



HAL
open science

Influence du tempérament écologique sur les propriétés technologiques des bois d'essences d'origine gabonaise

Estelle Nkene Mezui

► **To cite this version:**

Estelle Nkene Mezui. Influence du tempérament écologique sur les propriétés technologiques des bois d'essences d'origine gabonaise. Matériaux. Université Clermont Auvergne; Ecole Nationale des Eaux et Forêts (Gabon), 2024. Français. NNT : 2024UCFA0117 . tel-04918549

HAL Id: tel-04918549

<https://theses.hal.science/tel-04918549v1>

Submitted on 29 Jan 2025

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.

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE

**ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND**

UNITÉ DE RECHERCHE BioWooEB DU CIRAD

THÈSE

Présentée par

Estelle NKENE MEZUI

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

SPÉCIALITÉ : INGÉNIERIE DES MATÉRIAUX

Titre de la thèse :

**Influence du tempérament écologique sur les propriétés
technologiques des bois d'essences d'origine gabonaise**

Soutenue publiquement le 15 novembre 2024 devant le jury :

Mme. S. Bardet, MCF HDR, Université de Montpellier
M. G. Goli, Professeur, Université de Florence
Mme. P. Omouendze Mouaragadja, MCF CAMES, ENEF
M. J. Gril, Directeur de recherche émérite, CNRS
M. R. Moutou Pitti, MCF HDR, UCA
M. L. Brancheriau, Directeur de recherche, CIRAD
M. S. Ikogou, MCF CAMES, USTM
M. S. Ekomy Ango, MCF CAMES, IRT

Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Président du jury
Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Invité
Invité

Dédicaces

À mon père François MEZUI ME NDONG et ma mère Jeanne AYEKEBA NDONG, pour la vie, l'amour, le soutien et les encouragements.

À mon fils Raphaël Noan ASSEKO ELLA, l'amour de ma vie, pour la joie, l'amour, les rires, le bonheur tout simplement.

À mon fiancé Martian ASSEKO ELLA, pour l'amour, le soutien multiforme, les conseils et les encouragements.

À ma filleule Marie Luciana.

À mes frères, sœurs, neveux et nièces consanguins et non consanguins.

À ma belle-famille, en particulier à mon beau-père Benoît, ma belle grand-mère Jacqueline et ma belle-sœur Jessica.

À mes collègues doctorants des bureaux 105 et 106 en particulier ainsi qu'à tous les stagiaires de passage à Montpellier au CIRAD, pour la bonne humeur et les fous rires.

À mes collègues de bureau à l'Institut Pascal de Clermont-Ferrand.

À mes amis de Libreville, de Franceville, de Clermont-Ferrand et de Montpellier, en particulier à toi M@P.

À mes chorales Les Mélodies, Chœur De la Louange et Ensemble Vocal et Instrumental de Montpellier.

À vous mes regrettés frère et nièce MINKO MI NZE Guy Roger et BACALE MUSA TRAORÉ Miriam partis trop tôt, je vous porte dans mon cœur et je ne vous oublierai jamais.



Remerciements

Cette thèse est l'occasion pour moi de remercier tout d'abord **DIEU Tout-Puissant** pour la vie et la santé sans lesquelles je n'aurai pas pu mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont ensuite à l'endroit de mes directeurs de thèse **Loïc BRANCHERIAU** et **Rostand MOUTOU PITTI** pour leur disponibilité, leur rigueur, leurs conseils, leurs encouragements, leurs critiques constructives et leur professionnalisme. Je remercie également mon encadrant **Samuel IKOGOU** pour sa contribution.

Je remercie également **Daniel GUIBAL**, **Patrick LANGBOUR**, **Alban GUYOT**, **Luc PIGNOLET**, **Jean GÉRARD**, **Amandine VIRETTO**, **Marie France THÉVENON** et **Nabila BOUTAHAR** pour les échanges, les essais effectués, les conseils, la gentillesse et la bonne humeur.

L'aboutissement de ce travail a aussi été facilité par les collaborations tissées avec quelques partenaires externes avec lesquels j'ai pu faire mes essais. À cette occasion, je remercie tout d'abord le laboratoire **SilvaTech** à Nancy et son personnel qui m'ont accueilli dans leurs locaux pour des essais de détermination des angles des microfibrilles du bois. Mention spéciale à **Julien RUELLE** pour sa disponibilité pendant et après le séjour. Je remercie d'autre part le laboratoire **AMAP** et l'équipe qui m'a accueillie pour réaliser mes essais anatomiques. Je pense à **Chantal GENIEZ** et **Stéphane FOURTIER**, merci pour votre hospitalité et votre disponibilité.

Mes remerciements à toute l'équipe **BioWooEB** (Énergie et Bois). Mention spéciale à **Jean-Michel COMMANDRE** et **Coline BRAU**.

Merci à **Sandrine BARDET**, Maître de conférences à l'Université de Montpellier et à **Giacomo GOLI**, Professeur des Universités de l'Université de Florence (Italie), qui ont accepté par leur regard critique et avisé de rapporter cette thèse. Merci à **Priscilla OMOUENDZE** et **Joseph GRIL** d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie l'**École Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur** (ED SPI) de l'Université Clermont Auvergne, le **CIRAD** à Montpellier, le **GDR Sciences du bois** et l'**AUGC** pour les aides financières accordées qui m'ont aidé à valoriser mon travail au niveau national et à l'international d'une part et qui ont servi pour l'achat de la documentation de cette thèse.

Je remercie **Souha MANSOUR** et **Charnelle Steve MOUKETOU BEUMO** pour leur contribution dans mon travail, en particulier dans le domaine de la Chimie et pour la gentillesse, les rires et tous les beaux moments passés ensemble.

Je remercie mon fiancé **Martian ASSEKO ELLA** pour sa grande contribution à la réussite de cette thèse.

Je remercie Florent **THÉVENON**, Lucie **CAMPAGNE-MINA**, Solène **GALINIER**, Mohammed **NAFIU ADAMU**, Solotiana **RANDRIANARIVOMANANA**, Viala **MBAZOGO MENDENE**, Johnrell Samonte **ZUNIEGA**, Meriam **ALAOUI**, Diakaridia **SANGARÉ**, Lorène **AKISSOÉ**, Myriam **JIMENEZ**, Fabrice **CHIMI**, Becaye **DIONE**, Kelly **WEN YEE**, Mourad **HANNAJ** et Landry **KOFFI** pour leur gentillesse sans mesure et leur bonne humeur.

Pour finir, je remercie l'**Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG)** pour le financement de cette thèse.

Résumé

Un arbre a besoin de lumière pour sa croissance et son développement. Il existe cependant chez certaines espèces la capacité, ou préférence, à tolérer l'ombrage sans que cela soit préjudiciable à leur développement. Cette préférence écologique induit différentes stratégies chez ces espèces qui se traduisent par un compromis, entre performance et sécurité, dans la réalisation des fonctions de soutien mécanique, de conduction et de protection contre les bioagresseurs. Le regroupement des essences forestières partageant des stratégies de croissance communes est essentiel pour une utilisation judicieuse, responsable et rentable du bois. L'étude des stratégies écologiques et des traits fonctionnels associés permet en effet de mieux comprendre la biodiversité mais également l'élaboration de la qualité du bois au sens des propriétés technologiques utiles pour l'Homme. Trois stratégies écologiques liées au tempérament vis-à-vis de la lumière ont été étudiées. Elles comprennent des espèces exigeantes en lumière (pionnière), des espèces poussant en plein soleil mais pouvant supporter l'ombre de façon temporaire (hémi-héliophile) et des espèces capables de croître avec un faible apport de lumière (tolérantes à l'ombre). Les espèces étudiées sont des feuillus tropicaux du Gabon ayant été testés en laboratoire et caractérisés sur les plans anatomique, physique, mécanique et chimique. Les méthodes utilisées englobent des méthodes académiques et des nouvelles méthodes rapides et non destructives de détermination des propriétés du bois. Les résultats obtenus ont dans un premier temps été comparés aux résultats de la base de données physique et mécanique du CIRAD en lien avec l'écologie des espèces. Des similitudes et quelques différences ont été observées. Dans un second temps, des mises en relations entre l'anatomie, la chimie, la physique et la mécanique du bois ont été réalisées. Les résultats montrent que les espèces d'ombre ont de meilleures performances physique et mécanique et donc un meilleur soutien mécanique. Elles ont en plus une faible anisotropie qui traduit une bonne stabilité dimensionnelle. Ces performances élevées sont liées à leurs parois très épaisses, leurs nombreux vaisseaux, des diamètres de vaisseaux plus petits que ceux des hémi-héliophiles, leur densité de bois élevée et des taux de lignine et d'hémicelluloses importants. La densité élevée de ces espèces est liée à leurs parois très épaisses. Ces espèces peuvent être utilisées en ingénierie des matériaux dans les constructions lourdes ou les structures porteuses et dans les conceptions esthétiques par exemple. Il a été trouvé une quantité significative d'extractibles chez les espèces pionnières par rapport aux espèces hémi-héliophiles, ce qui leur confère une bonne protection contre les bio-agresseurs. Elles pourraient de ce fait être utilisées pour des constructions en extérieur. Cependant, elles étaient plus sensibles aux variations

dimensionnelles dues aux variations d'humidité. Il n'y avait pas de différence significative entre les quantités d'extractibles des espèces pionnières et des espèces tolérantes à l'ombre. Dans l'ensemble, les espèces hémi-héliophiles n'étaient pas statistiquement différentes des espèces pionnières et tolérantes à l'ombre. Aucune différence significative n'ont été mise en évidence entre les longueurs des fibres et la teneur en cellulose des trois tempéraments. Des espèces secondaires moins connues tolérantes et intolérantes à l'ombre ont pu être identifiées comme potentielles substituts des espèces fortement exploitées au regard de la qualité de leur bois.

