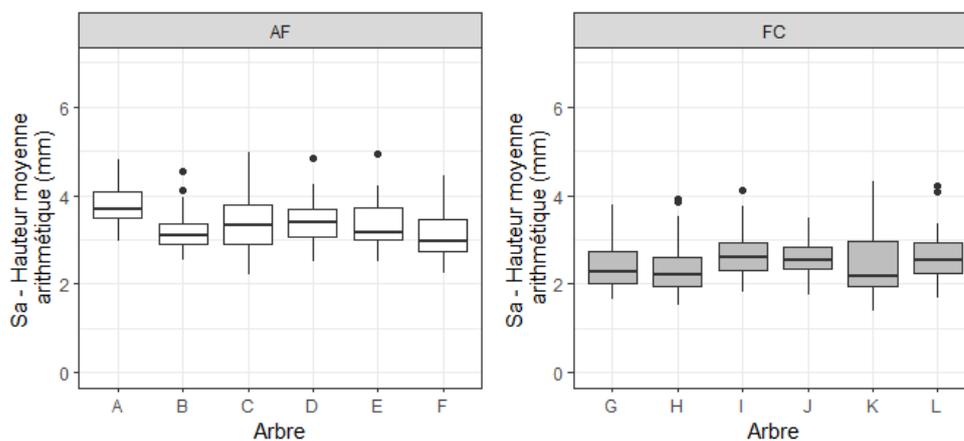


FIGURE 5.6 – Sa - Hauteur moyenne arithmétique (mm) des placages par arbre en fonction de la parcelle.

Bien qu'on observe des différences entre les peupliers d'une même parcelle, il apparaît que l'ondulation moyenne Sa des placages issus de la parcelle agroforestière est significativement plus élevée que dans la parcelle témoin FC. Les mêmes tendances sont observées pour la hauteur totale Sz. Ces différences étant toujours significatives (Tableau 5.2), le traitement agroforestier semble donc affecter la planéité des placages des Koster en augmentant la hauteur et la profondeur de leurs ondulations.

## 5.4. CARACTÉRISATION DE L'ONDULATION DES PLACAGES

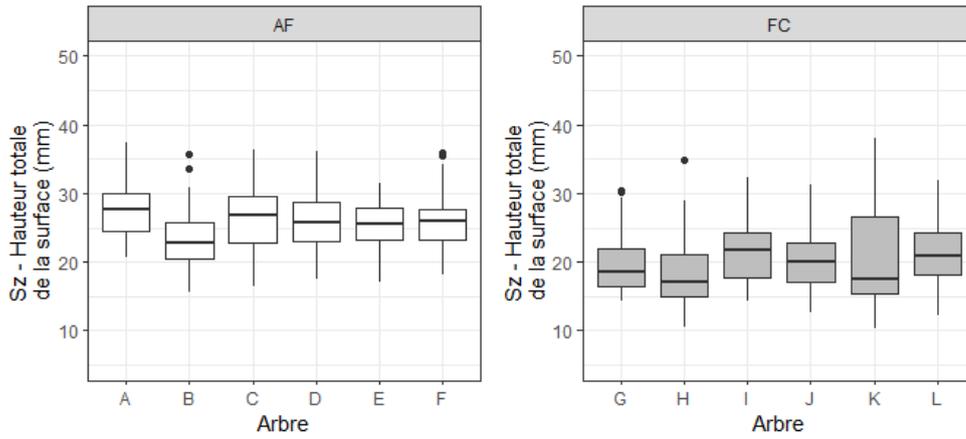


FIGURE 5.7 – Sz - Hauteur totale (mm) des placages par arbre en fonction de la parcelle.

### 5.4.2.3 Influence de la distance à la moelle

Une diminution des paramètres Sa et Sz est observée à mesure que l'on s'éloigne de la moelle. Cette diminution est visible dans les deux parcelles mais semble plus marquée pour les peupliers issus de la parcelle témoin (Figure 5.8 et Figure 5.9). Ainsi, les placages proches de la moelle présentent une ondulation moyenne Sa plus importante ainsi qu'une ondulation maximum plus élevée que les placages situés en périphérie du tronc.

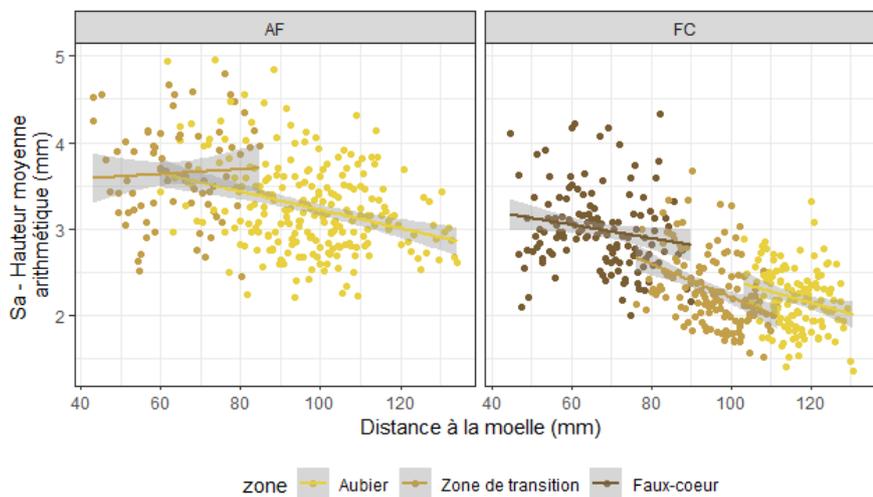


FIGURE 5.8 – Sa - Hauteur moyenne arithmétique (mm) des placages en fonction de leur position radiale dans le tronc

## 5.4. CARACTÉRISATION DE L'ONDULATION DES PLACAGES

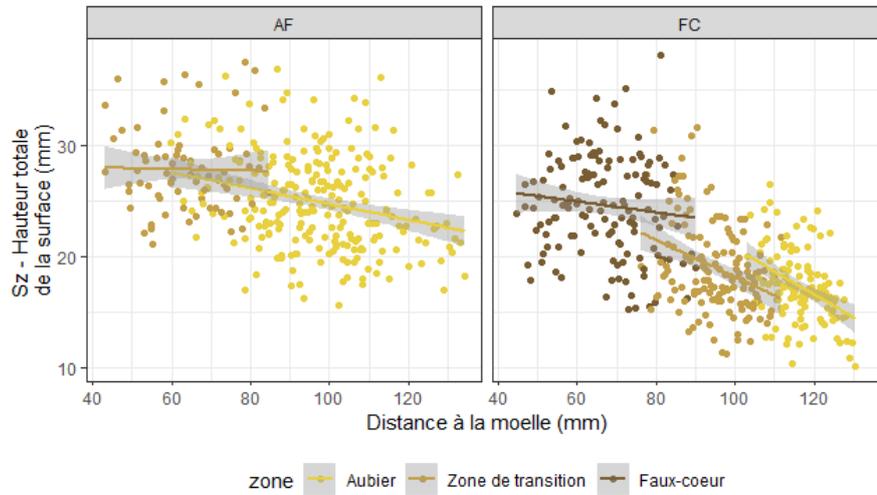


FIGURE 5.9 – Sz - Hauteur totale (mm) des placages en fonction de leur position radiale dans le tronc

### 5.4.2.4 Influence de la présence de faux-coeur

Le classement des placages dans une des trois zones du tronc (aubier, zone de transition, faux-coeur), a fait apparaître qu'aucun placage issu des peupliers agroforestiers n'était exclusivement composé de faux-coeur. Les placages AF étaient soit entièrement composés d'aubier (239 placages au total pour l'ensemble des peupliers AF), ou provenaient de la zone de transition entre aubier et faux-coeur (75 placages au total). Dans la parcelle FC en revanche, une grande surface du tronc des peupliers était constituée de faux-coeur. Au total dans la parcelle FC, 125 placages provenaient de la zone d'aubier, 144 de la zone de transition et 137 de la zone de faux-coeur.

Dans la parcelle AF, on remarque sur la figure 5.10 que les placages provenant la zone de transition ont une ondulation moyenne  $S_a$  ( $3.7 \pm 0.6$  mm) significativement supérieure à celle des placages situés dans la zone d'aubier ( $3.3 \pm 0.5$  mm) ( $p$ -value  $< 0.01$ ). Dans la parcelle FC, les placages de faux-coeur possèdent une ondulation moyenne ( $3.0 \pm 0.5$  mm) significativement plus élevée que celles des placages issus de la zone de transition ( $2.3 \pm 0.4$  mm) et de la zone d'aubier ( $2.2 \pm 0.4$  mm). Contrairement à la tendance observée dans la parcelle AF, les placages d'aubier et de la zone de transition présentent des hauteurs moyennes similaires ( $2.2 \pm 0.4$  mm et  $2.3 \pm 0.4$  mm respectivement,  $p$ -value = 0.79).

Dans le cas de l'ondulation maximale du placage (Sz) illustrée par la figure 5.11, on remarque à nouveau que les placages contenant tout ou en partie du faux-coeur ont une hauteur maximale supérieure à ceux constitués seulement d'aubier. Dans la parcelle agroforestière, la hauteur d'ondulation totale des placages d'aubier est en moyenne de  $24.9 \pm 4.2$  mm contre  $27.8 \pm 3.8$

#### 5.4. CARACTÉRISATION DE L'ONDULATION DES PLACAGES

mm pour les placages de la zone de transition. Dans la parcelle forestière témoin, les valeurs moyennes de l'ondulation maximum  $S_z$  des placages d'aubier, de la zone de transition et de faux-cœur sont respectivement de  $17.3 \pm 3.2$  mm,  $19.0 \pm 4$  mm et  $24.6 \pm 4.5$  mm. On notera que les valeurs moyennes de l'ondulation maximum des placages d'aubier agroforestiers sont statistiquement similaires à celles des placages de faux-cœur de la parcelle FC (p-value = 1).

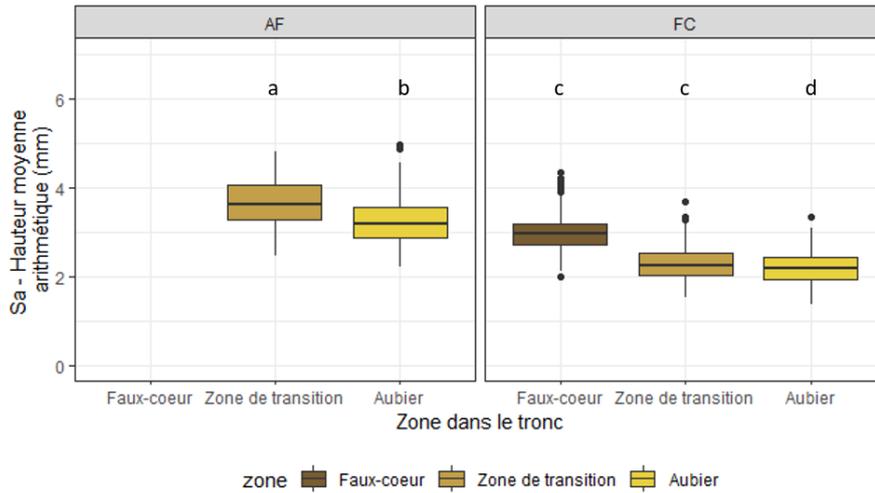


FIGURE 5.10 – Sa - Hauteur moyenne arithmétique (mm) des placages en fonction de leur position dans le tronc.

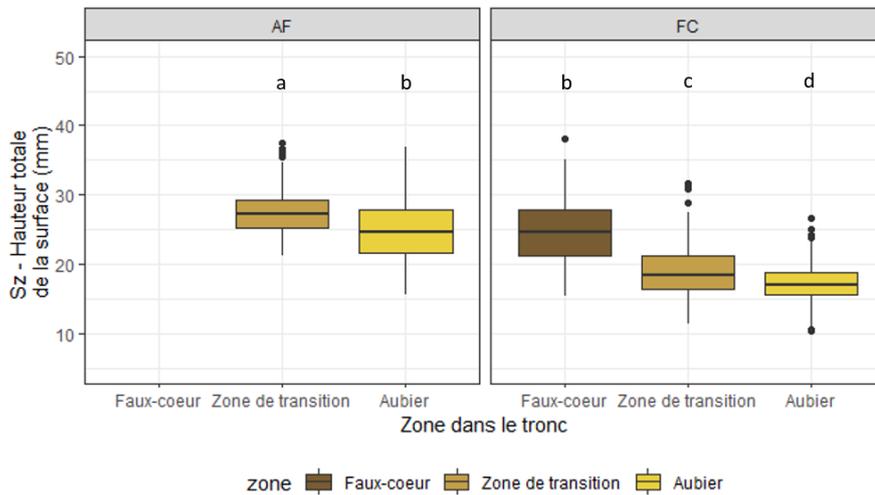


FIGURE 5.11 – Sz - Hauteur moyenne arithmétique (mm) des placages en fonction de leur position dans le tronc.