Mot clés : Feuillus tropicaux ; Stratégies de croissance ; Traits fonctionnels ; Tempérament écologique ; Tolérance à l'ombre ; Propriétés du bois.

Abstract

Trees need light for their growth and development. However, some species have the capacity, or preference, to tolerate shade without this being detrimental to their development. This ecological preference leads to different strategies in these species, resulting in a compromise between performance and safety, in terms of mechanical support, conduction and protection against bio-aggressors. Grouping together forest species that share common growth strategies is essential if wood is to be used wisely, responsibly and profitably. The study of ecological strategies and associated functional traits provides a better understanding not only of biodiversity but also of the development of wood quality in terms of technological properties useful to man. Three ecological strategies linked to light temperament were studied. They include species that are light-demanding (pioneer), species that grow in full sun but can tolerate temporary shade (hemi-heliophilous) and species that can grow with little light (shade-tolerant). The species studied are tropical hardwoods from Gabon that have been tested in the laboratory and characterised anatomically, physically, mechanically and chemically. The methods used include academic methods and new rapid, non-destructive methods for determining wood properties. The results obtained were first compared with the results of CIRAD's physical and mechanical database in relation to the ecology of the species. Similarities and some differences were observed. Secondly, relationships were established between the anatomy, chemistry, physics and mechanics of wood. The results show that shade species have better physical and mechanical performance and therefore better mechanical support. They also have low anisotropy, which translates into good dimensional stability. This high performance is linked to their very thick walls, numerous vessels, smaller vessel diameters than hemi-heliophiles, high wood density and high levels of lignin and hemicelluloses. The high density of these species is linked to their very thick walls. These species can be used in materials engineering in heavy construction or load-bearing structures and in aesthetic design, for example. Pioneer species were found to have a significant amount of extractables compared with hemi-heliophilous species, giving them good protection against bio-aggressors. They could therefore be used for outdoor constructions. However, they were more sensitive to dimensional variations due to variations in humidity. There was no significant difference between the extractives content of pioneer and shade-tolerant species. Overall, hemi-heliophilous species were not statistically different from pioneer and shade-tolerant species. No significant differences were found between the fibre lengths and cellulose content of the three temperaments. Lesser-known

shade-tolerant and shade-intolerant secondary species were identified as potential substitutes for heavily exploited species in terms of the quality of their wood.

Key words: Tropical hardwoods; Growth strategies; Functional traits; Ecological temperament; Shade-tolerance; Wood properties.

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	<i>iii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>v</i>
<i>Résumé</i>	<i>viii</i>
<i>Abstract</i>	<i>x</i>
<i>Table des matières</i>	<i>xiii</i>
<i>Table des figures</i>	<i>xvi</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xx</i>
<i>Unités de mesure utilisées</i>	<i>xxiii</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>xxiv</i>
<i>Introduction Générale</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre 1</i>	<i>5</i>
<i>1 Étude bibliographique</i>	<i>6</i>
1.1 Introduction	6
1.2 Caractéristiques fonctionnelles du bois et tolérance à l'ombre d'arbres présentant des stratégies de croissance différentes	7
1.2.1 Croissance des arbres	7
1.2.1.1 Croissance en hauteur	8
1.2.1.2 Croissance en diamètre	9
1.2.2 Conditions de croissance	10
1.2.2.1 La lumière	10
1.2.2.2 Le vent	12
1.2.2.3 La disponibilité de l'eau, les caractéristiques du sol et les nutriments	14
1.2.3 Traits fonctionnels et stratégies écologiques des espèces d'arbres	17
1.2.3.1 Traits fonctionnels de soutien mécanique	17
1.2.3.2 Traits fonctionnels de conduction	19
1.2.3.3 Traits fonctionnels de protection	21
1.3 Synthèse et orientation des travaux de thèse	23
<i>Chapitre 2</i>	<i>26</i>
<i>2 Matériels et méthodes</i>	<i>27</i>
2.1 Analyse de la base de données physico-mécanique du CIRAD	27
2.1.1 Mode opératoire	27
2.1.2 Principe et analyse	29
2.2 Échantillonnage de la thèse	30
2.2.1 Identification et prélèvement du matériel végétal	30
2.2.2 Protocole de découpe et usinage	33

2.3	Essais de caractérisation physico-mécanique	35
2.3.1	Essais de rupture	35
2.3.1.1	Rupture en compression axiale	35
2.3.1.2	Rupture en cisaillement longitudinal	36
2.3.1.3	Rupture en flexion dynamique	37
2.3.2	Essais de rigidité	38
2.3.2.1	Détermination du module d'élasticité longitudinal	38
2.3.2.2	Détermination de l'angle des microfibrilles	40
2.3.3	Essais hygroscopiques	42
2.4	Essais de caractérisation anatomique	45
2.4.1	Longueur des fibres : dilacération	45
2.4.2	Caractéristiques des vaisseaux et des parois des fibres	46
2.5	Détermination de la composition chimique via la spectroscopie proche infrarouge	51
2.5.1	Obtention des spectres	51
2.5.2	Traitements des spectres	53
2.6	Méthodes statistiques utilisées	54
2.6.1	Logiciel utilisé	54
2.6.2	Tests non paramétriques	54
2.6.3	Tests post-hoc	55
2.6.4	Analyse en composantes principales (ACP)	55
2.6.5	Modèle de discrimination PLS-DA	55
Chapitre 3		57
3	Résultats et analyses	58
3.1	Analyse de la base de données physico-mécanique du CIRAD en relation avec le tempérament écologique	58
3.2	Liens entre caractérisation physico-mécanique et tempérament écologique	65
3.3	Comparaisons entre la base de données du CIRAD et les propriétés physico-mécaniques expérimentales	74
3.4	Caractéristiques anatomiques des espèces en fonction du tempérament écologique	78
3.5	Variation de la composition chimique en fonction du tempérament écologique	84
3.6	Propriétés physico-mécaniques en relation avec les caractéristiques anatomiques des espèces	93
3.7	Propriétés physico-mécaniques en relation avec la composition chimique des espèces	100
3.8	Relation entre composition chimique et caractéristiques anatomiques	106
3.9	Synthèse	110
Chapitre 4		112

4	<i>Discussion</i>	113
4.1	Statistiques descriptives et Corrélations entre les propriétés	113
4.2	Anatomie du bois en lien avec le tempérament écologique des arbres	119
4.3	Composition chimique du bois en fonction du tempérament écologique des arbres	121
4.4	Propriétés physico-mécaniques et relations avec l'anatomie et la composition chimique du bois en fonction du tempérament écologique	123
	<i>Conclusion Générale</i>	131
	<i>Perspectives</i>	134
	<i>Références bibliographiques</i>	136
	<i>Annexe</i>	I
A.	<i>Statistiques descriptives par espèces</i>	I
B.	<i>Identification et prélèvement des plateaux au parc à bois du CIRAD</i>	XI
C.	<i>Traçage des éprouvettes sur les plateaux</i>	XII
D.	<i>Traçabilité des éprouvettes par des scans des plateaux après traçage</i>	XIII
E.	<i>Liste des publications</i>	XIV
F.	<i>Arrêté ministérielle classant les essences gabonaises des plus commercialisés au moins connues</i>	XVI

Table des figures

Figure 1.1 : Image révisée. Schéma du développement des plantes par croissances primaire et secondaire, d'après Moulia (2006) dans (Rodriguez, 2010).	7
Figure 1.2 : Croissance en hauteur.	8
Figure 1.3 : Structure du bois. Mise en évidence du cambium (Montero, 2011).	9
Figure 1.4 : Comparaison de la photosynthèse des plantes de lumière et des plantes d'ombre. IC : intensité de compensation ; IS : intensité saturante ; Φ : rendement quantique foliaire ; RO : intensité respiratoire à l'obscurité. Plante d'ombre en bleu et Plante de lumière en rouge (Prat & Moreau, 2001).	10
Figure 1.5 : Croquis des trois principales conditions de charge : a : forces latérales du vent, b : forces gravitationnelles, et c : flexion jusqu'à un angle critique (Lichtenegger et al., 1999).	14
Figure 1.6 : Vue macroscopique du bois de réaction chez un résineux et un feuillu ; a : bois de compression chez <i>Pinus</i> sp. ; notez que la moelle n'est pas au centre du tronc, et que les cernes de croissance sont beaucoup plus larges dans la zone de bois de compression, b : bois de tension chez <i>Juglans nigra</i> ; la moelle est presque au centre du tronc, mais les cernes de croissance sont plus larges dans la zone de bois de tension (Wiedenhoef & Miller, 2005).	14
Figure 1.7 : Image révisée. Les surfaces d'échanges nutritifs des plantes (Banque de schémas de Dijon, 2024).	17
Figure 1.8 : Stress hydrique et sécheresse : les arbres contraints de s'adapter (ONF, 2024).	21
Figure 2.1 : Protocole de découpe des éprouvettes.	33
Figure 2.2 : Banc d'essai de compression.	36
Figure 2.3 : Dispositif expérimental de l'essai de cisaillement.	37
Figure 2.4 : Dispositif de rupture en flexion dynamique.	38
Figure 2.5 : Dispositif expérimental de l'essai de détermination du module d'élasticité longitudinal.	40
Figure 2.6 : Diffractomètre Oxford-Diffraction pour la détermination des angles des microfibrilles (AMF).	42
Figure 2.7 : Conditionnement des éprouvettes destinées aux calculs des retraits et PSF.	43
Figure 2.8 : Mesure des éprouvettes de retraits.	43
Figure 2.9 : Détermination du PSF par régression linéaire.	44
Figure 2.10 : Détermination des longueurs des fibres.	45
Figure 2.11 : Mesures des longueurs des fibres. L : longueur mesurée en mm (pointillés vert).	46
Figure 2.12 : Ramollissement des éprouvettes.	47
Figure 2.13 : Découpage des éprouvettes au microtome à bois.	48
Figure 2.14 : Coloration des coupes et préparation des lames.	49
Figure 2.15 : Utilisation du microscope numérique Keyence pour la création d'images microscopiques.	49
Figure 2.16 : Mesures des caractéristiques anatomiques sous le logiciel imageJ. (a) Mesures des diamètres radial et tangentiel des vaisseaux. (b) Détermination du nombre de vaisseaux par unité de surface. (c) Mesures des épaisseurs radiale et tangentielle des parois des fibres. $diam_{tang}$ et $epais_{tang}$ correspondent respectivement aux diamètre et épaisseur tangentiels ; $diam_{rad}$ et $epais_{rad}$ représentent respectivement les diamètres radiaux et les épaisseurs radiales.	51

Figure 2.17 : Obtention des spectres de bois par spectroscopie proche infrarouge. _____ 52

Figure 3.1 : Corrélogrammes des propriétés physico-mécaniques de la base de données du CIRAD. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq + 0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix. RT/RR : anisotropie du retrait ; EL/ ρ : module spécifique ; PSF : point de saturation des fibres ; RR : retrait radial ; RV : retrait volumétrique ; RT : retrait tangentiel ; W : énergie absorbée en flexion dynamique ; EL : module d'élasticité ; σ' : contrainte de rupture en compression parallèle ; σ_f : contrainte de rupture en flexion statique ; ρ : densité ; D : dureté ; τ : résistance au cisaillement longitudinal ; Fend : résistance au fendage ; σ_t : résistance à la traction perpendiculaire. _____ 60

Figure 3.2 : Distribution des propriétés de la base de données du CIRAD statistiquement significatives en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre. _____ 62

Figure 3.3 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre la densité du bois et les propriétés mécaniques de la base de données du CIRAD (a et b) ; Évolution de la dureté en fonction de la densité du bois suivant le tempérament écologique (c). _____ 64

Figure 3.4 : Corrélogrammes des propriétés physico-mécaniques des nouveaux essais. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq + 0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix. RT/RR : anisotropie du retrait ; EL/ ρ : module spécifique ; PSF : point de saturation des fibres ; RR : retrait radial ; RT : retrait tangentiel ; W : énergie absorbée en flexion dynamique ; EL : module d'élasticité ; σ' : contrainte de rupture en compression parallèle ; ρ : densité ; τ : résistance au cisaillement longitudinal et AMF : angle des microfibrilles. _____ 68

Figure 3.5 : Distribution des propriétés physico-mécaniques statistiquement significatives des nouveaux essais en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre. _____ 71

Figure 3.6 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre la densité du bois d'une part et l'AMF et d'autre part et les propriétés physico-mécaniques des nouveaux essais. _____ 73

Figure 3.7 : Distribution des propriétés statistiquement significatives de la base de données du CIRAD pour les mêmes espèces que celles des nouveaux essais en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre. _____ 77

Figure 3.8 : Corrélogramme des caractéristiques anatomiques du bois. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq + 0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix. epais : épaisseur ; moy : moyen ou moyenne ; rad : radial(e) ; tang : tangentiel(le) ; LF : longueur des fibres ; diam : diamètre ; vais : vaisseau ; nb : nombre. _____ 80

Figure 3.9 : Régressions linéaires entre les caractéristiques anatomiques en fonction du tempérament écologique. _____ 81

Figure 3.10 : Distribution des caractéristiques anatomiques statistiquement significatives en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre. _____ 83

Figure 3.11 : Spectre d'absorption et dérivées secondes. (a) et (a') spectres d'absorption de tous les échantillons et spectres en fonction du tempérament écologique respectivement. (b) et (b') Dérivées secondes des spectres d'absorption de tous les échantillons et moyenne des spectres des dérivées secondes en fonction du tempérament écologique. P : espèce pionnière ; HH : espèce hémi-héliophile et TO : espèce tolérante à l'ombre. _____ 85

Figure 3.12 : Analyse en composantes principales (ACP). Dim1 : Dimension 1 ; Dim2 : Dimension 2. P : espèce pionnière ; HH : espèce hémi-héliophile et TO : espèce tolérante à l'ombre. _____ 86

Figure 3.13 : (a) Spectres moyens des différences de dérivées secondes entre les tempéraments écologiques par paires. (b) Coefficients de régression de la 1ère composante des analyses PLS-DA des trois tempéraments écologiques P (pionnier), HH (hémi-héliophile) et TO (tolérant à l'ombre). _____ 87

Figure 3.14 : Distribution des composés chimiques statistiquement significatifs en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre _____ 90

Figure 3.15 : Corrélogramme des relations entre les composés chimiques du bois (corrélations rho de Spearman). Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq + 0.5$ et $\rho \leq -0.5$. Ext : extractibles ; Cell : cellulose ; Hem : hémicelluloses et Lig : lignine. _____ 90

Figure 3.16 : Régressions linéaires entre les composés chimiques en fonction du tempérament écologique. _____ 91

Figure 3.17 : Résultats de la PLS-DA avec 10 composantes principales. Ind : indéterminé et obs. : observations. P : espèce pionnière ; HH : espèce hémi-héliophile et TO : espèce tolérante à l'ombre. _____ 92

Figure 3.18 : Distribution du cisaillement longitudinal et du retrait radial en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre. _____ 94

Figure 3.19 : Corrélogrammes des relations entre l'anatomie et les propriétés physico-mécaniques. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq + 0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix. _____ 95

Figure 3.20 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre les caractéristiques anatomiques et les propriétés physico-mécaniques du bois. _____ 98

Figure 3.21 : Corrélogramme des relations entre la composition chimique et les propriétés physico-mécaniques. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq + 0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix. _____ 102

Figure 3.22 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre la composition chimique et les propriétés physico-mécaniques du bois. _____ 104

Figure 3.23 : Corrélogrammes des propriétés entre la composition chimique et l'anatomie du bois. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq + 0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix. _____ 107

Figure 3.24 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre la composition chimique et les caractéristiques anatomiques du bois. _____ 109

<i>Figure 3.25 : Principaux résultats des espèces en fonction du tempérament écologique. P : pionnier, HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre.</i>	<u>111</u>
<i>Figure B.1 : Prélèvement des plateaux.</i>	<u>XI</u>
<i>Figure C.1 : Exemple de traçage d'éprouvettes sur le plateau avant usinage.</i>	<u>XII</u>
<i>Figure D.1 : Exemples de scans de plateaux après traçage des éprouvettes</i>	<u>XIII</u>
<i>Image 2.1 : Identification et prélèvement des arbres.</i>	<u>32</u>
<i>Image 2.2 : Traçage des éprouvettes sur les plateaux et prélèvement des ébauches.</i>	<u>33</u>

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Syndrome des caractères des espèces d'arbres pionniers dans les forêts tropicales humides. Tous les pionniers ne possèdent pas tous les caractères iii-xvi (Swaine & Whitmore, 1988). _____ 12

Tableau 1.2: Propriétés mécaniques et architecturales des espèces d'arbres tolérantes à l'ombre TO (n=20) et pionnières P (n=10) de la forêt tropicale. Les valeurs moyennes (\pm écart-type), les résultats du test t (t) et les niveaux de significativité (p) sont indiqués. ns, non significatif ; $p > 0,05$; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$. Densité sèche verticale (du tronc): déterminée comme le rapport du poids sec (après séchage à 70°C) et du volume vert. Adapté de Van Gelder et al., (2006). _____ 18

Tableau 2.1: Espèces étudiées et tempéraments écologiques associés. N : nombre d'arbre par espèce ; Temp : Tempérament écologique. _____ 28

Tableau 2.2: Espèces étudiées pour les caractérisations physico-mécanique et chimique et les tempéraments écologiques associés. N : nombre d'arbre par espèce ; N_{moy} : nombre d'échantillons moyen par arbre ; N_{tot} : nombre total d'échantillons par espèce ; Temp : Tempérament écologique. _____ 30

Tableau 2.3 : Espèces retenues pour la détermination des caractéristiques anatomiques et tempéraments écologiques associés. N_{tot} : nombre total d'échantillons par espèce ; Temp : Tempérament écologique. _____ 34

Tableau 3.1: Statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques de la base de données du CIRAD en fonction du tempérament écologique. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation. RT/RR : anisotropie du retrait ; EL/ ρ : module spécifique ; PSF : point de saturation des fibres ; RR : retrait radial ; RV : retrait volumétrique ; RT : retrait tangentiel ; w : énergie absorbée en flexion dynamique ; EL : module d'élasticité ; σ' : contrainte de rupture en compression parallèle ; σ_f : contrainte de rupture en flexion statique ; ρ : densité ; D : dureté ; τ : résistance au cisaillement longitudinal ; Fend : résistance au fendage ; σ_t : résistance à la traction perpendiculaire. _____ 58

Tableau 3.2: Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les propriétés de la base de données du CIRAD, montrant l'importance des différences dans les profils écologiques des arbres étudiés. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre. _____ 61

Tableau 3.3: Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les propriétés physico-mécaniques de la base de données du CIRAD et la densité du bois. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. _____ 65

Tableau 3.4: Statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques obtenus lors d'une nouvelle campagne d'essais en fonction du tempérament écologique. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation. RT/RR : anisotropie du retrait ; EL/ ρ : module spécifique ; PSF : point de saturation des fibres ; RR : retrait radial ; RT : retrait tangentiel ; W : énergie absorbée en flexion dynamique ; EL : module d'élasticité ; σ' : contrainte de rupture en compression parallèle ; AMF : angle des microfibrilles ; ρ : densité et τ : résistance au cisaillement longitudinal. _____ 66