### 5.4.3 Discussion

Les trois facteurs que nous avons étudiés dans cette étude semblent affecter la planéité des placages analysés : le traitement agroforestier, la distance à la moelle du placage et la présence de faux-cœur. Les peupliers ayant poussé en conditions agroforestières possèdent des placages plus ondulés en moyenne que leurs témoins issus d'une plantation conventionnelle. De plus, les placages situés à proximité de la moelle sont, pour les deux traitements, plus ondulés en moyenne que les placages situés en périphérie du tronc. Enfin, il semblerait que la présence de faux-cœur dans le placage affecte négativement sa planéité, ce qui se traduit par une augmentation de  $S_a$  et  $S_z$ .

Les conditions de croissance dans la parcelle agroforestière sont à l'origine de nombreuses modifications des propriétés physiques, chimiques et mécaniques des peupliers qui s'y sont développés. Nous noterons par exemple des variations de l'angle des microfibrilles, de la masse volumique, de l'humidité dans le tronc et une rigidité plus importante. D'autres facteurs tels que la présence de bois juvénile, de bois de réaction ou de bois de flexion pourraient également expliquer ces différences d'ondulation entre les placages de la parcelle agroforestière et ceux de la parcelle forestière témoin. En effet, ces bois possèdent des propriétés différentes de celle du bois "normal" (voir leur description respective dans la synthèse bibliographique) qui pourraient entraîner une déformation des placages après le déroulage. GORNIK BUCAR et GOSPODARIC, 2016 ont observé dans leur étude portant sur la qualité des placages de hêtre (*Fagus sylvatica*) que la présence de bois de tension induisant un retrait axial (de 1.5%) et nettement plus important que celui du bois "normal" pouvait être responsable de l'ondulation des placages. De plus, l'ovalisation des billons issus du traitement agroforestier entraîne nécessairement plus de franchissements de zone de limites de cernes lors du déroulage dans un même placage. En augmentant les zones de transition par placage on maximise les chances de voir apparaître des ondulations après séchage du fait des retraits différenciés de ces zones.

De plus, la présence de faux-cœur, par sa forte teneur en humidité, peut entraîner de problèmes de séchage et l'apparition de défauts sur les placages (J. WANG et al., 1998 KOZLIK et al., 1972 ; H. A. SCHROEDER et KOZLIK, 1972). Nos résultats indiquent que sa présence pourrait également diminuer la qualité technologique des placages en augmentant leur ondulation. Il est à noter que dans la parcelle agroforestière, la proportion de faux-cœur des peupliers était nettement plus faible que dans la parcelle témoin, toutefois sans oublier que le peuplement AF est plus jeune que le peuplement FC. Il conviendrait de refaire un prélèvement de contrôle dans quelques années (5 ans) pour contrôler l'emprise du bois de faux-cœur à âge égal. Malgré cette faible présence de faux-cœur dans les placages AF, les paramètres d'ondulations  $S_a$  et  $S_z$  dans la zone d'aubier étaient similaires à ceux du faux-cœur des placages FC par exemple.

### 5.5 Synthèse

Cette dernière partie vient clôturer ce travail de thèse portant sur l'arbre agroforestier par l'évaluation de son aptitude à la transformation en vue d'une valorisation industrielle. Afin de répondre aux difficultés rencontrées par la filière populicole française présentées précédemment, nous avons choisi de porter notre étude sur l'évaluation de la qualité des produits issus de la transformation par déroulage de peupliers agroforestiers. Ce travail s'est réalisé en deux parties, la première en comparant les performances mécaniques de panneaux de LVL issus de peupliers agroforestiers à celles de peupliers témoins ayant poussé dans une plantation conventionnelle et la seconde en caractérisant les déformations des placages de ces mêmes arbres.

Les résultats obtenus sont prometteurs : les peupliers agroforestiers, bien que plus jeunes de 5 ans, présentent des propriétés mécaniques supérieures à celles des peupliers forestiers témoins, leur résistance et leur rigidité se rapprochant de celles déterminées par PAILLASSA et al., 2013 dans son étude des nouveaux cultivars de peuplier. Leur masse volumique, qui régit en grande partie les propriétés mécaniques du bois, est également plus élevée. De manière générale, une diminution du MOE, MOR, de la masse volumique et du SMOE est observée à mesure que l'on s'approche de la moelle, et ce pour les peupliers provenant des deux parcelles. Ces variations radiales sont cependant moins marquées chez les peupliers AF que chez les peupliers FC. Une analyse de l'angle des microfibrilles de cellulose des parois cellulaires laisse supposer que les peupliers forestiers témoins ont achevé la transition entre leur bois juvénile et leur bois mature, ce qui pourrait expliquer les fortes augmentations des propriétés mécaniques de la moelle à l'écorce. Chez les peupliers AF, cette transition juvénile ne semble pas terminée et nous estimons que les deux types de panneaux de LVL (Inner et Outer) agroforestiers étaient composés de placages de bois juvénile. Les différences d'AMF entre les deux parcelles pourraient ainsi expliquer en partie les différences observées entre les peupliers AF et leurs témoins FC. Le bois juvénile présentant des propriétés mécaniques généralement plus faibles que le bois mature, les valeurs de MOE, MOR et de masse volumique élevées chez les peupliers AF pourraient être expliquées par l'acclimatation des arbres agroforestiers à leur environnement plus venteux que celui rencontré dans les plantations conventionnelles de peupliers dans lesquelles la densité de plantation est plus élevée. Ces résultats viennent compléter ceux mis en lumière par les travaux de BONNESOEUR, 2016, ROIGNANT, 2018 et NIEZ, 2018 et témoignent du processus de thigmomorphogénèse mis en place par les arbres agroforestiers afin d'ajuster leur développement aux contraintes induites par les spatialisations particulières des systèmes agroforestiers. Cela se traduit ainsi par une modification de l'allocation de la biomasse diamétrale : les peupliers AF, âgés de 14 ans au moment de leur exploitation, possèdent un DBH moyen similaire à celui des peupliers FC, âgés de 19 ans ; mais également une modification de leur rigidité et de leur résistance, leur permettant ainsi de supporter des charges élevées induites par le vent. De plus, les différences chimiques

## 5.5. SYNTHÈSE

---

observées entre les peupliers AF et FC (voir partie 4.3), et la présence de bois de flexion chez les peupliers AF peuvent également expliquer les différences de propriétés et de comportement observées dans ce chapitre.

La seconde étude de ce chapitre portait sur la caractérisation de l'ondulation des placages issus de peupliers agroforestiers. Nos résultats indiquent que ces derniers possèdent une ondulation moyenne plus importante que les placages issus des peupliers témoins. La présence de faux-cœur et la proximité à la moelle sont responsables d'une diminution de la qualité des placages en augmentant leurs ondulations. Il est à noter toutefois que les placages situés dans l'aubier agroforestiers présentent une ondulation similaire à celle des placages de faux-cœur forestiers, la présence de faux-cœur ne peut donc à elle seule expliquer les déformations plus importantes chez les peupliers agroforestiers. La présence de bois aux caractéristiques anatomiques différentes du bois "normal", tels que le bois de flexion ou le bois juvénile pourraient expliquer ces différences mais même si les analyses NIRS du chapitre 4 ont montré des différences chimiques entre AF et FC, mais la validation de cette hypothèse nécessiterait une analyse anatomique du bois de ces arbres.

# Conclusions générales et perspectives

Ce travail de thèse financé par la Fondation de France s'inscrit dans la démarche d'évolution de l'agriculture en zone tempérée vers des pratiques agroécologiques, alliant augmentation de production de biomasse et respect de l'environnement. Cette dynamique conduit à la réapparition de pratiques agricoles qui avaient été oubliées lors de l'intensification de l'agriculture au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, telle que l'agroforesterie, dont le principe consiste à associer sur une même parcelle agricole une composante agricole (des cultures et/ou du bétail) à une composante ligneuse. Les bénéfices de cette association sont nombreux et la réimplantation de ces systèmes agricoles se fait petit à petit depuis quelques dizaines d'années, notamment en Europe. Les conditions de croissances dans lesquels évoluent les arbres agroforestiers sont très distinctes de celles prévalant dans les systèmes forestiers conventionnels, et influencent leur développement. Peu d'études ont été menées à ce jour sur le développement de l'arbre en milieu agroforestier ; les travaux de recherches étant principalement portés sur la composante agricole intercalaire de ces systèmes. Ce travail, réalisé avec la collaboration de trois laboratoires (le LaBoMaP, le PIAF et BioWooEB), avait pour objectif d'identifier les modifications induites par les conditions de croissance des systèmes agroforestiers sur le développement de l'arbre, à la fois au niveau de sa croissance et de l'allocation de sa biomasse mais également à l'échelle de son bois et des propriétés physiques et chimiques pouvant impacter ses qualités technologiques finales. Il contribue plus globalement au projet de valorisation de la biomasse ligneuse agroforestière et à la volonté d'intégrer les bois issus de systèmes agroforestiers dans la filière bois. Trois essences feuillues ont été aux centre des travaux menés au cours de cette thèse : le peuplier (Koster), le noyer hybride et le robinier ; toutes trois adaptées à une utilisation en agroforesterie et pourvoyeuses chacune de bois pour des usages très différents dans la filière bois.

Les recherches menées dans un premier temps ont consisté à identifier des dispositifs expérimentaux composés de parcelles agroforestières et forestières témoins permettant un comparatif de la croissance et des propriétés du bois d'arbres issus de deux traitements sylvicoles différents mais ayant évolué dans des environnements proches. Ce travail a mis en lumière la difficulté de

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

---

trouver de tels dispositifs en France, notamment en raison de l'intérêt encore très récent pour l'agroforesterie dans le milieu de la recherche. Trois dispositifs ont été sélectionnés : les dispositifs scientifiques RAP et DIAMs dans le sud de la France, et d'un dispositif d'un populteur privé à Lent, dans l'Ain. L'ensemble des expérimentations ont été menées sur ces trois dispositifs afin de répondre aux problématiques identifiées.

Le travail portant sur la croissance des arbres en milieux agroforestiers a mis en évidence une croissance radiale plus importante chez les trois essences, en comparaison de leur témoins forestiers. Des travaux ont récemment montré que les arbres, dans le but de s'acclimater aux perturbations mécaniques qu'ils subissent, forment un tronc au diamètre plus large, ovalisé dans la direction des sollicitations (BONNESOEUR, 2016; NIEZ, 2018; ROIGNANT, 2018). Ce processus, connu sous le nom de thigmomorphogénèse, joue un rôle majeur dans la croissance de l'arbre qui ajuste son développement aux sollicitations mécaniques quotidiennes qu'il subit, comme celles induites par le vent dans les milieux ayant des densités de plantations réduites. Ce phénomène se traduit généralement par une augmentation de la croissance radiale couplée à une réduction de la croissance en hauteur. Cependant, les observations faites sur les hauteurs des arbres agroforestiers et forestiers divergent d'une essence à l'autre. Dans le cas des noyers, la hauteur moyenne des arbres agroforestiers s'est révélée supérieure à celle des forestiers mais avec une forte variabilité liée à des disparités entre les sols et l'accès à l'eau des deux parcelles. Les peupliers de la parcelle agroforestière sont eux moins hauts que les témoins forestiers mais ce résultat est à prendre avec précaution et vu la faible différence, elle n'est imputable qu'à la différence d'âge des deux peuplements. Enfin, dans le cas des robiniers, les arbres agroforestiers présentent des hauteurs similaires ou parfois légèrement inférieures aux robiniers forestiers mais les mesures peuvent être entachées par une opération de taille des arbres qui a eu lieu pendant notre étude. Les arbres agroforestiers modifient donc l'allocation de leur biomasse dans le tronc ce qui se traduit principalement par une croissance radiale plus forte et donc un diamètre de tige plus important. Avec la volonté d'augmenter la production de biomasse de qualité produite à l'hectare dans les systèmes agroforestiers, ces résultats sont particulièrement encourageants.