Tableau 3.5: Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les propriétés physico-mécaniques des nouveaux essais, montrant l'importance des différences dans les profils écologiques des arbres étudiés. ns : non significatif ; significativité

des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héli-héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre. _____ 69

Tableau 3.6 : Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les propriétés physico-mécaniques de la nouvelle campagne d'essais et la densité du bois. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. _____ 73

Tableau 3.7 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn de la base de données du CIRAD sur les mêmes espèces que celles testées lors des nouveaux essais. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héli-héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre. _____ 75

Tableau 3.8 : Statistiques descriptives des caractéristiques anatomiques en fonction du tempérament écologique. LF : longueur des fibres ; nb_vais/mm² : fréquence des vaisseaux ; diam_tang_moy_vais : diamètre tangentiel moyen des vaisseaux ; diam_rad_moy_vais : diamètre radial moyen des vaisseaux ; diam_moy_vais : moyenne des différents diamètres des vaisseaux ; epais_tang_moy_paroï : épaisseur tangentielle moyenne des parois des fibres ; epais_rad_moy_paroï : épaisseur radiale moyenne des parois des fibres ; epais_moy_paroï : moyenne des différentes épaisseurs des parois des fibres ; m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation. _____ 79

Tableau 3.9 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les caractéristiques anatomiques du bois, montrant l'importance des différences dans les profils écologiques des arbres étudiés. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héli-héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre. _____ 82

Tableau 3.10 : Gamme d'absorption SPIR associées aux principaux composants chimiques contenus dans les échantillons de bois. OT : harmonique, str : vibration d'étirement, def : vibration de déformation, asym : antisymétrique et tous : tous les composants. _____ 88

Tableau 3.11 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur la composition chimique, montrant les différences de concentrations entre les tempéraments écologiques des arbres étudiés. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héli-héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre. _____ 89

Tableau 3.12 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les propriétés physico-mécaniques et l'anatomie du bois sur des données réduites (n=90). ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héli-héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre. _____ 93

Tableau 3.13 : Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les propriétés physico-mécaniques et l'anatomie du bois. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. _____ 99

Tableau 3.14 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les propriétés physico-mécaniques et la composition chimique du bois. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héli-héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre. _____ 100

Tableau 3.15 : Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les propriétés physico-mécaniques et la composition chimique du bois. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. _____ 105

Tableau 3.16 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur la composition chimique et les caractéristiques anatomiques (n=90). ns : non

significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre. _____107

Tableau 3.17 : Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les caractéristiques anatomiques et la composition chimique du bois. ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. _____110

Tableau A.1 : Statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques de la base de données du CIRAD en fonction des espèces. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation et NA : données manquantes. _____ I

Tableau A.2 : Statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques des nouveaux essais en fonction des espèces. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation. _____ V

Tableau A.3 : Statistiques descriptives des caractéristiques anatomiques étudiées en fonction des espèces. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation. _____ VIII

Tableau A.4 : Statistiques descriptives de la composition chimique des espèces. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation. _____ X

Unités de mesure utilisées

g	Gramme
ml	Millilitre
nm	Nanomètre
cm	Centimètre
m	Mètre
μm	Micromètre
J	Joule
MPa	Mégapascal
N/mm	Newton par millimètre
s	Seconde
mm	Millimètre
kg	Kilogramme
mA	Milliampère
keV	Kiloélectronvolt

Liste des abréviations

a	Longueurs des éprouvettes
ACP	Analyse en composantes principales
A_i	Vecteur
a_i	Moyenne de réponse du vecteur A_i
AMF	Angle des microfibrilles de cellulose
ANCOVA	Analyse de covariance
ANOVA	Analyse de variance
asym	Antisymétrique
b	Largeurs des éprouvettes
BING	Beam Identification by Non-Destructive Grading
Cell	Cellulose
CTFT	Centre Technique Forestier Tropical
cv	Coefficient de variation
d	Distance inter réticulaire
D	Dureté de Monnin ou de Chalais Meudon
def	Vibration de déformation
diam	Diamètre
Dim	Dimension
DRX	Diffraction de rayons X
e	Épaisseur de l'éprouvette
E	Module d'élasticité
E_L/ρ	Module spécifique ou rigidité de la paroi
epais	Épaisseur
et al.	Et autres
Ext	Extractibles
f	Fréquence de vibration
F	Charge maximale
Fend	Résistance au fractionnement
FFT	Transformée de Fourier Rapide
G	Module de cisaillement
Hem	Hémicelluloses
HH	Hémi-héliophile
HR	Humidité relative de l'air
H_r	Humidité réelle de l'éprouvette
H_t	Humidité théorique de l'éprouvette
I	Moment quadratique
IC	Intensité de compensation
IS	Intensité saturante
K	Facteur de forme
L	Longueur de la poutre de détermination du module d'élasticité
LF	Longueur des fibres
Lig	Lignine
L_{OR}	Dimension radiale de l'éprouvette à l'état anhydre
L_{OT}	Dimension tangentielle de l'éprouvette à l'état anhydre
L_{SR}	Dimension radiale de l'éprouvette à l'état saturé
L_{ST}	Dimension tangentielle de l'éprouvette à l'état saturé

M	Masse de l'éprouvette
m	Moyenne statistique
M ₀	Masse à l'état anhydre
M _{Ht}	Masse à l'humidité théorique
moy	Moyen(ne)
N	Nombre d'arbre par espèce
n	Nombre d'échantillon
N_moy	Nombre d'échantillon moyen par arbre
N_tot	Nombre d'échantillon par espèce
NA	Données manquantes
nb_vais/mm ²	Nombre de vaisseaux par unité de surface
ns	Non significative
OT	Harmonique
P	Pionnière
p	Nombre de longueur d'onde
P1	Okoumé et Ozigo
P2	Autres bois faciles à commercialiser
paroi	Parois des fibres
PLS-DA	Analyse discriminante par moindres carrés partiels
PSF	Point de saturation des fibres
rad	Radial(e)
rho	Corrélation de Spearman
RO	Respiration
R _R	Retrait radial total
R _T	Retrait tangentiel total
R _T /R _R	Anisotropie des retraits
R _V	Retrait volumique total
S	Aire de la section droite
S	Bois peu connus à promouvoir
sd	Écart-type
SNV	Standard Normal Variate
SPIR	Spectroscopie proche infrarouge
spp.	Toutes les espèces ni encore identifiées ni nommées
str	Vibration d'étirement
T	Demi-largeur du pic de diffraction
tang	Tangentiel(le)
Temp	Tempérament écologique
TO	Tolérant à l'ombre
vais	Vaisseaux
W	Énergie libérée en flexion dynamique
X _n	Solution de Bernoulli
α	Facteur d'élanement
θ	Angle de Bragg
λ	Longueur d'onde des rayons X
ρ	Densité du bois
σ'	Contrainte de rupture en compression axiale
σ _f	Contrainte de rupture en flexion 3 points
σ _t	Contrainte de rupture en traction perpendiculaire
τ	Cisaillement longitudinal
φ	Rendement quadratique foliaire

Introduction Générale

Les arbres peuvent être regroupés en deux grandes familles que sont les résineux et les feuillus. Les feuillus constituent la plus grande partie des espèces végétales terrestres avec une structure cellulaire plus complexe que celle des résineux (Lecointre & Le Guyader, 2017). Cette structure se compose de cellules variées telles que les vaisseaux, les fibres, les rayons ligneux et les parenchymes. La caractéristique première des feuillus est la présence de cellules spécialisées pour le transport de la sève brute à savoir les vaisseaux. Le rôle des vaisseaux dans la conduction de la sève est déterminant pour la croissance de ce type d'arbre. De façon générale, lorsque les arbres croissent, ces derniers adoptent différentes stratégies selon l'essence considérée, nécessaires à leur développement, leur reproduction et leur survie en fonction de leur environnement ambiant (Favrichon, 1994; González-Melo, 2022). Le bois produit par les arbres représente une ressource renouvelable, écologique et précieuse pour toute une série d'applications finales. Les stratégies des arbres peuvent avoir un impact sur la qualité du bois produit (Arnaud et al., 2019; Larson, 1962; Van Gelder et al., 2006). La qualité d'un bois peut être déterminée notamment par l'analyse de ses propriétés physiques, mécaniques, anatomiques et chimiques. Le déterminisme de cette qualité est une question scientifique qui intéresse directement les industriels de la filière bois en particulier au Gabon où une poignée d'essence est fortement exploitée malgré une énorme diversité spécifique. Ce qui pourrait engendrer un déséquilibre écologique. La stratégie de croissance des arbres à laquelle nous nous intéressons est liée au tempérament écologique ou tempérament vis-à-vis de la lumière. Le tempérament écologique peut être défini comme un ensemble de stratégies choisies par les arbres pour croître, survivre et se reproduire dans des conditions de lumière particulières en fonction du stade de développement (Oldeman & Van Dijk, 1991). Pour certaines espèces, il reste le même durant toute la croissance et pour d'autres, celui-ci évolue vers un autre tempérament répondant aux nouveaux besoins de l'arbre (Oldeman & Van Dijk, 1991). La notion de tempérament écologique est peu courante dans la littérature et la plupart des mots clés y afférents tels que tolérance à l'ombre, pionnier et héliophile par exemple sont source de quelques controverses. De façon générale, ces polémiques portent sur la dénomination des termes et le nombre de groupes écologiques (Blanc et al., 2003; Meunier et al., 2015; Oldeman & Van Dijk, 1991; Swaine & Whitmore, 1988). De plus, les critères servant pour la définition de ceux-ci ne sont pas toujours les mêmes. Toutefois, plusieurs auteurs proposent de se référer à l'environnement

Introduction Générale

lumineux des espèces afin de les assigner à des tempéraments (Bongers & Sterck, 1998; Clark & Clark, 1992; Favrichon, 1994; King, 1991; Mađerek et al., 2017; Schmitt et al., 2022; Sterck & Bonger, 1998). Les espèces ont été réparties en trois tempéraments écologiques dans cette thèse. La classification utilisée est celle de Meunier et al., (2015) pour 13 des 25 espèces étudiées. Pour les 12 autres, la base de données d'informations sur les caractères des plantes africaines du CIRAD (Bénédet et al., 2019) a été utilisée compte tenu de l'absence d'informations chez Meunier et al., (2015). Il existe plusieurs études en lien avec le tempérament écologique des espèces dans la littérature (Adler et al., 2014; Bianchi et al., 2021; Brym et al., 2011; Cheng et al., 2022; Del Tredici, 2001; Han et al., 2022; Kolb et al., 1990; Loehle, 1988; Zimmermann & Brown, 1971). Cependant, pour les espèces tropicales en générale et les espèces gabonaises en particulier, les travaux sont peu nombreux au regard de la grande diversité que renferment ces zones (Arnaud et al., 2019; González-Melo, 2022; Han et al., 2022; Nock et al., 2009; Schmitt et al., 2022; Zue Ondo et al., 2021).