Les modulations thigmomorphogénétiques induites sur les arbres agroforestiers, donc plus fortement sollicités mécaniquement, impliquent aussi des modifications à l'échelle du bois dont l'analyse a été au coeur du chapitre 4 de cette thèse. La première partie du chapitre 4 s'est principalement concentrée sur la composition biochimique du bois des arbres agroforestiers et forestiers, notamment sur la teneur en extractibles et en composés macro-moléculaires structuraux (i.e. la lignine et la cellulose). Les deux premières études ont porté sur l'analyse du bois de noyer en tant que ressource riche en différents composés chimiques. La première visait à améliorer nos connaissances sur les teneurs en composés extractibles provenant des fractions de bois issus de branches, de nœuds et d'écorce de noyer, récoltés dans des systèmes d'agroforesterie (AF) et de contrôle forestier traditionnel (FC) en vue d'une valorisation de la ressource

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

---

raméale agroforestière. L'identification de la composition des molécules extraites successivement à l'éthanol puis à l'eau a été réalisée par des analyses LC-MS. Afin de développer un outil rapide permettant de distinguer le bois issus des branches, des nœuds et de l'écorce de noyer provenant d'arbres cultivés dans des dispositifs agroforestiers ou plus conventionnels, l'ensemble des échantillons ont été analysés par spectroscopie proche infrarouge (NIR). Des différences ont été identifiées entre les teneurs en extractibles et les compositions chimiques entre les différents bois provenant des branches, des nœuds et de l'écorce pour les deux systèmes sylvicoles. Ce travail a fait l'objet d'une publication parue dans la revue *IForest* (HEIM, DODELER et al., 2022). Une deuxième étude a ensuite été conduite sur le bois du tronc des mêmes noyers. À nouveau des analyses de la teneur en extractibles ont été réalisées par extractions successives à l'éthanol puis à l'eau. Si la teneur en composés extractibles du bois des noyers ne diffère pas ni en fonction de sa position radiale dans le tronc, ni en fonction du traitement sylvicole, l'analyse de chacun des échantillons par spectroscopie NIR et imagerie hyperspectrale NIR a mené à nouveau au développement de modèles statistiques discriminants permettant de classer les échantillons issus des deux systèmes sylvicoles en fonction de leur composition chimique. Les résultats ont notamment mis en évidence des différences de composition chimique entre les noyers agroforestiers et forestiers. La nature des extractibles n'est pas identique entre les deux populations, et des différences significatives en terme de quantité de lignine ont été observées, avec un taux de lignine plus élevé dans la parcelle agroforestière comparé à celui des bois du témoin forestier. Ces travaux de recherche ont été valorisés dans un article scientifique publié dans la revue *Holzforschung* (HEIM, BRANCHERIAU, MARCHAL, BOUTAHAR et al., 2022). Enfin, la dernière étude consacrée à la composition chimique des bois agroforestiers a été menée sur le peuplier. Des analyses réalisées par imagerie hyperspectrale NIR sur des disques prélevés dans le tronc des peupliers agroforestiers et forestiers ont également révélé des différences de quantité de lignine dans le tronc entre les peupliers agroforestiers et forestiers, avec des taux de lignine moins importants dans la parcelle agroforestière assimilés à la présence plus importante de bois de flexion chez les peupliers agroforestiers. La formation du bois de flexion, éléments de stratégie d'acclimatation de l'arbre aux sollicitations mécaniques causées par une forte exposition au vent dans la parcelle AF. Les résultats de ce travail font l'objet d'un troisième article scientifique publié dans la revue *Agroforestry Systems* (HEIM et al., 2023).

Les analyses comparatives des propriétés physiques des peupliers AF et FC ont ensuite été conduites sur différentes propriétés identifiées comme influentes dans la qualité technologique et mécanique de leur bois en vue d'une valorisation dans la filière industrielle bois : le taux d'humidité dans le tronc, la densité du bois et l'angle des microfibrilles de cellulose. Il a été mis en évidence que les peupliers AF présentent des taux d'humidité moyens et une proportion de bois de faux-cœur plus faibles que pour les peupliers témoins. Par contre, l'analyse de la densité moyenne du bois de peupliers, en collaboration avec la plateforme Sylvatech de l'INRAE

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

---

de Nancy, n'a pas révélé de différences significatives entre les deux traitements sylvicoles. Ces résultats sont particulièrement intéressants car ils démontrent dans le cas des arbres AF, une proportion plus importante de bois "blanc" à diamètre égal, bois très prisé des secteurs de l'emballage ou du contreplaqué pour des masses volumiques comparables.

Enfin, la qualité du bois de peuplier agroforestier a été évaluée en vue d'une valorisation dans la filière des produits techniques bois. Les peupliers AF et FC ont été déroulés et des panneaux de LVL ont été réalisés. Les propriétés mécaniques des LVL ont été caractérisées et comparées en fonction du traitement sylvicole et de l'emplacement du panneau dans le tronc. Les résultats obtenus, mis en relation avec certaines propriétés physiques du bois telles que l'angle des microfibrilles des parois cellulaires et la densité du bois, ont montré que les LVL confectionnés à partir des peupliers AF possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles des LVL confectionnés à partir des peupliers FC. Ces modifications de propriétés des peupliers agroforestiers résultent probablement de la réponse thigmomorphogénétique d'acclimatation des tiges aux nombreuses flexions induites par le vent au cours de leur développement. Ces résultats sont encourageants et permettent d'envisager l'intégration aisée du bois des peupliers Kusters agroforestiers à la filière bois. Ils seront valorisés sous la forme d'un article scientifique joint au mémoire.

La caractérisation de l'ondulation des placages issus de peupliers agroforestiers en comparaison à celles des placages forestiers indique que ces derniers possèdent une ondulation moyenne plus importante que les placages témoins. Les résultats indiquent notamment que la présence de faux-cœur et la proximité à la moelle sont responsables d'une diminution de la qualité des placages en augmentant leurs ondulations. Les placages AF les plus éloignés de la moelle présentent des ondulations similaires aux placages FC situés proches de la moelle, indiquant ainsi que la présence de faux-cœur n'explique pas à elle seule les ondulations plus importantes des placages de peupliers AF. La présence de bois de flexion ou de bois juvénile est une hypothèse qui pourrait expliquer ces différences mais elle doit être complétée par une analyse anatomique du bois des arbres permettant de confirmer la présence de ces derniers.

Ce travail de doctorat apporte un corpus de connaissances nouvelles et contribue à une meilleure compréhension du développement des arbres en milieu agroforestier et de l'influence des conditions de croissance sur les propriétés de leur bois. Les résultats obtenus sont prometteurs et permettent une première approche en terme de voie de valorisation des arbres agroforestiers au sein de la filière bois. Ils démontrent que les bois agroforestiers ne présentent pas de différences pénalisantes par rapport à leur homologues forestiers ou issus de plantation ce qui rend optimiste sur leur aptitude à être intégré dans la filière bois. Ils devront cependant être complétés par d'autres analyses permettant d'évaluer d'autres qualités des bois issus de systèmes agroforestiers.

Les arbres des trois dispositifs au cœur des différentes études qui ont été menées sont encore

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

---

jeunes, ce qui rend possible la poursuite du suivi de leur développement jusqu'à leur exploitation. Cela permettrait notamment d'aborder certains aspects qui n'ont pas pu l'être pendant cette thèse. La qualité esthétique du bois de noyer à travers sa couleur n'a pas été évaluée dans ce travail mais pourrait être envisagée, à travers l'analyse des mécanismes mis en place par l'arbre agroforestier dans le processus de duraminisation. Chez la majorité des noyers de Restinclières échantillonnés, l'initiation de ce processus n'était pas visible, et aucune démarcation visuelle d'une zone de duramen plus foncée dans le tronc n'avait été identifiée. Il serait pertinent de suivre, à l'aide de carottage dans le tronc par exemple, si la duraminisation des noyers débute au même âge dans les parcelles agroforestière et forestière. Des analyses colorimétriques pourraient également être menées à terme, afin de différencier la couleur, et donc la qualité esthétique, du bois de noyers issus de systèmes agroforestiers. Enfin, dans le cadre d'une utilisation dans l'ameublement et le domaine de l'ébénisterie, il serait pertinent de réaliser une caractérisation de l'ondulation des placages issus des noyers agroforestiers.

Dans le cas du robinier, le comparatif de la croissance radiale et en hauteur des robiniers pourrait aussi être poursuivi jusqu'à l'exploitation des arbres. Il permettrait de consolider les premières tendances que nous avons mises en évidence sur l'acclimatation de l'arbre agroforestier aux milieux venteux au fil de son développement. Cela pourrait également confirmer l'aptitude du robinier à une utilisation en agroforesterie.

Enfin, l'étude qualitative menée sur le peuplier pourrait être complétée par une caractérisation plus fine du comportement mécanique des panneaux de LVL issus de ces peupliers agroforestiers et sur l'analyse du comportement de leurs placages au collage. La qualité finale des produits techniques bois (ici le LVL) n'a pas non plus été évaluée ici. En complément, le travail pourrait être étendu à d'autres types de valorisations comme la transformation des placages en produits d'emballages légers par exemple, dont l'utilisation, notamment dans l'industrie agro-alimentaire, est une alternative aux produits issus de l'industrie pétrochimique. Enfin, l'aptitude à la transformation du bois de peupliers agroforestiers par sciage serait pertinente à caractériser en vue d'une utilisation pour le marché de la construction mais nécessiterait pour cela d'importantes campagnes de caractérisations mécaniques.

Plus généralement, le travail réalisé au cours de cette thèse sur le peuplier Koster pourrait être étendu à d'autres cultivars ; ce qui permettrait d'élargir les connaissances sur l'adaptation du peuplier dans des parcelles hors fond de vallée et d'envisager l'intégration de cultivars variés dans les dispositifs agroforestiers en couvrant un panel d'écosystèmes le plus large possible. Enfin, l'étude du processus de thigmomorphogénèse en milieu agroforestier et l'influence de l'action du vent sur la formation du bois pourrait être élargie à d'autres propriétés du bois fortement corrélées à ses propriétés mécaniques telles que la pente de fil et sa variation radiale dans le tronc. Elle pourrait être menée au LABOMAP, qui a développé sur sa dérouleuse instrumentée un dispositif original, le LOOBAR, qui permet de constituer une cartographie précise de l'orientation

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

---

locale des fibres pour chacun des placages, immédiatement sur la ligne de déroulage.

Enfin, dans le but d'intégrer les produits ligneux agroforestiers à la filière bois, ce travail pourrait encourager et participer à la mise en place de systèmes de valorisation des arbres agroforestiers à l'échelle locale. Les surfaces occupées par les systèmes agroforestiers bien qu'encore faibles et clairsemées au niveau du territoire français sont appelées à se démultiplier dans les années à venir avec l'avènement d'une nouvelle agriculture agroécologique à large échelle en réponse aux dérèglements climatiques et environnementaux. Au moment de la récolte des arbres, la faible quantité de bois à l'échelle d'une seule exploitation agricole peut constituer un frein pour les membres de la filière qui y verraient un manque à gagner en terme de rendement, en comparaison aux volumes de bois produits beaucoup plus importants dans les systèmes forestiers conventionnels. En ayant connaissance de la qualité du bois des arbres qu'ils ont cultivés au sein de leurs parcelles agricoles et des possibilités de valorisation qui s'offrent à eux, les agriculteurs pourraient envisager la création de coopératives de déroulage à l'échelle locale ou l'acquisition de scie mobile, participant ainsi au développement d'une économie circulaire locale plus que nécessaire dans le contexte actuel des changements climatiques.

# Bibliographie

- ABGRALL, C. (2019). *Réponse de la flore, de la faune du sol et de leur substrat à l'introduction d'espèces exotiques envahissantes végétales*. (thèse de doct.). Université de Normandie.
- ALOU, F., AYADI, N., CHARRIER, F., & CHARRIER, B. (2004). Durability of european oak (quercus petraea and quercus robur) against white rot fungi (coriolus versicolor) : relations with phenol extractives. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62(4), 286-290. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0489-7>
- AMUSANT, N., MORETTI, C., RICHARD, B., PROST, E., NUZILLARD, J. M., & THÉVENON, M. F. (2007). Chemical compounds from eperua falcata and eperua grandiflora heartwood and their biological activities against wood destroying fungus (coriolus versicolor). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(1), 23-28. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0120-1>
- ANDERSON, L., & S. SINCLAIR, S. (1993). Ecological interactions in agroforestry systems.
- ANSELME, B. (2012). *Sciences de la nature*.
- ANTEN, N. P. R., ALCALÁ-HERRERA, R., SCHIEVING, F., & ONODA, Y. (2010). Wind and mechanical stimuli differentially affect leaf traits in *Plantago major*. *New Phytologist*, 188(2), 554-564. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03379.x>
- AUSSENAC, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate : Ecophysiological aspects and consequences for silviculture [Publisher : Springer Nature (since 2011)/EDP Science (until 2010)]. *Annals of Forest Science*, 57(3), 287-301. <https://doi.org/10.1051/forest:2000119>
- BADEL, E., BASTIEN, C., BAUBET, O., BERTHELOT, A., BOUTTE, B., CHAZALLON, G., COCHARD, H., FABRE, B., FICHOT, R., FRANCOIS, D., GOBIN, R., HAVARD, M., HERBETTE, S., de LAGAUSIE, O., LEGRAND, G., MARCHAL, R., MARRON, N., MONTAGNE, E., MOURLAN, B., ... VILLAR, M. (2021). *26e Session de la CIP - Activités liées à la culture et à l'utilisation des peupliers, des saules et d'autres arbres à croissance rapide (2016-2019)*. <https://hal.inrae.fr/hal-03545811>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- BALANDIER, P., ALLÉGRINI, C., EFNO, C. N. S. V., JAY, D., BESANCON, C. F. C., & LEMPDES, C. A. (2008). *Des réactions similaires à l'accompagnement ligneux pour le frêne et le noyer hybride*.
- BALANDIER, P., & DUPRAZ, C. (1998). Growth of widely spaced trees. a case study from young agroforestry plantations in france. *Agroforestry Systems*, 43(1), 151. <https://doi.org/10.1023/A:1026480028915>
- BALANDIER, P., PRÉVOSTO, B., & GUITTON, J. L. (2005). Forest restoration in the french massif central mountains. In *Restoration of boreal and temperate forests* (p. 355-369). CRC Press. <https://hal.inrae.fr/hal-02583806>
- BALNY, P., DOMALLAIN, D., & DE GALBERT, M. (2015). *Propositions pour un plan d'actions en faveur de l'arbre et de la haie associés aux productions agricoles*. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.
- BAO, F., JIANG, Z., JIANG, X., LU, X., LUO, X., & ZHANG, S. (2001). Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology*, 35, 363-375. <https://doi.org/10.1007/s002260100099>
- BARNETT, J. R., & BONHAM, V. A. (2004). Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews*, 79(2), 461-472. <https://doi.org/10.1017/S1464793103006377>
- BARR, C., & GILLESPIE, M. (2000). Estimating hedgerow length and pattern characteristics in great britain using countryside survey data. *Journal of Environmental Management*, 60(1), 23-32. <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0359>
- BASTIEN, C., BOUILLON, P., PAILLASSA, E., NAUDIN, E., MOURLAN, B., BERTHELOT, A., FABRE, B., & BAUBET, O. (2015). Commission nationale du peuplier de France Période 2012 – 2015, 31.
- BAZIN, P., & SCHMUTZ, T. (1994). La mise en place de nos bocages en europe et leur déclin. *Revue Forestière Française*, 115. <https://doi.org/10.4267/2042/26606>
- BECQUEY, J. (1997). *Les noyers à bois* (Institut pour le développement forestier).
- BECQUEY, J. (2008). Pour alléger le suivi des plantations : le mélange avec des essences secondaires. *Revue Forestière Française*, (2). <https://doi.org/10.4267/2042/18153>
- BERITOGNOLO, I. (2001, janvier). *Caractérisation moléculaire et biochimique de la formation du bois de coeur chez le noyer noir (Juglans nigra L.) : accumulation des flavonoïdes et expression des gènes contrôlant leur biosynthèse* (Theses) [Issue : 2001NAN10260]. Université Henri Poincaré - Nancy 1. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754334>
- BERTHELOT, A., REULING, D., ROBERT, G., BOUVET, A., LANVIN, J., LEGRAND, G., MOREAU, J., DENAUD, L., & PAILLASSA, E. (2013a). Qualité du bois des nouveaux cultivars de peuplier.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- BERTHELOT, A., REULING, D., ROBERT, G., BOUVET, A., LANVIN, J., LEGRAND, G., MOREAU, J., DENAUD, L., & PAILLASSA, E. (2013b). *Qualités du bois des nouveaux cultivars de peuplier*. IDF, FCBA, Arts et Métiers Cluny.
- BERTHELOT, A., CAILLY, P., & BOUVET, A. (2019). Densité de plantation en peupleraie : quelle influence sur la production en volume et les volumes unitaires ? *FCBA Info*. <https://www.fcba.fr/wp-content/uploads/2020/10/fcbainfo-2019-19-densite-plantation-peupleraie-production-volume-unitaires-berthelot-cailly-bouvet.pdf>
- BONNESOEUR, V. (2016, mai 18). *Acclimatation des arbres forestiers au vent : de la perception du vent à ses conséquences sur la croissance et le dimensionnement des tiges*. (These de doctorat). Paris, AgroParisTech. <https://www.theses.fr/2016AGPT0023>
- BONNESOEUR, V., CONSTANT, T., MOULIA, B., & FOURNIER, M. (2016). Forest trees filter chronic wind-signals to acclimate to high winds [Publisher : Wiley]. *New Phytologist*, *210*(3), 850-860. <https://doi.org/10.1111/nph.13836>
- BROSSE, J. (2000). *Larousse des arbres et des arbustes* (Ed. Larousse). [http://bibliotheque.bordeaux.fr/in/faces/details.xhtml?id=mgroup%3Ap+unimarcbu\\_428425](http://bibliotheque.bordeaux.fr/in/faces/details.xhtml?id=mgroup%3Ap+unimarcbu_428425)
- BURDURLU, E., KILIC, M., ILCE, A. C., & UZUNKAVAK, O. (2007). The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*fagus orientalis* l.) and lombardy poplar (*populus nigra* l.) *Construction and Building Materials*, *21*(8), 1720-1725. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.05.002>
- BURGERS, A. (2016, décembre 2). *Caractérisations physico-mécaniques de bois "sans défauts" pour la conception mécanique : application aux pins de la région méditerranéenne française* (These de doctorat). Montpellier. <https://www.theses.fr/2016MONT014>
- BUTTERFIELD, R., CROOK, R., ADAMS, R., & MORRIS, R. (1993). Radial Variation in Wood Specific Gravity, Fibre Length and Vessel Area for Two Central American Hardwoods : *Hyeronima Alchorneoides* and *Vochysia Guatemalensis* : Natural and Plantation-Grown Trees. *IAWA Journal*, *14*(2), 153-161. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001310>
- CABANETTES, A., AUCLAIR, D., & IMAM, W. (1998). Diameter and height growth curves for widely-spaced trees in European agroforestry. *Agroforestry Systems*, *43*. <https://doi.org/10.1023/A:1026440329824>
- CAQUET, T., ALAPHILIPPE, A., BERTRAND, I., CHARRU, M., DECONCHAT, M., DESCLAUX, D., DEYTIEUX, V., GASCUEL, C., GINANE, C., GOUIS, J. L., MARRON, N., MÉZIÈRE, D., MOULIA, B., NOVAK, S., PICON-COCHARD, C., SAVOIE, A., STOKES, A., JULIE, S., THENAIL, C., & VIAUD, V. (2020, octobre). *Chantier Agroforesterie - Rapport de synthèse* (report). INRAE. <https://hal.inrae.fr/hal-03224593>
- CARDINAEL, R., CHEVALLIER, T., CAMBOU, A., BÉRAL, C., BARTHÈS, B. G., DUPRAZ, C., DURAND, C., KOUAKOUA, E., & CHENU, C. (2017). Increased soil organic carbon stocks

## BIBLIOGRAPHIE

---

- under agroforestry : a survey of six different sites in france. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 243-255. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>
- CARDINAEL, R., MAO, Z., PRIETO, I., STOKES, A., DUPRAZ, C., KIM, J., & JOURDAN, C. (2015). Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. *Plant and Soil*, 391, 219-235. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2422-8>
- CARTER, C. J. (1945). Wetwood of elms [Publisher : Champaign : Illinois Natural History Survey]. *Illinois Natural History Survey Bulletin ; v. 023, no. 04*. <https://hdl.handle.net/2142/44841>
- CERRE, J.-C., GÉRARD, J., GUIBAL, D., & PARADIS, S. (2017, novembre 30). *Tropical Timber Atlas : Technological characteristics and uses* (Quæ) [Google-Books-ID : OthBDwAAQ-BAJ]. Quæ.
- CHAHAL, D., AHMAD, A., & BHATIA, J. N. (2012). Assessment of agroforestry based two-tier cropping system in ambala district of haryana. *Agriculture Update 7 (3/4) : 210-213*.
- CLAIR, B., & THIBAUT, B. (2014). Physical and mechanical properties of reaction wood [Series Title : Springer Series in Wood Science]. In *The biology of reaction wood* (p. 171-200). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10814-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10814-3_6)
- CNP. (2018). *Les cultivars de peupliers - Peupliers de France*. <https://www.peupliersdefrance.org/n/les-cultivars-de-peupliers/n:1152#p2517>
- CODIFAB. (2016). *Sécurisation des approvisionnements en Peuplier (mis à jour 2019)*. <https://www.codifab.fr/actions-collectives/securisation-des-approvisionnement-en-peuplier-1636>
- COELLO, J., BECQUEY, J., GONIN, P., ORTISSET, J., BAIGES, T., & PIQUE, M. (2008). Le noyer hybride (*Juglans x intermedia*) et le noyer commun (*J. regia*) à bois.
- COUTAND, C. (2010). Mechanosensing and thigmomorphogenesis, a physiological and biomechanical point of view. *Plant Science*, 179(3), 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.05.001>
- COUTAND, C., DUPRAZ, C., JAOUEN, G., PLOQUIN, S., & ADAM, B. (2008). Mechanical stimuli regulate the allocation of biomass in trees : demonstration with young *Prunus avium* trees. *Annals of Botany*, 101(9), 1421-1432. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn054>
- COUTAND, C., MARTIN, L., LEBLANC-FOURNIER, N., DECOURTEIX, M., JULIEN, J.-L., & MOULIA, B. (2009). Strain mechanosensing quantitatively controls diameter growth and *PtaZFP2* gene expression in poplar. *Plant Physiology*, 151(1), 223-232. <https://doi.org/10.1104/pp.109.138164>
- CRAAQ. (2020, mars 23). *L'agroforesterie au Bénéfice du Microclimat : Un Atout Face aux Changements Climatiques*. Available%20online:%20<https://www.craaq.qc.ca/publicationsweb/PAGF0103-HTML/index.html>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- CRPF. (2016, septembre). *Le peuplier - un feuillu performant cultivé en Rhône-Alpes*. Centre Régional de la Propriété Forestière Rhône-Alpe. [https://pefcaura.com/sites/default/files/prgm-accompagnement/exe\\_fiche\\_essence\\_peuplier\\_09\\_2016\\_v2\\_1-1.pdf](https://pefcaura.com/sites/default/files/prgm-accompagnement/exe_fiche_essence_peuplier_09_2016_v2_1-1.pdf)
- CUTTER, B., & GARRETT, H. (1993). Wood quality in alleycropped eastern black walnut. *Agroforestry Systems*, 22, 25-32. <https://doi.org/10.1007/BF00707467>
- DÉJARDIN, A., LAURANS, F., ARNAUD, D., BRETON, C., PILATE, G., & LEPLÉ, J.-C. (2010). Wood formation in Angiosperms. *Comptes Rendus Biologies*, 333(4), 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.01.010>
- den HERDER, M., MORENO, G., MOSQUERA-LOSADA, R. M., PALMA, J. H. N., SIDIROPOULOU, A., SANTIAGO FREIJANES, J. J., CROUS-DURAN, J., PAULO, J. A., TOMÉ, M., PANTERA, A., PAPANASTASIS, V. P., MANTZANAS, K., PACHANA, P., PAPADOPOULOS, A., PLIENINGER, T., & BURGESS, P. J. (2017). Current extent and stratification of agroforestry in the european union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.005>
- DROUILLAT, M., SOTTEAU, C., & STROSSER, P. (2021). *Evaluation du plan de gestion de l'agroforesterie 2015 - 2020 - Rapport final*. ACTeon Environnement.
- DUFOUR, L., METAY, A., TALBOT, G., & DUPRAZ, C. (2013). Assessing light competition for cereal production in temperate agroforestry systems using experimentation and crop modelling. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(3), 217-227. <https://doi.org/10.1111/jac.12008>
- DUPRAZ, C., & CAPILLON, A. (2005). L'agroforesterie : une voie de diversification écologique de l'agriculture européenne? *Cahier d'étude DEMETER*, 11.
- DUPRAZ, C., DAUZAT, M., GIRARDIN, N., & OLIVIER, A. (1995). Root extension of young wide-spaced wild cherry trees in an agroforest as deduced from the water budget, 46-50.
- DUPRAZ, C., DUFOUR, L., & GARY, C. (2019). RAP! the restinclières agroforestry platform.
- DUPRAZ, C., & LIAGRE, F. (2008). *Agroforesterie : des arbres et des cultures* [Google-Books-ID : Xns4ZxvFtMIC]. France Agricole Editions.
- DUPRAZ, C., LIAGRE, F., & BORRELL, T. (2005). Economics of silvoarable systems using the Land Equivalent Ratio concept. *Silvoarable Agroforestry For Europe (SAFE) final Report*.
- EFHAMI SISI, D., KARIMI, A., POURTAHMASI, K., TAGHIYARI, H. R., & ASADI, F. (2010). The Effects of Agroforestry practices on vessel properties in *Populus Nigra* var. *Betulifolia*. *IAWA Journal*, 31(4), 481-487. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000037>
- ERDIL, Y. Z., KASAL, A., ZHANG, J., EFE, H., & DIZEL, T. (2009). Comparison of mechanical properties of solid wood and laminated veneer lumber fabricated from Turkish beech, Scotch pine, and Lombardy poplar. *Forest products journal*.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ETHERIDGE, D. E., & MORIN, L. A. (1962). Wetwood formation in balsam fir [Publisher : NRC Research Press]. *Canadian Journal of Botany*, 40(10), 1335-1345. <https://doi.org/10.1139/b62-127>
- EVANS, R., & ILIC, J. (2001). Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *Forest Products Journal*, 51, 53-57.
- FAO. (2019). The state of the world's biodiversity for food and agriculture, 576.
- FEDERATION OF THE FINNISH WOODWORKING INDUSTRIES (Éd.). (2019). *LVL handbook europe*. Federation of the Finnish Woodworking Industries.
- FENGEL, D., & WEGENER, G. (Éd.). (1983, décembre 31). *Wood : Chemistry, ultrastructure, reactions*. DE GRUYTER. <https://doi.org/10.1515/9783110839654>
- FOREST, M., NGAO, J. J., PITON, G., DUGUÉ, R., ARNAL, D., HEDDE, M., MARSDEN, C., IANNELLI, M., TASCHEN, E., MARTIN-BLANGY, S., JOURDAN, C., DUTHOIT, M., ROCHETEAU, A., & BERTRAND, I. I. (2022). How to study crop and herbaceous vegetation phenology in an agroforestry system ?
- FOURBISSEUR, A., DEVILLET, S., JOUREZ, B., & HEBERT, J. (2003). Le Robinier faux-acacia en Wallonie : utopie ou réalité? Premiers résultats. *Forêt.Nature*, (67).
- FOURNIER, M., DLOUHÁ, J., JAOUEN, G., & ALMERAS, T. (2013). Integrative biomechanics for tree ecology : beyond wood density and strength. *Journal of Experimental Botany*, 64(15), 4793-4815. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert279>
- GABORIK, J., & KACEROVA, K. (2007). Bending properties of laminated wood from juvenile poplar, 233-240.
- GARRETT, L. K. (2007). *Get ready for biology*. Pearson/Benjamin Cummings.
- GERHARDS, C. C. (1982). Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber Science*, 14(1), 4-36.
- GIANNINI, R., & MERCURIO, R. (1997). *Il noce comune per la produzione legnosa*.
- GIERLINGER, N., JACQUES, D., GRABNER, M., WIMMER, R., SCHWANNINGER, M., ROZENBERG, P., & PÂQUES, L. E. (2004). Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. *Trees*, 18(1), 102-108. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0290-y>
- GIET, A., & GEMINARD, L. (1997). *Résistance des matériaux* (5ème édition edn. Dunod, T. vol Tome 1.).
- GIRARDON, S., DENAUD, L., POT, G., & RAHAYU, I. (2016). Modelling the effects of wood cambial age on the effective modulus of elasticity of poplar laminated veneer lumber. *Annals of Forest Science*, 73(3), 615-624. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0569-y>
- GORNIK BUCAR, D., & GOSPODARIC, B. (2016). Waviness of beech sliced veneer. *Acta Silvae et Ligni*, 110, 3-13. <https://doi.org/DOI10.20315/ASetL.110>.
- GROSSER, D. (1977). *Die holzer mitteleuropas : Ein mikrophotographischer lehratlas*. (Springer).