Malgré le nombre important d'études recensé, d'un point de vue physique et mécanique, la plupart concerne la densité du bois (Hoeber et al., 2014; Lehnebach et al., 2019; Poorter et al., 2012; Rüger et al., 2012; Van Gelder et al., 2006). Ces études stipulent que les espèces d'ombre sont plus denses que les espèces de lumière (Adler et al., 2014; Lawton, 1984; Muller-Landau, 2004; Osunkoya et al., 2007; Thomas, 1996). Quelques études concernent les propriétés de résistances mécaniques (Alvarez-clare, 2005; Cooley et al., 2004; Van Gelder et al., 2006). C'est le cas par exemple de la thèse de doctorat de Alvarez-clare (2005) dans laquelle une analyse du module d'élasticité et de la résistance à la rupture a permis de mettre en évidence des différences de résistances des tiges en fonction de la tolérance à l'ombre des espèces. Dans une autre étude de Van Gelder et al., (2006), la densité du bois, le module de rupture, le module d'élasticité et les facteurs de sécurité pour le flambage et la flexion avaient été déterminés et reliés à la demande de lumière pour 30 espèces d'arbres de la forêt tropicale bolivienne. De façon globale, les propriétés étudiées dans ces études sont souvent les mêmes et leur nombre très limité. En ce qui concerne le retrait du bois par exemple, nous n'avons trouvé aucune étude qui fasse le lien avec le tempérament écologique.

D'un point de vue chimique, il existe plusieurs travaux sur la caractérisation chimique des espèces à travers des méthodes coûteuses en temps telles que des analyses de fibres, des analyses LC-MS et des extractions au soxhlet notamment (Heim et al., 2022; Ruiz-aquino et al., 2019; Salih et al., 2017; Shebani et al., 2008). D'autre part, un grand nombre de publications soulignent le potentiel de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) pour la caractérisation chimique et l'identification du bois dans un large éventail d'utilisations (Brunner et al., 1996;

He & Hu, 2013; Lazarescu et al., 2017; Lima et al., 2022; Ma et al., 2019; Schwanninger et al., 2011). En guise d'exemple, on peut citer la synthèse de Schwanninger et al., (2011) qui a permis de faire le lien entre un nombre important de longueurs d'onde et les principaux composés chimiques du bois. Cependant, les études sur la caractérisation chimique des arbres en fonction de leur tempérament écologique sont rares (Cuzzuol et al., 2020, 2022; Hussain et al., 2019; Niinemets & Kull, 1998). La composition chimique du bois étant dépendante de l'espèce, du genre, de la famille botanique et de la provenance par exemple (Heim et al., 2022; Stevanovic & Perrin, 2009), il est logique qu'elle soit également fonction du tempérament écologique. Bien que la caractérisation chimique des espèces soit devenue plus facile et rapide grâce à la SPIR, les espèces d'arbres restent très nombreuses et de nouvelles espèces continuent d'être découvertes. Une caractérisation par espèce constitue alors un challenge difficile à relever. Par contre, une caractérisation de plus en plus large par tempérament écologique plutôt que par espèce, permet de dresser un portrait chimique plus global d'espèces aux stratégies écologiques communes.

Les forêts tropicales étant très vulnérables au réchauffement climatique et aux sécheresses extrêmes (Berenguer et al., 2021; Brienen et al., 2015; Doughty & Goulden, 2008; Saatchi et al., 2021), il est par ailleurs important de bien comprendre le comportement hydraulique des arbres et identifier les espèces aux stratégies écologiques communes capables de résister à ces changements par l'analyse de leurs caractéristiques anatomiques. Des études sur les caractéristiques anatomiques liées aux fonctions de l'arbre ont été réalisées pour des espèces de différents groupes écologiques bien que celles-ci restent peu nombreuses (Apgaua et al., 2015; Ferdous et al., 2023; González-Melo, 2022; Poorter et al., 2010). Pour les arbres du Gabon, ce travail n'a jamais été réalisé.

Les objectifs de la thèse sont d'une part de comprendre les stratégies de croissance des arbres, de proposer des caractérisations à la fois chimique, anatomique, physique et mécanique en fonction du tempérament écologique en lien avec les fonctions de l'arbre, et de déterminer les liens entre les propriétés étudiées. D'autre part, d'apporter des connaissances nouvelles sur 25 feuillus tropicaux du Gabon majoritairement des essences moins connues appartenant à des groupes écologiques différents pour un large panel de propriétés technologiques. Ces connaissances doivent permettre de substituer les espèces fortement exploitées par des essences moins connues de haute qualité. L'objectif à terme permettra d'introduire les espèces moins connues qui ont été identifiées dans les programmes de boisement et de reboisement afin de satisfaire aux futures demandes de bois au Gabon, de lutter contre la déforestation et le réchauffement climatique et de participer à une bonne gestion forestière.

Introduction Générale

Cette thèse est organisée en trois grands chapitres. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les caractéristiques fonctionnelles du bois et la tolérance à l'ombre des arbres présentant des stratégies de croissance différentes. Une orientation des travaux de la thèse est donnée en fin de chapitre. Le deuxième chapitre présente de façon détaillée l'ensemble des essais effectués et protocoles utilisés pour les tests physiques, mécaniques, chimiques et anatomiques ainsi que le matériel végétal utilisé pour chaque type d'essai. Enfin, le troisième et dernier chapitre présente l'analyse de tous les résultats et la confrontation de ces résultats avec la bibliographie.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Étude bibliographique

1 Étude bibliographique

1.1 Introduction

En forêt, les arbres sont en compétition avec leurs voisins pour la lumière, l'eau et les nutriments. Cette compétition conditionne leur croissance et le fonctionnement global des écosystèmes forestiers, tant au niveau de la biodiversité que de la séquestration du carbone. Les forêts sont des éléments essentiels de la biosphère mais aussi pour les différents usages du bois par les populations humaines. Au cours de leur croissance, les arbres adoptent diverses stratégies nécessaires à leur survie à chaque stade de développement (González-Melo, 2022) en fonction de l'espèce et de son environnement ambiant. La réalisation des processus biologiques fondamentaux du cycle de vie (installation, développement, reproduction) implique en effet l'acquisition des ressources nécessaires (transfert d'énergie et des éléments constitutifs de la matière) ainsi que l'adaptation aux conditions environnementales et à leurs éventuelles variations. La variabilité des caractéristiques morphologiques et physiologiques, appelées traits fonctionnels, traduit la diversité des performances des arbres dans la réalisation de ces processus biologiques. Ces traits fonctionnels peuvent être la densité du bois, la surface foliaire spécifique (ratio entre surface et unité de masse sèche de la feuille) et la hauteur maximale (Kunstler et al., 2016). Ces performances sont évaluées par les valeurs que prennent les traits fonctionnels relatifs à chaque fonction (Violle et al., 2007) pour assurer la survie de l'arbre : conduction, soutien et protection contre les bio agresseurs (champignons, insectes). Il existe des compromis entre traits fonctionnels selon les conditions environnementales et les préférences écologiques (ou groupes écologiques) des espèces (Poorter & Kitajima, 2007). Ces compromis et valeurs que prennent les différents traits fonctionnels définissent la stratégie écologique des espèces. L'étude des stratégies écologiques est nécessaire pour mieux comprendre la biodiversité et les mécanismes ontogéniques associés, mais également pour comprendre la variabilité des propriétés du bois produit (la qualité du bois) pour ses différents usages (construction, ameublement, emballage, papier, énergie) par les populations humaines. Chez les espèces des zones tempérées, ces stratégies ont été largement étudiées jusqu'à maintenant (Adler et al., 2014; Bianchi et al., 2021; Brym et al., 2011; Cheng et al., 2022; Del Tredici, 2001; Han et al., 2022; Kolb et al., 1990; Loehle, 1988; Paluch, 2024; Pavlin et al., 2024; Zimmermann & Brown, 1971). À contrario, les connaissances en ce qui concerne les espèces tropicales restent peu nombreuses (González-Melo, 2022; Han et al., 2022; Lehnebach, 2015; Levionnois et al., 2021; Schmitt et al., 2022; Zue Ondo et al., 2021) au regard de la diversité spécifique que ces zones renferment. Ce chapitre a pour objectif de présenter les liens existants entre les

Chapitre 1 : Étude bibliographique

préférences écologiques et les principaux traits fonctionnels des espèces en mettant notamment l'accent sur les propriétés du bois. Il se compose de quatre parties principales. La première partie présente les différents types de croissance des arbres en fonction des groupes écologiques. La deuxième partie détaille la notion de groupe écologique à travers des conditions de croissance bien définies. Les liens entre traits fonctionnels et groupes écologiques sont abordés dans la troisième partie selon les différentes fonctions de soutien mécanique, de conduction et de protection de l'arbre. Enfin, une quatrième et dernière partie de ce chapitre présente une synthèse de l'étude bibliographique qui a été faite et oriente les travaux de la thèse.

1.2 Caractéristiques fonctionnelles du bois et tolérance à l'ombre d'arbres présentant des stratégies de croissance différentes

1.2.1 Croissance des arbres

Tout comme l'homme, un arbre est appelé à grandir tout au long de son processus de développement. Celui-ci se développe dans le temps et se déploie dans l'espace par la mise en place d'une structure hiérarchisée (Rodriguez, 2010). Sa croissance se fait principalement suivant deux axes à savoir en hauteur (ou en longueur) et en épaisseur (ou diamètre). Ceux-ci correspondent respectivement aux croissances primaire et secondaire (Figure 1.1). Chaque arbre suit un développement unique et tous les arbres n'ont pas la même morphologie ; certains privilégiant par exemple l'un des deux axes de croissance.

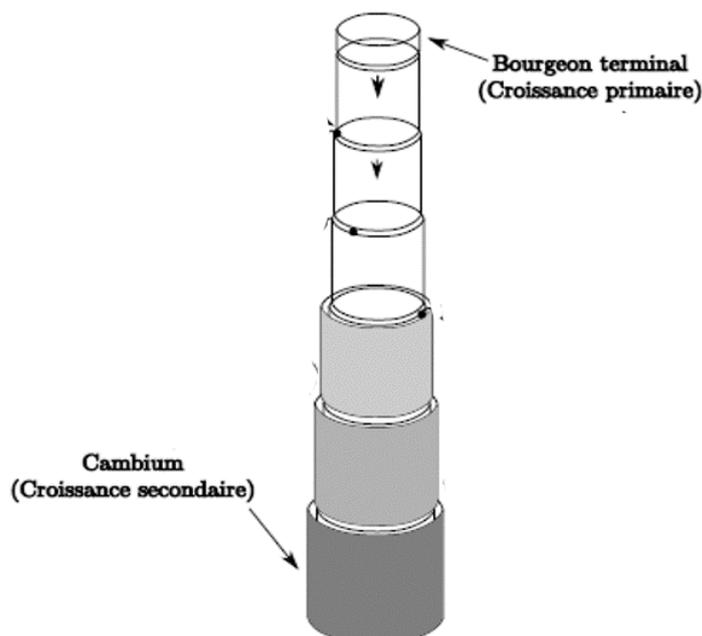


Figure 1.1 : Image révisée. Schéma du développement des plantes par croissances primaire et secondaire, d'après Moulia (2006) dans (Rodriguez, 2010).

Chapitre 1 : Étude bibliographique

1.2.1.1 Croissance en hauteur

La croissance en hauteur ou croissance primaire d'un arbre correspond à l'allongement de l'axe longitudinal de ce dernier. Elle résulte de la division cellulaire à l'extrémité des tiges. Elle a lieu au niveau du bourgeon terminal (Leroy, 2006; Rodriguez, 2010) grâce à des méristèmes apicaux primaires qui se différencieront plus tard (Baucher et al., 2007; Tognetti et al., 2017; Trouy, 2015). La croissance du bourgeon terminal (Figure 1.2) n'est pas toujours continue durant la vie de l'arbre. En effet, dans certaines formes de développement, celle-ci peut définitivement s'arrêter (Rodriguez, 2010). La mise en place de la structure primaire d'une tige se fait de telle sorte que les éléments conducteurs sont extensibles et présentent des épaissements de paroi secondaire lignifiée et discontinus (Trouy, 2015). Un arbre peut atteindre plusieurs siècles d'existence et à l'âge adulte avoir une centaine de mètre de hauteur. Chez les espèces d'ombre, on observe une croissance en hauteur lente et des hauteurs moyennes moins élevées par rapport à celles des espèces exigeantes en lumière (Petrovska et al., 2022; Schmitt et al., 2022). Plusieurs études ont en effet montré que les espèces héliophiles poussent plus rapidement et atteignent des hauteurs maximales plus élevées (Coomes & Grubb, 1998; King, 1991; Morel et al., 2018; Pavlin et al., 2024; Schmitt et al., 2022; Veneklaas & Poorter, 1998) par rapport aux espèces tolérantes à l'ombre. Ces espèces allouent plus de ressources à la formation du tronc plutôt qu'aux branches, ce qui leur permet de croître rapidement en hauteur et d'entrer en compétition pour la lumière (Poorter et al., 2012) ; ce sont des espèces de la canopée. La croissance élevée de ces espèces dans les trouées, est également favorisée par des feuilles moins développées, à courte durée de vie et physiologiquement actives (Adler et al., 2014; Poorter & Bongers, 2006). Pour les espèces tolérantes à l'ombre, la survie plutôt que la compétition pour la lumière (croissance en hauteur) représente un enjeu déterminant (Montgomery & Chazdon, 2002).

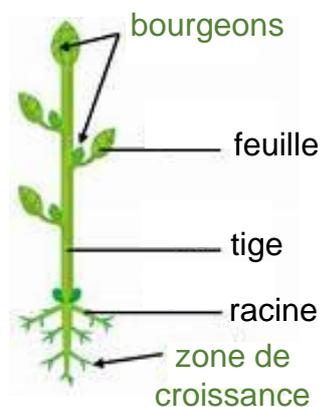


Figure 1.2 : Croissance en hauteur.

1.2.1.2 Croissance en diamètre

La croissance en diamètre ou croissance secondaire correspond à la croissance biologique qui a pour origine la division cellulaire dans les cambiums ou les méristèmes latéraux et qui entraîne l'épaississement des tiges. Ce type de croissance a lieu uniquement chez les plantes à graines. Le cambium (Figure 1.3) est une fine couche de cellules méristématiques secondaires ayant la capacité de toutes se diviser (Elo et al., 2009). C'est un élément qui reste actif tout au long de la vie de l'arbre. La formation de tissus vasculaires secondaires à partir du cambium est une caractéristique des dicotylédones et des gymnospermes. La croissance secondaire a pour but l'augmentation de la largeur de la tige plutôt que sa longueur. Tant que le cambium continue de produire de nouvelles cellules, la tige continue de croître en diamètre. Chez les plantes ligneuses, ce processus entraîne la production du bois et confère à la plante la forme d'un arbre au tronc épaissi. L'activité cambiale présente une certaine plasticité. En modifiant continuellement les propriétés du bois qu'elle forme, elle permet à l'arbre durant sa vie de s'adapter à la plupart des contraintes et variations de son environnement immédiat, y compris aux contraintes mécaniques et hydrauliques liées à sa croissance et à son poids (Agusti & Greb, 2013; Day & Greenwood, 2011). Les espèces d'ombre se distinguent des espèces héliophiles par une forte croissance radiale nécessaire à leur survie d'après Janse-Ten Klooster et al., (2007) et Poorter et al., (2012). Dans une étude de Chen et al., (2017), le diamètre moyen de quatre espèces pionnières était significativement plus faible que celui de trois espèces tolérantes à l'ombre.

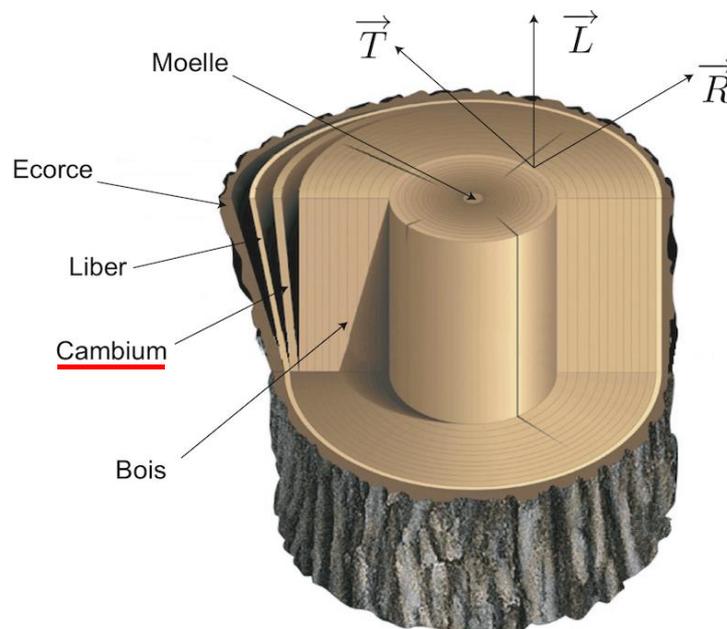


Figure 1.3 : Structure du bois. Mise en évidence du cambium (Montero, 2011).

Chapitre 1 : Étude bibliographique

1.2.2 Conditions de croissance

La croissance d'un arbre s'effectue en interaction avec son milieu ambiant (la lumière, la température, les nutriments et l'eau) (Peltola, Kilpeläinen, et al., 2002; Peltola, Miina, et al., 2002). Tous ces facteurs influencent, régulent et limitent son développement.