## BIBLIOGRAPHIE

---

- GUILLOU, M., GUYOMARD, H., HUYGUE, C., & PEYRAUD, J.-L. (2013). *Le projet agro-écologique : Vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement, Propositions pour le Ministre*. INRA, Agreenium.
- GUITARD, D. (1987). *MÉCANIQUE DU MATÉRIAU BOIS & COMPOSITES*, Guitard D., Editions Cépaduès. Cepadues.
- GUITARD, D., & FOURNIER, M. (1994). Comportement mécanique du bois. *ARBOLOR (ed) Le bois matériau d'ingénierie.*, 91-125.
- GUPTA, S., RAVINDRANATH, B., & SESHADRI, T. (1972). Polyphenols of juglans nigra. *Phytochemistry*, 11(8), 2634-2636. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)88569-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)88569-6)
- HAMILTON, W. (1980). Wetwood and slime flux in landscape trees. (6), 247-249.
- HANKINSON, R. L. (1921). Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. *Air service information circular*, 3(259), 130.
- HAOUAZALI, H. E. (2009, septembre 23). *Deroulage du peuplier : effets cultivars et stations sur la qualité des produits dérivés* (thèse de doct.). Arts et Métiers ParisTech. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005567>
- HARDING, O., & ORANGE, R. (1998). The effect of juvenile wood and lay-up practices. *Forest products journal*, 48(7), 63-70.
- HAUPT, M., LEITHOFF, H., MEIER, D., PULS, J., RICHTER, H. G., & FAIX, O. (2003). Heartwood extractives and natural durability of plantation-grown teakwood (*Tectona grandis* L.) ? a case study. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(6), 473-474. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0428-z>
- HAYGREEN, J. G., & BOWYER, J. L. (1996). *Forest products and wood science : an introduction* (3rd ed). Iowa State University Press.
- HEIM, L., DODELER, R., BRANCHERIAU, L., MARCHAL, R., BOUTAHAR, N., LOTTE, S., DUMARÇAY, S., GÉRARDIN, P., & CANDELIER, K. (2022). Comparison of extractive chemical signatures among branch, knot and bark wood fractions from forestry and agroforestry walnut trees (*juglans regia* × *j. nigra*) by NIR spectroscopy and LC-MS analyses [Publisher : SISEF - Italian Society of Silviculture and Forest Ecology Section : Wood Technology and Forest Harvesting]. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 15(1), 56. <https://doi.org/10.3832/ifor3973-014>
- HEIM, L., BRANCHERIAU, L., MARCHAL, R., BOUTAHAR, N., DENAUD, L., BADEL, E., MEGHAR, K., & CANDELIER, K. (2023). NIR-hyperspectral camera analyses for differencing agroforestry and forestry poplar woods. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00877-5>
- HEIM, L., BRANCHERIAU, L., MARCHAL, R., BOUTAHAR, N., LOTTE, S., DENAUD, L., BADEL, E., MEGHAR, K., & CANDELIER, K. (2022). Variation analyses of extractive contents by NIR-spectroscopy bring out the differences between agroforestry and forestry walnut

## BIBLIOGRAPHIE

---

- (juglans regia × nigra) trees [Publisher : De Gruyter]. *Holzforschung*. <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0055>
- HILLIS, W. E. (1971). Distribution, properties and formation of some wood extractives. *Wood Science and Technology*, 5(4), 272-289. <https://doi.org/10.1007/BF00365060>
- HUANG, R., BAO, F., & ZHANG, D. (2005). Model for maturation age of wood property and extend of juvenile wood zone in poplar trunks. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(3), 103-109.
- IGN. (2017). La forêt plantée en France : Etat des lieux. *Institut national de l'informatique géographique et forestière*, (40). [https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/if40\\_plantations.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/if40_plantations.pdf)
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2019). *IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems*. (Summary for Policymakers, approved draft). IPCC, Geneva, Switzerland.
- JACOBS, M. R. (1954). The effect of wind sway on the form and development of pinus radiata d. don.
- JAFFE, M. J. (1973). Thigmomorphogenesis : the response of plant growth and development to mechanical stimulation. *Planta*, 114(2), 143-157. <https://doi.org/10.1007/BF00387472>
- JAFFE, M. J., TELEWSKI, F. W., & COOKE, P. W. (1984). Thigmomorphogenesis : on the mechanical properties of mechanically perturbed bean plants. *Physiologia Plantarum*, 62, 73-78. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1984.tb05925.x>
- JIANG, X., ZANG, L., ZHENG SHIKAI, BANGXING, X., & ZHENG, S. (1993). Studies on the Occurrence, Distribution and Wood Properties of Wetheartwood in Populus deltoides I-69. *Forest Research*, 6(5), 480-485.
- JIANG, Z.-H., WANG, X.-Q., FEI, B.-H., REN, H.-Q., & LIU, X.-E. (2007). Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with populus xiaohai. *Annals of Forest Science*, 64(8), 807-814. <https://doi.org/10.1051/forest:2007063>
- JODIN, P. (1994). *Le bois : matériau d'ingénierie* [OCLC : 31758324]. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine.
- JOSE, S., GILLESPIE, A., & PALLARDY, S. (2004). Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b>
- JOUREZ, B. (1998). Le Robinier faux acacia. *Courrier du Bois*, 38(120). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/95409>
- JOZSA, L. A., & MIDDLETON, G. R. (1994). A discussion of wood quality attributes and their practical implications, 51.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- KAMALA, B. S., KUMAR, P., RAO, R. V., & SHARMA, S. N. (1999). Performance test of laminated veneer lumber (LVL) from rubber wood for different physical and mechanical properties. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57(2), 114-116. <https://doi.org/10.1007/s001070050025>
- KAWAI, S., WANG, Q., SASAKI, H., TANAHASHI, M., & OHOTA, C. (1993). Properties of compressed laminated veneer lumber produced by steam pressing. *Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)*.
- KELLER, R. (1994). *La constitution du bois*. In : *ARBOLOR (ed) Le bois matériau d'ingénierie*. pp 13-52.
- KERN, K. A., EWERS, F. W., TELEWSKI, F. W., & KOEHLER, L. (2005). Mechanical perturbation affects conductivity, mechanical properties and aboveground biomass of hybrid poplars. *Tree Physiology*, 25(10), 1243-1251. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.10.1243>
- KIMBERLEY, M. O., MCKINLEY, R. B., COWN, D. J., & MOORE, J. R. (2017). Modelling the variation in wood density of new zealand-grown douglas-fir. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 47(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40490-017-0096-0>
- KOZLIK, C. J., KRAHMER, R. L., & LIN, R. T. (1972). Drying and other related properties of western hemlock sinker heartwood. *Wood and Fiber Science*, 99-111.
- KRAUSE, C., & GAGNON, R. (2006). The relationship between site and tree characteristics and the presence of wet heartwood in black spruce in the boreal forest of quebec, canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(6), 1519-1526. <https://doi.org/10.1139/x06-026>
- LABANT, P. (2017, décembre 19). *Le dispositif spatial agroforestier à la croisée des champs : une approche pluridisciplinaire du développement de l'agroforesterie en France* (These de doctorat). Toulouse 2. <https://www.theses.fr/2017TOU20130>
- LABORATORY, F. P., & UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE, F. S. (2010, avril). *Wood handbook, wood as an engineering material* (General Technical Report FPL-GTR-190).
- LAMERRE, J., SCHWARZ, K.-U., LANGHOF, M., von WÜHLISCH, G., & GREEF, J.-M. (2015). Productivity of poplar short rotation coppice in an alley-cropping agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 89(5), 933-942. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9825-7>
- LASSERRE, J.-P., MASON, E. G., WATT, M. S., & MOORE, J. R. (2009). Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in pinus radiata d. don corewood. *Forest Ecology and Management*, 258(9), 1924-1931. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.028>
- LE BOIS INTERNATIONAL. (2018). Garnica investit 80 millions d'euros dans une nouvelle usine à Troyes.
- LEE, E., KUMAR, P., BARRON-GAFFORD, G., HENDRYX, S., SÁNCHEZ-CAÑETE, E., MINOR, R., COLELLA, T., & SCOTT, R. (2018). Impact of Hydraulic Redistribution on Multispecies