1.2.2.1 La lumière

L'arbre est un organisme vivant qui a besoin d'énergie pour se développer et survivre (Rüger et al., 2011). En forêt, la lumière est fortement stratifiée verticalement et hétérogène horizontalement, notamment en raison des trouées. Lorsque la lumière pénètre dans la forêt, elle se répartie en différents gradients du haut vers le bas de la canopée (Demmig-adams et al., 2017; Niinemets & Valladares, 2004). La lumière est ensuite utilisée par les arbres pour faire leur photosynthèse (Figure 1.4). La photosynthèse est fondamentale à la vie sur terre car elle capte du dioxyde de carbone et libère de l'oxygène. Selon l'espèce, la survie est possible sous une forte restriction de lumière. Certaines espèces vont en effet tolérer un certain niveau d'ombrage à un moment ou durant toute leur vie sans que cela n'altère leur développement. Ces espèces utilisent un gradient de lumière plus faible pour réaliser une photosynthèse qualifiée de minimale (Demmig-adams et al., 2017) ; ce sont des arbres de sous-bois. Plusieurs auteurs proposent d'utiliser l'environnement lumineux moyen des individus de chaque espèce afin de les caractériser (Bongers & Sterck, 1998; Clark & Clark, 1992; King, 1991; Sterck & Bongers, 1998). Le besoin en lumière serait un facteur déterminant dans la spécialisation pour un tempérament chez une espèce (Mađerek et al., 2017; Schmitt et al., 2022). Cette dépendance à la lumière permet de classer les espèces selon différents groupes écologiques.

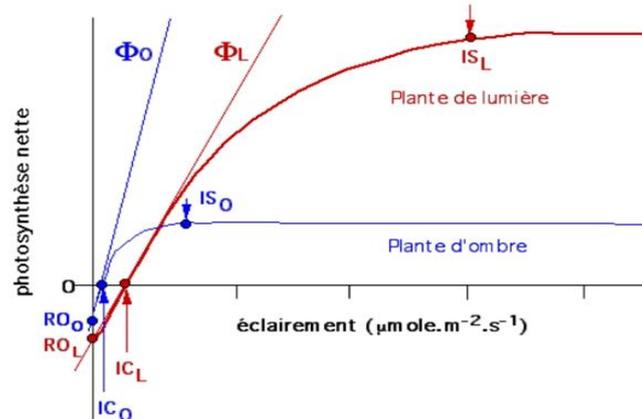


Figure 1.4 : Comparaison de la photosynthèse des plantes de lumière et des plantes d'ombre. IC : intensité de compensation ; IS : intensité saturante ; Φ : rendement quantique foliaire ; RO : intensité respiratoire à l'obscurité. Plante d'ombre en bleu et Plante de lumière en rouge (Prat & Moreau, 2001).

Chapitre 1 : Étude bibliographique

L'hypothèse de l'écologie des graines et des semis est proposée par Swaine & Whitmore (1988) et soutenue par des auteurs tels que Canham (1989) et Hubbell et al., (1999). Cette hypothèse stipule que : « Une espèce ne peut être assignée à un groupe sans connaître l'écologie de ses graines et de ses semis » et suggère de classer les espèces en deux groupes : les pionniers et les non pionniers ou climax. Les pionniers sont des espèces dont les graines et les semis ont besoin de la pleine lumière du soleil pour s'établir et croître et dont les plants ne peuvent pas survivre sous ombrage quel que soit le stade de développement (Tableau 1.1) (Swaine & Whitmore, 1988; Whitmore, 1989). Ce sont des plantes de lumière. Les espèces non pionnières ou climax sont celles dont les graines et les semis peuvent s'établir et survivre à l'ombre pendant toute ou partie de leur vie. Les jeunes plants se trouvent donc habituellement sous la canopée (Swaine & Whitmore, 1988). La taille des graines augmenterait pour ces espèces non pionnières permettant aux plantules de disposer de réserves plus abondantes nécessaires à leur développement (Davies & Ashton, 1999; Kitajima, 2002; Poorter & Rose, 2005).

D'autres auteurs (Blanc et al., 2003) classent les espèces en trois groupes : les héliophiles, les sciaphiles et les semi-héliophiles. Le caractère héliophile étant plus facile à mettre en évidence que le caractère sciaphile (Blanc et al., 2003). Une espèce héliophile est un végétal ayant d'importants besoins en lumière pour se développer. Les espèces qui au contraire, ne peuvent croître que sous ombrage, sont appelées sciaphiles (Schmitt et al., 2022). Il existe un groupe intermédiaire d'espèces dites semi-tolérantes. Ce sont des végétaux capables de débiter leur cycle de vie en sous-bois mais dont la survie sera dépendante d'une ouverture dans le couvert forestier (Blanc et al., 2003).

La compétition pour la lumière est un enjeu déterminant pour la croissance des espèces héliophiles (Koch et al., 2004; Montgomery & Chazdon, 2002; Poorter et al., 2012; Rüger et al., 2011, 2012), tandis que pour les espèces sciaphiles c'est plutôt la survie qui est déterminante (Montgomery & Chazdon, 2002). La survie élevée dans le sous-étage de la forêt pour ces espèces est améliorée par la formation de feuilles à longue durée de vie, et des couronnes plus grandes (Adler et al., 2014; Janse-Ten Klooster et al., 2007; Poorter & Bongers, 2006). Ces couronnes plus larges améliorent la captation de la lumière, ce qui contribue à leur tolérance à l'ombrage (Poorter et al., 2012).

Chapitre 1 : Étude bibliographique

Tableau 1.1 : Syndrome des caractères des espèces d'arbres pionniers dans les forêts tropicales humides. Tous les pionniers ne possèdent pas tous les caractères iii-xvi (Swaine & Whitmore, 1988).

i	Les graines ne germent que dans les espaces du couvert végétal ouverts sur le ciel et qui reçoivent une partie de la lumière du soleil.
ii	Les plantes ne peuvent pas survivre à l'ombre - on ne trouve jamais de jeunes plantes sous un couvert forestier fermé.
iii	Les graines sont petites et produites en abondance et de façon plus ou moins continue.
iv	Les graines sont produites dès le début de la vie.
v	Les graines sont dispersées par les animaux ou le vent.
vi	Les graines dormantes sont généralement abondantes dans les sols forestiers (en particulier les espèces à fruits charnus). Graines orthodoxes (aucune espèce récalcitrante connue).
vii	Taux de fixation du carbone par les semis élevé ; point de compensation élevé.
viii	Croissance en hauteur rapide.
ix	Croissance indéterminée sans bourgeons au repos.
x	Branches relativement peu nombreuses.
xi	Feuilles de courte durée de vie.
xii	Enracinement superficiel.
xiii	Bois généralement pâle, de faible densité, non siliceux.
xiv	Feuilles sensibles à l'herbivorie ; parfois avec peu de défense chimique.
xv	Large gamme écologique ; phénotypiquement plastique.
xvi	Souvent éphémère.

1.2.2.2 Le vent

Le vent est un élément important dans la création d'environnements pour la régénération naturelle et pour accroître la diversité des peuplements forestiers (Ruel & Pineau 2002 dans Hale et al., 2012; Quine, 2001). Il s'agit de l'un des effets environnementaux les plus répandues qui poussent les arbres à développer diverses réponses mécaniques, appelées collectivement thigmomorphogenèse. Celui-ci façonne la morphologie des arbres ainsi que leurs propriétés physiologiques et mécaniques (Ennos, 1997 ; Yang et al., 2024). Il est par ailleurs considéré comme un facteur écologique très important en raison des dommages qu'il peut causer aux arbres. Les dommages causés par le vent peuvent affecter la croissance et la survie des arbres (Cullen, 2002; Ennos, 1997). Dans les lieux chroniquement venteux, celui-ci peut être à l'origine de déformations permanentes au niveau des racines et des tiges par exemple (Stokes et al., 1995). Les vents très violents peuvent parfois entraîner le déracinement et la casse des troncs des arbres car ceux-ci subissent des contraintes de compression et surtout de flexion (Figure 1.5) (James et al., 2017; Trouy, 2015). Cela entraîne d'énormes pertes économiques pour les exploitants forestiers en raison de la réduction de la rentabilité de la production de bois

Chapitre 1 : Étude bibliographique

(Savill 1983 dans Hale et al., 2012; Schindler et al., 2012). Outre la casse et le déracinement, la réponse globale d'un arbre au vent se traduit par des changements au niveau de la croissance, du développement, de la photosynthèse et de la reproductivité (Smith & Ennos 2003 ; Bang et al., 2010). Des changements morphologiques marquants des plantes comprennent très souvent une réduction de la surface foliaire, un raccourcissement de la longueur de la tige, ainsi que, parfois, une diminution du poids des pousses (Henry & Thomas 2002 ; Bossdorf & Pigliucci 2009). On observe de plus, une augmentation de la croissance en diamètre des troncs et des branches localisées au lieu de la stimulation (Telewski, 1989 ; Coutand, 2010 ; Moore et al., 2014). Une diminution du module d'élasticité du tronc ou une modification du comportement à la rupture peut également être observé (Telewski, 1989). Les arbres doivent être capables de faire face à ces contraintes en se maintenant et en restant stable. La forme et l'aspect des racines peuvent alors avoir une influence sur la résistance au déracinement (Ennos, 1989, 1991). C'est le cas d'arbres à contreforts par exemple.

La capacité des arbres à s'adapter au phénomène de thigmomorphogénèse dépend des espèces, de leur stratégie écologique et de l'environnement dans lequel elles se trouvent. Les grands arbres élancés présentent plus de risque de déformation sous leur propre masse ou de casse sous l'effet du vent (King & Loucks 1978 dans O'Brien et al., 1995). Les espèces de lumière réputées pour privilégier la croissance en hauteur et atteindre les taux de croissance les plus élevés (Adler et al., 2014; Poorter et al., 2012; Poorter & Bongers, 2006) semblent les plus exposées à ces risques. Toutefois, leur forme élancée pourrait contribuer à une flexibilité beaucoup plus importante leur permettant de se déformer sans se rompre jusqu'à un certain seuil. Les espèces tolérantes à l'ombre (plus courtes) sont moins facilement endommagées par les contraintes mécaniques naturelles et devraient mieux résister aux vents car la survie est le facteur déterminant pour leur croissance et elles ont des troncs plus épais (Janse-Ten Klooster et al., 2007; Poorter et al., 2012). Leur diamètre de tronc plus important contribue à une plus grande rigidité et une plus grande résistance à la rupture.