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Vegetation Water Use in a Semiarid Savanna Ecosystem : An Experimental and Modeling Synthesis. *Water Resources Research*, 54. <https://doi.org/10.1029/2017WR021006>
- LESLIE, C. A., & MCGRANAHAN, G. H. (1998). The origin of walnut. *Ramos, D.E, Walnut production manual, University of California, Oakland, California.*
- LIAGRE, F., BÉRAL, C., ORI, D., MARTIN CHAVE, A., LE MOIGNE, N., BEIGBEDER, J., CORN, S., GALLARD, B., RABATEL, J., DOINEAU, E., MARCHAL, R., CANDELIER, K., VEZY, R., DAUZAT, J., SENEGAS, I., CAHIERRE, A., LE PORT, S., GÉRARDIN, P., DUMARÇAY, S., ... BONO, P. (2022). *Etude de la valorisation des branches en agroforesterie pour les filières matériaux et chimie biosourcées.*
- LIAGRE, F., SANTI, F., & VERT, J. (2012). L'agroforesterie en France : intérêts et enjeux. *Centres d'études et de prospective - Analyse n°37, (37)*. [https://www.bioenergie-promotion.fr/wp-content/uploads/2012/02/analyse\\_37\\_cep\\_agroforesterie.pdf](https://www.bioenergie-promotion.fr/wp-content/uploads/2012/02/analyse_37_cep_agroforesterie.pdf)
- LIU, S. Q., & BAO, F. C. (2001). Modeling wood properties in relation to cambium age and ring width of plantation poplar in China. *Journal of the Institute of Wood Science*, 1, 247-252.
- LIU, Y., NADEZHDINA, N., DI, N., MA, X., LIU, J., ZOU, S., XI, B., & CLOTHIER, B. (2021). An undiscovered facet of hydraulic redistribution driven by evaporation—a study from a *Populus tomentosa* plantation. *Plant Physiology*, 186(1), 361-372. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab036>
- LU, C., WU, J., JIANG, Q., LIU, Y., ZHOU, L., YOU, Y., CHENG, Y., & LIU, S. (2021). Influence of juvenile and mature wood on anatomical and chemical properties of early and late wood from chinese fir plantation. *Journal of Wood Science*, 67(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-02005-2>
- LUDWIG, F., DAWSON, T. E., PRINS, H. H. T., BERENDSE, F., & KROON, H. (2004). Below-ground competition between trees and grasses may overwhelm the facilitative effects of hydraulic lift. *Ecology Letters*, 7(8), 623-631. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00615.x>
- M. DINWOODIE, J. (2011). Timber—a review of the structure-mechanical property relationship. *Journal of Microscopy*, 104, 3-32. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1975.tb04002.x>
- MAYA, M. (2014). Cours De Mécanique Des Milieux Continus.
- MENG, S. X., LIEFFERS, V. J., REID, D. E. B., RUDNICKI, M., SILINS, U., & JIN, M. (2006). Reducing stem bending increases the height growth of tall pines. *Journal of Experimental Botany*, 57(12), 3175-3182. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl079>
- MENG, S. X., RUDNICKI, M., LIEFFERS, V. J., REID, D. E. B., & SILINS, U. (2006). Preventing crown collisions increases the crown cover and leaf area of maturing lodgepole pine. *Journal of Ecology*, 94(3), 681-686. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01121.x>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- MERELA, M., HABJAN, P., & ČUFAR, K. (2016). Waviness of beech sliced veneer. *Acta Silvae et Ligni*, 110, 3-13. <https://doi.org/10.20315/ASetL.110.1>
- MITCHELL, L. (1961). A concept of intrinsic wood quality and nondestructive methods for determining quality in standing timber. *Report No. 2233, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin*.
- MOHNI, C., PELLERI, F., & HEMERY, G. (2009). The modern silviculture of *Juglans regia* l : a literature review. *Die Bodenkultur* 59 :19–3. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-modern-silviculture-of-Juglans-regia-L%3A-A-Mohni-Pelleri/faa1577b7bde74aede4259b5c0634c579279562>
- MONTAGU, K. D., KEARNEY, D. E., & SMITH, R. G. B. (2003). The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production—a review. *Forest Ecology and Management*, 179(1), 1-13. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00579-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00579-0)
- MORAIS, P. H. D. d., LONGUE JÚNIOR, D., COLODETTE, J. L., MORAIS, E. H. d. C., & JARDIM, C. M. (2017). Influence of clone harvesting age of eucalyptus grandis and hybrids of eucalyptus grandis x eucalyptus urophylla in the wood chemical composition and in kraft pulpability. *Ciência Florestal*, 27(1), 237-248. <https://doi.org/10.5902/1980509826462>
- MOREL, P., CRESPEL, L., GALOPIN, G., & MOULIA, B. (2012). Effect of mechanical stimulation on the growth and branching of garden rose. *Scientia Horticulturae*, 135, 59-64. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.12.007>
- MORIKAWA, T., ASHITANI, T., KOFUJITA, H., & TAKAHASHI, K. (2014). Antitermitic activity of extracts from *chamaecyparis obtusa* branch heartwood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(5), 651-657. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0830-8>
- MOSQUERA-LOSADA, M. R., SANTIAGO-FREIJANES, J. J., ROIS-DÍAZ, M., MORENO, G., den HERDER, M., ALDREY-VÁZQUEZ, J. A., FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N., PANTERA, A., PISANELLI, A., & RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A. (2018). Agroforestry in europe : a land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*, 78, 603-613. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.052>
- MOTHE, F., DUCHANOIS, G., ZANNIER, B., & LEBAN, J.-M. (1997). Analyse microdensitométrique appliquée au bois : méthode de traitement des données utilisée à l'Inra-ERQB (programme Cerd). *Annales des sciences forestières*, 55(3), 301-313. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00883203>
- MULIA, R., & DUPRAZ, C. (2006). Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern france : what consequences for modelling of tree root dynamics? *Plant and Soil*, 281(1), 71-85. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3770-6>
- NAIR, P. K. R. (1993, juillet 31). *An introduction to agroforestry*. Springer Science & Business Media.
- NAIR, P. K. R. (2011). Agroforestry systems and environmental quality : introduction. *Journal of Environmental Quality*, 40(3), 784-790. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0076>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- NAIR, P. K. R., GORDON, A. M., & MOSQUERA-LOSADA, M. R. (2008). Agroforestry. In *Encyclopedia of ecology* (S.E. Jorgensen and B.D. Faith).
- NAVI, P., & HEGER, F. (2005). *Comportement thermo-hydrromécanique du bois : applications technologiques et dans les structures* [Google-Books-ID : 1WWJAW0cWSwC]. PPUR presses polytechniques.
- NEPVEU, G. (1994). Le bois matériau d'ingénierie–Variabilité. *Arboror, Nancy*, 126-182.
- NIEZ, B. (2018). Acclimatation de l'arbre aux flexions répétées et conséquences sur le comportement mécanique et les propriétés hydrauliques du bois vert : Biologie végétale. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02060329>
- NIEZ, B., DLOUHA, J., GRIL, J., RUELLE, J., TOUSSAINT, E., MOULIA, B., & BADEL, E. (2020). Mechanical properties of “flexure wood” : compressive stresses in living trees improve the mechanical resilience of wood and its resistance to damage. *Annals of Forest Science*, 77(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-0926-8>
- NIEZ, B., DLOUHA, J., MOULIA, B., & BADEL, E. (2018). Water-stressed or not, the mechanical acclimation is a priority requirement for trees. *Trees - Structure and Function*, 33(1), 279-291. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1776-y>
- NOUET, Y., & ALBARIC, L. (2009). *Le bois raméal fragmenté dans le Gard : évaluation du gisement gardois*. Agence de l'eau. CA30.
- PAILLASSA, E. (2002). Fiche technique cultivar de peuplier : Koster. *Forêt-entreprise*, (146).
- PAILLASSA, E., BERTHELOT, A., REULING, D., ROBERT, A., LANVIN, J., LEGRAND, J., MOREAU, J., & DENAUD, L. (2013). *Etude des qualités du bois des nouveaux cultivars de peuplier (Rapport final)* (Rapport final).
- PANSHIN, A. J., & ZEEUW, C. (1970). *Textbook of wood technology. volume i. structure, identification, uses, and properties of the commercial woods of the united states and canada*.
- PANSHIN, A. J., & ZEEUW, C. (1980). *Textbook Of Wood Technology Vol I*. McGraw Hill Book Company Inc.
- PATARIN, B. (2006). Les potentialités agroforestières dans le bassin versant du Marais Poitevin, en France, 224.
- PESZLEN, I. (1994). Influence of Age on Selected Anatomical Properties of Populus Clones. *IAWA Journal*, 15(3), 311-321. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000613>
- PIERRET, A., MAEGHT, J.-L., CLÉMENT, C., MONTOROI, J.-P., HARTMANN, C., & GONKHAMDEE, S. (2016). Understanding deep roots and their functions in ecosystems : an advocacy for more unconventional research. *Annals of Botany*, 118(4), 621-635. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw130>
- PILATE, G., CHABBERT, B., CATHALA, B., YOSHINAGA, A., LEPLÉ, J.-C., LAURANS, F., LAPIERRE, C., & RUEL, K. (2004). Lignification and tension wood. *Comptes Rendus Biologies*, 327(9), 889-901. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2004.07.006>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Plan de développement de l'agroforesterie - Pour le développement et la gestion durable de tous les systèmes agroforestiers (2016). <https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/160517-ae-agrofesterie.pdf>
- POINTEREAU, P. (2002). Les haies : évolution du linéaire en France depuis quarante ans.
- POINTEREAU, P., & COULON, F. (2006). La haie en France et en Europe : évolution ou régression, au travers des politiques agricoles. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-35258-rnhc.pdf>
- PURBA, C. Y. C., POT, G., VIGUIER, J., RUELLE, J., & DENAUD, L. (2019). The influence of veneer thickness and knot proportion on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) made from secondary quality hardwood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(3), 393-404. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01400-3>
- RATHGEBER, C. B. K., CUNY, H. E., & FONTI, P. (2016). Biological Basis of Tree-Ring Formation : A Crash Course. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00734>
- REID, W., MOONEY, H., CROPPER, A., CAPISTRANO, D., CARPENTER, S., & CHOPRA, K. (2005, janvier 1). *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being : synthesis*. World Resources Institute (WRI).
- ROIGNANT, J. (2018, juin 21). *Biologie de développement du bois en réponse à des sollicitations mécaniques environnementales* (thèse de doct.). Université Clermont Auvergne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02004248>
- ROIGNANT, J., BADEL, E., LEBLANC-FOURNIER, N., BRUNEL-MICHAC, N., RUELLE, J., MOULIA, B., & DECOURTEIX, M. (2018). Feeling stretched or compressed? The multiple mechanosensitive responses of wood formation to bending. *Annals of Botany*, 121(6), 1-11. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx211>
- SALBITANO, F., & BAGNARA, L. (2004). Architettura comparata di chiome e apparati radicali di *Juglans regia* L : Risposta a diverse intensità di consociazione con specie azotofizzatrici. <http://www.arboricoltura.it/Ricerche/Potature/File/PosterSottoprogetto2-1-4.pdf>.
- SANO, Y., FUJIKAWA, S., & FUKAZAWA, K. (1995). Detection and features of wetwood in quercus mongolica var. grosseserrata. *Trees*, 9(5), 261-268. <https://doi.org/10.1007/BF00202016>
- SCHALLER, N. (2013). L'agroécologie : des définitions variées, des principes communs. *Centre d'Etude Prospective, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt*, 4p.
- SCHINK, B., WARD, J. C., & ZEIKUS, J. G. (1981). Microbiology of Wetwood : Importance of Pectin Degradation and Clostridium Species in Living Trees. *Applied and Environmental Microbiology*, 42(3), 526-532.
- SCHROEDER, H. A., & KOZLIK, C. J. (1972). The characterization of wetwood in western hemlock. *Wood Science and Technology*, 6(2), 85-94. <https://doi.org/10.1007/BF00350823>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- SCHROEDER, P. (1994). Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 27(1), 89-97. <https://doi.org/10.1007/BF00704837>
- SCHULTZ, T. P., & NICHOLAS, D. D. (2000). Naturally durable heartwood : evidence for a proposed dual defensive function of the extractives. *Phytochemistry*, 54(1), 47-52. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(99\)00622-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(99)00622-6)
- SCHULTZ, T., HARMS, W. B., FISHER, T. H., MCMURTREY, K., MINN, J., & NICHOLAS, D. (1995). Durability of angiosperm heartwood : the importance of extractives. *hfsq*, 49(1), 29-34. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1995.49.1.29>
- SCOTT, W., MEADE, R., LEON, R., HYINK, D., & MILLER, R. (1998). Planting density and tree-size relations in coast Douglas-fir [Publisher : NRC Research Press]. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(1), 74-78. <https://doi.org/10.1139/x97-190>
- SEKHAR, A. C. (1966). Physical and mechanical properties of teak from different localities in India and neighbouring areas. *Forest Research Institute*.
- SHANAVAS, A., & KUMAR, B. M. (2006). Physical and mechanical properties of three agroforestry tree species from kerala, india. *Journal of Tropical Agriculture*, 44(0), 23-30.
- SHAW, D. C., EDMONDS, R. L., LITCKE, W. R., BROWNING, J. E., & RUSSEL, K. W. (1995). Incidence of wetwood and decay in precommercially thinned western hemlock stands [Publisher : NRC Research Press]. *Canadian Journal of Forest Research*, 25(8), 1269-1277. <https://doi.org/10.1139/x95-140>
- SHUKLA, S. R., & VISWANATH, S. (2014). Comparative study on growth, wood quality and financial returns of teak (*tectona grandis* l.f.) managed under three different agroforestry practices. *Agroforestry Systems*, 88(2), 331-341. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9686-5>
- SIEGWART, L., JOURDAN, C., PITON, G., SUGIHARA, S., VAN DEN MEERSCHE, K., & BERTRAND, I. (2022). Root distribution and properties of a young alley-cropping system : effects on soil carbon storage and microbial activity. *Plant and Soil*, 482(1), 601-625. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05714-9>
- SOUSSANA, J. F. (2012). *Rapport du chantier Agro-écologie*. INRA. Paris.
- STASSART, P., BARET, P., GRÉGOIRE, J.-C., HANCE, T., MARC, M., REHEUL, D., STILMANT, D., VANLOQUEREN, G., & VISSER, M. (2012). L'agroécologie : trajectoire et potentiel Pour une transition vers des systèmes alimentaires durables.
- SZYMANSKI, M. B., & TAUER, C. G. (1991). Loblolly Pine Provenance Variation in Age of Transition from Juvenile to Mature Wood Specific Gravity. *Forest Science*, 37(1), 160-174. <https://doi.org/10.1093/forestscience/37.1.160>
- TAGHIYARI, H., & EFHAMI SISI, D. (2012, avril 4). The effects of tree-alfalfa intercropped systems on wood quality in temperate regions. In *Agroforestry for biodiversity and ecosystem services - science and practice*. InTech. <https://doi.org/10.5772/35120>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- TALBOT, G. (2011, octobre 26). *L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre la productivité ?* (Thèse de doct.). Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.
- TANI, A., MALTONI, A., MARIOTTI, B., & BURESTI LATTES, E. (2006). Juglans regia L. tree plantations for wood production in mining area of S. Barbara (AR). Evaluation of N-fixing accessory trees effect. *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale*, 3(4), 588-597. <https://doi.org/10.3832/efor0407-0030588>
- TELEWSKI, F. W. (1989). Structure and function of flexure wood in abies fraseri [Publisher : Oxford Academic]. *Tree Physiology*, 5(1), 113-121. <https://doi.org/10.1093/treephys/5.1.113>
- TELEWSKI, F. W., & PRUYN, M. L. (1998). Thigmomorphogenesis : a dose response to flexing in Ulmus americana seedlings. *Tree Physiology*, 18(1), 65-68. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.1.65>
- TERRASSE, F., BRANCHERIAU, L., MARCHAL, R., BOUTAHAR, N., LOTTE, S., GUIBAL, D., PIGNOLET, L., & CANDELIER, K. (2021). Density, extractives and decay resistance variabilities within branch wood from four agroforestry hardwood species. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 14(3), 212-220. <https://doi.org/10.3832/ifor3693-014>
- THIBAUT, B., & MARCHAL, R. (2015). Tranchage et déroulage, 13.
- THOMAS, A., PRIAULT, P., PIUTTI, S., DALLÉ, E., & MARRON, N. (2020). Growth dynamics of fast-growing tree species in mixed forestry and agroforestry plantations. *Forest Ecology and Management*, 480, 118672. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118672>
- TIMOSHENKO, S., & GOODIER, J. (1934). *Theory of Elasticity* (McGraw-Hill Book Co.).
- TOSHIKAKI, U. (2001). Chemistry of extractives. In *Wood and cellulosic chemistry* (2nd ed., rev. and expanded, p. 213-241). Marcel Dekker.
- TROUY, M.-C. (2015). *Anatomie du bois - Formation, fonctions et identification* [Librairie Quae] [Library Catalog : [www.quae.com](http://www.quae.com)]. <https://www.quae.com/produit/1310/9782759223510/anatomie-du-bois>
- TROUY, M.-C. (2017). Anatomie du bois - MOOC. <https://lms.fun-mooc.fr/courses/course-v1:lorraine+30003+session04/541005bb2d5640889cfc7f4098ec9ef2/>
- VARAH, A. (2015). *Can agroforestry reconcile conflicting demands for productivity, biodiversity conservation and delivery of ecosystem services* (thèse de doct.). University of Reading.
- WANG, J., LI, C., ZHAO, G., RONG, D., & LENG, Y. (1998). Drying of poplar veneer. *China Wood Industry*, 12(5), 3-7.
- WANG, X., JIANG, Z., & REN, H. (2008). Distribution of wet heartwood in stems of Populus xiaohei from a spacing trial. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(1), 38-45. <https://doi.org/10.1080/02827580701763706>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- WARD, J. C., & PONG, W. (1980). *Wetwood in trees : a timber resource problem*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest ; Range Experiment Station.
- WARD, J. C., & ZIEKUS, J. G. (1980). Bacteriological, chemical and physical properties of wetwood in living trees. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt fuer Forst und Holzwirtschaft Hamburg Reinbek*.
- WRIGHT, J., & ENDO, M. (1993). Wood density of four-year-old clones of *Eucalyptus grandis* from sixteen trials in Colombia. *Wood and fiber science : journal of the Society of Wood Science and Technology*.
- XU, F., ZHONG, X.-C., SUN, R.-C., LU, Q., & JONES, G. L. (2006). Chemical composition, fiber morphology, and pulping of *P. Bolleana lauche*. *Wood and Fiber Science*, 512-519.
- XU, P., & LIU, H. (2004). Models of microfibril elastic modulus parallel to the cell axis. *Wood Science and Technology*, 38(5). <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0235-7>
- YANG, J. L., & EVANS, R. (2003). Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(6), 449-452. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0424-3>
- ZHANG, S. (2003). *Wood Quality Attributes and Their Impacts on Wood Utilization*.
- ZHENG, H., DAI, Y., ZHANG, T., GUO, T., & LIANG, B. (2006). Surveys on red heart disease of poplars. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 33(1), 22-24.
- ZHUGE, Q., HUANG, M., PAN, H., LI, H., & FENG, W. (1997). Study on chemical characteristics and formation mechanism of poplar wet heartwood. *Scientia Silvae Sinica*, 33(3), 259-266.
- ZOMER, R., TRABUCCO, A., COE, R., PLACE, F., VAN NOORDWIJK, M., & XU, J. (2014, février 1). *Trees on farms : an update and reanalysis of agroforestry's global extent and socio-ecological characteristics*.

# Liste des tableaux

2.1	Forces et faiblesses identifiées dans chacun des dispositifs étudiés au cours de la thèse . . . . .	61
2.2	Tableau récapitulatif des expérimentations comparatives AF vs FC menées pour chaque essence ciblée . . . . .	64
3.1	DBH (cm) et hauteur (m) des peupliers AF et FC du dispositif Peuplier de Lent.	84
3.2	Échantillonnage et effectifs des robiniers en fonction du traitement sylvicole (AF ou FC), du tuteurage (1 : arbre avec un tuteur, 0 : arbre sans tuteur), et de la taille du houppier (taillé ou non taillé) . . . . .	88
4.1	Proportion en pourcentage de l'aubier et du faux-cœur dans le tronc de chaque disque de peuplier agroforestier (AF) et témoin forestier (FC). . . . .	136
4.2	Taux d'humidité moyen de l'aubier, du faux-cœur et du disque entier de chaque peuplier agroforestier (AF) et témoin forestier (FC). Les moyennes pour l'aubier et le faux-cœur ont été estimées tandis que la moyenne de chaque disque correspond à la moyenne du taux d'humidité de tous les cubes du disque. <i>sd</i> correspond à l'écart-type. . . . .	137
4.3	Densité moyenne des peupliers (à H=12%) en fonction de l'orientation du rayon (rayon Nord et rayon Est) et du traitement sylvicole (AF et FC). Les valeurs correspondent aux moyennes $\pm$ l'écart-type. Les différences significatives sont indiquées par des astérisques : p-value $\leq 0,05*$ , p-value $\leq 0,01**$ , p-value $\leq 0,001***$ , ns pour non significatif. . . . .	144
4.4	Densité moyenne (H=12%) des peupliers en fonction de la nature du bois dans le cerne (bois initial et bois final), l'orientation du rayon (rayon Nord et rayon Est) et du traitement sylvicole (AF et FC). . . . .	148
4.5	Paramètres de largeurs de cernes moyens et de texture en fonction de l'orientation du rayon (confondus, Nord et rayon Est) et du traitement sylvicole (AF et FC). Les valeurs correspondent aux moyennes $\pm$ l'écart-type. . . . .	149

## LISTE DES TABLEAUX

---

5.1	Nombre de placages caractérisés par arbre et par parcelle. . . . .	182
5.2	Paramètres mesures ondulation . . . . .	184

# Table des figures

1.1	(a) Pâturage sous une plantation de noyers hybrides (Crédit : E. Juarez ; source : agroforesterie.fr) - (b) Linéaire bocager (Crédit : Air Papillon). . . . .	26
1.2	Les bénéfices de l'agroforesterie (Infographie : Plan de développement de l'agroforesterie - Pour le développement et la gestion durable de tous les systèmes agroforestiers, 2016) .	27
1.3	Structure générale du tronc (Source GARRETT, 2007 . . . . .	37
1.4	Structure anatomique du bois des angiospermes (d'après de GROSSER, 1977) . .	38
1.5	Coupe anatomique du bois d'angiospermes. (a) Bois à zone initiale poreuse (Robinier, <i>Robinia pseudoacacia</i> ); (b) Bois à zone semi-poreuse (Noyer, <i>Juglans sp</i> ); (c) Bois pores diffus (Peuplier, <i>Populus sp</i> ). TROUY, 2017 . . . . .	39
1.6	Directions et plans de référence dans le bois (TROUY, 2015) . . . . .	39
1.7	(a) Couches constitutives de la paroi cellulaire et angles des microfibrilles de cellulose (BURGERS, 2016) et (b) distribution des principaux polymères de la paroi (M correspond à la lamelle moyenne, P à la paroi primaire et S1, S2 et S3 aux différentes couches de la paroi secondaire)(PANSHIN et ZEEUW, 1970). . . . .	40
1.8	Représentation schématique d'une microfibrille de cellulose (d'après Bailli 2004) . . . .	41
1.9	Courbe de contrainte-déformation. $\sigma$ correspond à la contrainte appliquée et $\varepsilon$ à la déformation. E représente le module d'élasticité du matériau. $\sigma_R$ est sa contrainte de rupture, $\sigma_{el}$ la contrainte élastique du matériau et $\varepsilon_{el}$ sa déformation élastique. . . . .	44
1.10	(a) Bois de tension (modifié par NIEZ, 2018, d'après de ANSELME, 2012) et (b) Parois cellulaires de fibres de bois "normal" (A) et de bois de tension (C) de peuplier observées par microscopie électronique à balayage, et schémas d'interprétation correspondants (B et D respectivement). ML : lamelle moyenne; PCW : paroi cellulaire primaire; S1, S2, S3 : couches de la paroi cellulaire secondaire; G : couche gélatineuse dans les fibres de bois de tension. La barre d'échelle correspond à $5\mu m$ . DÉJARDIN et al., 2010 . . . . .	49

## TABLE DES FIGURES

---

2.1	Vue aérienne des quatre parcelles de noyers hybrides du dispositif expérimental en agroforesterie tempérée- Domaine départemental de Restinclières. Les parcelles encadrées en rouge correspondent aux deux parcelles étudiées au cours de cette thèse (A3-Parcelle agroforestière AF ; A4-Témoin forestier FC). . . . .	55
2.2	(a) Parcelle agroforestière A3 (parcelle AF) et (b) parcelle forestière A4 (parcelle FC) du dispositif en agroforesterie tempérée de Restinclières (RAP) - (Crédit - Lucie HEIM, mai 2020.) . . . . .	57
2.3	Dispositif Peuplier de Lent (Ain, France). . . . .	57
2.4	(a) Parcelle forestière témoin (FC) et (b) Parcelle agroforestière (AF) du Dispositif Peuplier de Lent (Ain, France) . . . . .	58
2.5	Design expérimental DIAMs (Hérault, France)(Source : Eco&Sols) . . . . .	60
2.6	Échantillonnage des noyers agroforestiers et forestiers des parcelles AF et FC du dispositif de Restinclières. Les arbres abattus en mai 2020 sont représentés par les points rouges. Ceux situés au niveau de l'extrémité commune des deux parcelles sont entourés en jaune, ceux situés aux extrémités sont entourés en bleu. . . . .	65
2.7	Représentation schématique de l'échantillonnage et des expérimentations menées sur les noyers AF et FC. . . . .	66
2.8	Représentation schématique de l'échantillonnage et des expérimentations menées sur les peupliers AF et FC. . . . .	67
2.9	(a) Robinier tuteuré (parcelle FC du block 3) et (b) robinier témoin non tuteuré (parcelle AF du block 1) du dispositif DIAMs. . . . .	68
2.10	Représentation schématique du sous-échantillonnage réalisé dans le cadre de cette thèse. Les robiniers échantillonnés ne seront pas taillés. Le block expérimental est représenté ici sans sa parcelle agricole témoin. . . . .	68
2.11	Renforcement des tuteurs de robiniers. . . . .	69
3.1	Vue aérienne de la parcelle agroforestière (AF) et de la parcelle forestière témoin (FC), Restinclières, France. Les piézomètres sont représentés en bleu. Les lignes de plantation sont numérotées (en blanc) de 1 à 8 en partant de l'ouest pour la parcelle AF, et de 1 à 11 en partant de l'ouest pour la parcelle FC. Les cercles blancs en pointillés correspondent aux regroupements des arbres de plusieurs lignes de plantation différentes pour les analyses statistiques. . . . .	74
3.2	Évolution du DBH (cm) (a) et de la hauteur (m) (b) des noyers AF et FC de 1995/1998 à 2014. . . . .	76
3.3	Évolution de la hauteur (m) (a) et du DBH (cm) (b) des noyers de la parcelle FC, de 2000 à 2014, en fonction de la fertilisation. . . . .	77
3.4	Évolution du ratio moyen entre la hauteur et le DBH (H/DBH, en m/cm) pour les noyers AF et FC, de 1998 à 2014. . . . .	77

## TABLE DES FIGURES

---

3.5	Distributions du DBH (a) et de la hauteur (b) en fonction de la position de la ligne de plantation dans les parcelles AF et FC - 2014. . . . .	78
3.6	Évolution de la profondeur de la nappe phréatique dans les parcelles AF et FC, de 2002 à 2014. Les valeurs enregistrées par les piézomètres de la parcelle AF sont représentés par des lignes continues, celles de la parcelle FC sont représentées par des lignes pointillées. . . . .	79
3.7	Hauteurs des peupliers en fonction du traitement sylvicole. . . . .	85
3.8	DBH des peupliers AF et FC mesuré selon les axes Nord-Sud et Est-Ouest en fonction du traitement sylvicole. . . . .	86
3.9	Évolution de la hauteur (m) des robiniers tuteurés et non tuteurés de 2021 à 2023, en fonction du traitement sylvicole et de la modalité de taille du houppier. Le tuteurage "1" correspond aux arbres tuteurés, le "0" aux arbres témoins non tuteurés. . . . .	90
3.10	Évolution du DBH (cm) des robiniers tuteurés et non tuteurés de 2021 à 2023, en fonction du traitement sylvicole et de la modalité de taille du houppier. Le tuteurage "1" correspond aux arbres tuteurés, le "0" aux arbres témoins non tuteurés. . . . .	91
3.11	Exemple de tuteurage trop lâche sur un robinier agroforestier. Son mouvement face à l'action du vent s'avère peu limité. . . . .	92
4.1	Délimitation du faux-cœur sur le logiciel ImageJ (à gauche) et estimation de la proportion d'aubier et de faux-cœur dans le tronc via un code écrit en Python (à droite) - Peuplier B (parcelle AF) . . . . .	134
4.2	Cartographie du taux d'humidité. La croix rouge désigne le Nord tandis que le point rouge localise la moelle. Disque provenant du peuplier B (parcelle AF). . . . .	135
4.3	Cartographie de la zone d'aubier (en bleu clair) et de faux-cœur (en bleu foncé) des six peupliers agroforestiers (A à F) et des six peupliers forestiers témoins (G à L) . . . . .	136
4.4	Cartographie du taux d'humidité (%) des disques provenant de la base du tronc des peupliers AF (A à F) et FC (G à L). La croix rouge désigne le Nord tandis que le point rouge localise la moelle. . . . .	138
4.5	Évolution du taux d'humidité (%) en fonction de la distance à la moelle et de la proportion d'aubier et de faux-cœur des échantillons de tronc des peupliers issus de la parcelle AF. . . . .	139
4.6	Évolution du taux d'humidité (%) en fonction de la distance à la moelle et de la proportion d'aubier et de faux-cœur des échantillons de tronc des peupliers issus de la parcelle FC. . . . .	140
4.7	Préparation des barrettes de peuplier. . . . .	142
4.8	(a) Image radiographique obtenue après scan par l'ITRAX et (b) traitement par le logiciel CerD . . . . .	143
4.9	Densité moyenne des peupliers agroforestiers (AF) et forestiers (FC) mesurée sur les rayons Nord et Est. (H=12%) . . . . .	145
4.10	Densité moyenne au sein des parcelles agroforestière (AF) et forestière (FC) mesurée sur les rayons Nord et Est. (H=12%) . . . . .	145

TABLE DES FIGURES

---

4.11	Évolution annuelle de la densité moyenne des peupliers étudiés au sein des parcelles agroforestière (AF) et forestière (FC) mesurée sur les rayons Nord et Est. La courbe rouge en pointillés correspond à l'évolution moyenne annuelle par parcelle de la densité moyenne de tous les peupliers. (H=12%) . . . . .	146
4.12	Densité moyenne du bois initial et du bois final des peupliers agroforestiers (AF) et forestiers (FC) tous rayons confondus. (H=12%) . . . . .	147
4.13	Densité moyenne du bois initial et du bois final des peupliers agroforestiers (AF) et forestiers (FC) mesurée sur les rayons Nord et Est. (H=12%) . . . . .	147
4.14	Densité intra-cerne des peupliers dans les parcelles AF et FC en fonction de l'orientation du rayon (Nord ou Est). (H=12%) . . . . .	148
4.15	Densité moyenne par largeur de cerne (DmoyLC) des peupliers en fonction des traitements sylvicoles. (H=12%) . . . . .	150
5.1	Dériveuse instrumentée du LaBoMaP (ENSAM, Cluny) . . . . .	157
5.2	Directions de chargement des panneaux de LVL . . . . .	158
5.3	Photographies de l'ensemble des placages caractérisés pour deux billons (un AF et un FC), rangés radialement de la moelle vers l'écorce et illustration des trois zones de tronc (aubier, zone de transition et faux-coeur). . . . .	181
5.4	System of WAviness Analysis, SWAN - (a) Représentation schématique du principe de mesure de l'ondulation des placages et (b) illustration du fonctionnement sur un placage. . . . .	182
5.5	Cartographie de l'ondulation du placage 6 provenant du billon A agroforestier. Placage situé dans la zone de bois d'aubier, (a) photographie et cartographie 2D, (b) représentation 3D. . . . .	183
5.6	Sa - Hauteur moyenne arithmétique (mm) des placages par arbre en fonction de la parcelle. . . . .	184
5.7	Sz - Hauteur totale (mm) des placages par arbre en fonction de la parcelle. . . . .	185
5.8	Sa - Hauteur moyenne arithmétique (mm) des placages en fonction de leur position radiale dans le tronc . . . . .	185
5.9	Sz - Hauteur totale (mm) des placages en fonction de leur position radiale dans le tronc . . . . .	186
5.10	Sa - Hauteur moyenne arithmétique (mm) des placages en fonction de leur position dans le tronc. . . . .	187
5.11	Sa - Hauteur moyenne arithmétique (mm) des placages en fonction de leur position dans le tronc. . . . .	187

# Liste des abréviations

$\sigma_{el}$	Contrainte élastique
$\varepsilon_{el}$	Déformation élastique
ACP	Analyse en composantes principales
AF	Agroforestier/agroforestière
AMF	Angle des microfibrilles de cellulose
Analyse LC-MS	Analyse chromatographie liquide-spectrométrie de masse
Analyse PLS-DA	Analyse discriminante par les moindres carrés partiels
BF	Bois final
BI	Bois initial
BRF	Bois Raméal Fragmenté
CFW	Compressive Flexure Wood
D <sub>12</sub>	Densité du bois pour un taux d'humidité relative à 12%
DBF	Densité du bois final
DBH	Diamètre à hauteur de poitrine (pour Diameter Breast Height en anglais)
DBI	Densité du bois initial
DIAMs	Dispositif Instrumenté en Agroforesterie Méditerranéenne sous contrainte hydrique
Dmoy	Densité moyenne de l'arbre
DmoyLC	Densité moyenne par largeur de cerne
FC	Témoin forestier (pour Forest Control en anglais)

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

---

H	Hauteur
H=12%	Taux d'humidité à 12%
H%	Taux d'humidité
LBF	Largeur du bois final
LBI	Largeur du bois initial
LC	Largeur de cerne
LVL	Laminated Veneer Lumber, ou Lamibois
MOE	Module d'élasticité ou module d'Young
MOR	Contrainte de rupture ou module de rupture
PSF	Point de saturation des fibres
RAP	Restinclières Agroforestry Platform
Sa	Hauteur moyenne arithmétique d'un placage
SMOE	Module d'élasticité spécifique
Spectroscopie NIR	Spectroscopie proche infrarouge (pour Near-infrared en anglais)
Sz	Hauteur maximale d'un placage
TFW	Tensile Flexure Wood





# **Étude comparative de la croissance et des propriétés physiques et chimiques d'arbres issus de systèmes agroforestiers et forestiers pour une valorisation dans la filière bois : cas du peuplier, du noyer et du robinier**

## **Résumé**

L'arbre agroforestier évolue dans des conditions différentes de celles de la foresterie conventionnelle, notamment en raison des faibles densités de plantation. Les dynamiques de croissance et les propriétés physico-chimiques de trois essences tempérées (noyer hybride, peuplier et robinier) provenant de systèmes agroforestiers (AF) et forestiers (FC) ont été comparées. La croissance des arbres agroforestiers s'est révélée être plus rapide que celle de leurs témoins forestiers. Des différences de composition chimique et de propriétés physiques, pour une même essence, ont été observées entre les bois des différents systèmes sylvicoles. L'analyse de la qualité du bois de peuplier appliquée au cas du déroulage, mise en lien avec ses propriétés physiques, a montré que les peupliers AF possédaient des caractéristiques mécaniques supérieures à celles des peupliers FC. Ces résultats prometteurs permettent ainsi d'envisager l'intégration des arbres agroforestiers au sein de la filière bois.

Agroforesterie, peuplier, noyer, robinier, qualité des bois, thigmomorphogénèse

## **Résumé en anglais**

Agroforestry trees evolve in spatial conditions that are far removed from those prevailing in conventional forestry, in particular because of the low plantation densities. The growth dynamics and physical and chemical properties of three tree temperate species (hybrid walnut, poplar and black locust) developed under agroforestry (AF) and forestry (FC) conditions were compared. The growth kinetic of the agroforestry trees was found to be faster than that of the forest controls. Differences in chemical composition and physical properties were found between the different silvicultural treatments, for each wood species. The analysis of poplar wood quality applied to the case of peeling, linked to its physical properties, showed that AF poplars had higher mechanical properties than those of FC poplars. These promising results make it possible to consider the integration of agroforestry trees into the timber industry.

Agroforestry, poplar, walnut, black locust, wood quality, thigmomorphogenesis