Chapitre 1 : Étude bibliographique

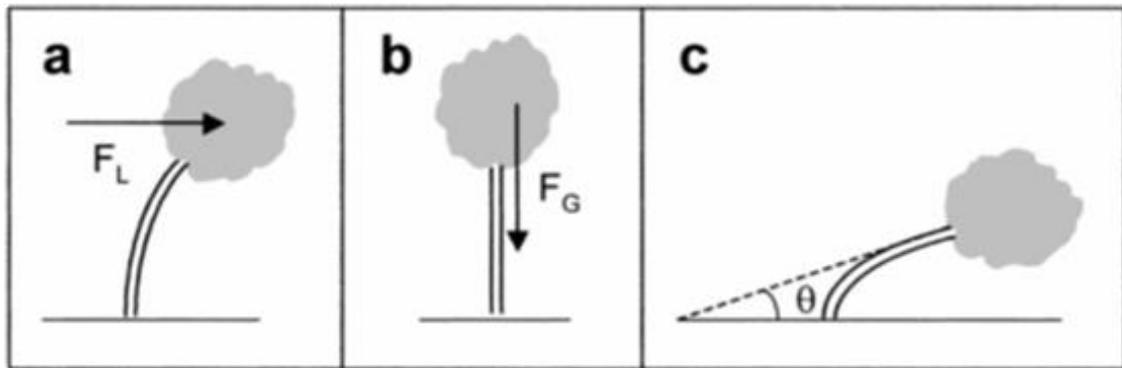


Figure 1.5 : Croquis des trois principales conditions de charge : a : forces latérales du vent, b : forces gravitationnelles, et c : flexion jusqu'à un angle critique (Lichtenegger et al., 1999).

Le bois produit par les arbres pour faire face aux vents et être capables de se maintenir et de rester stable est appelé « bois de réaction ». Chez les feuillus ce bois est appelé bois de tension tandis que chez les résineux il est appelé bois de compression (Figure 1.6). C'est un bois dans un état de contrainte différent de celui du bois normal avec des caractéristiques anatomique, physique, mécanique et biochimiques différentes (Chanson, 1992). Il se forme dans les troncs qui s'éloignent de leur verticalité. Le « bois de flexion » est le terme proposé pour désigner le bois formé sous l'effet de la thigmomorphogénèse (Telewski, 1989).

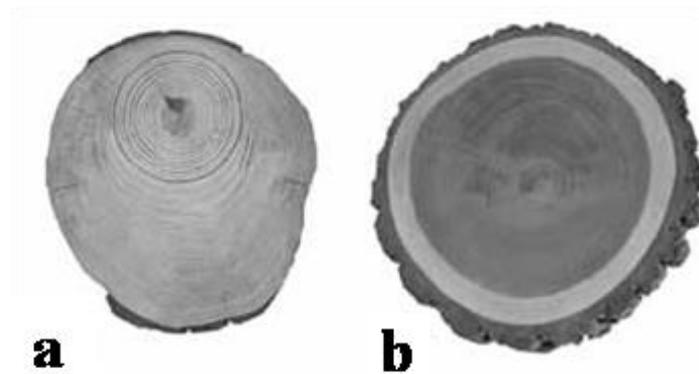


Figure 1.6 : Vue macroscopique du bois de réaction chez un résineux et un feuillu ; a : bois de compression chez *Pinus sp.* ; notez que la moelle n'est pas au centre du tronc, et que les cernes de croissance sont beaucoup plus larges dans la zone de bois de compression, b : bois de tension chez *Juglans nigra* ; la moelle est presque au centre du tronc, mais les cernes de croissance sont plus larges dans la zone de bois de tension (Wiedenhoef & Miller, 2005).

1.2.2.3 La disponibilité de l'eau, les caractéristiques du sol et les nutriments

Les arbres ont besoin pour leur croissance en plus de la lumière, d'eau et de nutriments qu'ils absorbent principalement du sol. L'eau contenue dans le sol est recueillie par les arbres au niveau des racines grâce au xylème qui s'étend des racines aux feuilles. Cette eau joue un rôle primordial pour le bon fonctionnement des arbres. C'est en effet un vecteur important qui

Chapitre 1 : Étude bibliographique

transporte les minéraux et les nutriments du sol vers les différentes parties de l'arbre. Zimmermann & Brown (1971) soutenaient que la disponibilité de l'eau était le facteur le plus important limitant la croissance et la composition des espèces arbres. Ce qui a été corroboré plus tard par Schöngart et al., (2006) et Arnaud et al., (2019). La plus grande partie de l'eau absorbée par un arbre se perd par transpiration à travers ses feuilles. Ce processus est essentiel car il contribue au mouvement de l'eau dans l'arbre et aide à réguler la température et les échanges gazeux entre l'atmosphère et l'arbre (Figure 1.7). Seule une petite partie de cette eau absorbée est utilisée pour la croissance et les processus métaboliques. Les échanges gazeux entre l'atmosphère et l'arbre sont à l'origine des deux flux de sève qui parcourt tout l'arbre en sens inverse l'un de l'autre. Le flux de sève brute d'une part alimenté par l'eau et les éléments minéraux du sol circule dans les vaisseaux du xylème et répond à la demande transpiratoire des feuilles (Figure 1.7). Cette transpiration a lieu au niveau des stomates des feuilles principalement. La sève élaborée composée d'eau et de sucres formés dans les feuilles assure d'autre part la distribution de ces produits de la photosynthèse à travers le phloème (Figure 1.7). Tous ces différents mécanismes sont nécessaires au bon fonctionnement des arbres. Une absence temporaire de pluie n'affecte pas le fonctionnement des arbres car ces derniers vont utiliser l'eau emmagasinée dans le sol lorsque la pluie a été abondante. En revanche, si le manque de précipitations se prolonge et que la réserve du sol devient insuffisante, les arbres vont manquer d'eau et se trouveront alors sous stress hydrique. C'est le cas des arbres soumis à de longues sécheresses par exemple.

Outre leur capacité à abreuver les arbres, les sols servent aussi à nourrir ces derniers en mettant à leur disposition les nutriments par le biais de la décomposition des matières organiques. Ces nutriments sont absorbés par les racines de l'arbre sous forme d'ions, de molécules en solution (Atkinson & Wilson, 1980; Kong et al., 2017) et sont tout aussi important pour la croissance, le fonctionnement, la protection et le développement des plantes que l'eau (McMahon, 2012; Portsmouth & Niinemets, 2007; Villagra et al., 2013). En effet, sur des sols fertilisés (riches en phosphore et azote par exemple), les espèces d'ombre parviennent à augmenter leur capacité de transport de l'eau et leur résistance aux embolies (Villagra et al., 2013). L'étude de Burslem et al., (1995) note une importante augmentation de la croissance des plantules d'une espèce tolérante à l'ombre sur un sol enrichi en nutriments. L'absorption d'ions se fait de manière sélective suivant le métabolisme de la plante. La capacité d'absorption des racines est de loin supérieure à celle nécessaire à la satisfaction totale des besoins nutritifs de l'arbre (Barber, 1979). L'offre du sol représente donc le facteur limitant. En période de croissance, les besoins

Chapitre 1 : Étude bibliographique

importants sont comblés par un allongement du système racinaire de l'arbre vers les zones les moins appauvries. On distingue neuf principaux éléments nutritifs indispensables à la plante. Parmi ces éléments nous pouvons citer le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) mais aussi le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le soufre (S). Les trois premiers sont directement apportés par le dioxyde de carbone et l'eau, par conséquent il n'est pas nécessaire de se préoccuper de leur apport (Lerot, 2006). Pour les autres par contre, leur apport peut varier et devenir insuffisant. Dans ce dernier cas, la croissance, le développement et le fonctionnement des plantes peut très rapidement être négativement impactés (Lerot, 2006). Par exemple, un apport insuffisant en azote et/ou en phosphore entraîne un retard de croissance, la chute des feuilles et une diminution de la surface foliaire des plantes (Lerot, 2006). En ce qui concerne les différents degrés de tolérances à l'ombre qu'on peut trouver sur des sols riches en nutriments, les résultats sont contrastés. Dans l'étude de Coomes et al., (2009), on retrouvait aussi bien des espèces à croissance rapide (héliophile) que des espèces à croissance lente (tolérante à l'ombre) sur des sites riches en phosphore. Les résultats de Tenius Ribeiro et al., (2019) par contre ont montré une tendance à la dominance des espèces pionnières ou héliophiles dans les sols enrichis sur le plan nutritionnel. Ce qui serait révélateur de l'impact de la fertilité des sols sur l'abondance de ce groupe écologique selon Xing et al., (2022) et Ye et al., (2022). Par ailleurs, les caractéristiques du sol en particulier sa texture influence aussi le développement et la croissance de l'arbre. Cela a été observé dans l'étude de Modrý et al., (2004) dans laquelle deux types de sol (régosol calcarique et cambisol calcarique) avaient été étudiés. Dans ce travail, le sol a eu un effet significatif sur la hauteur de l'orme (poussant en plein soleil mais supportant la mi ombre) et de l'érable sycomore (arbre de demi-ombre supportant assez bien l'ombre) et sur le diamètre basal de l'orme. Une autre étude a démontré que la fréquence des vaisseaux augmentait chez les arbres poussant sur des sols plus sableux (de Lima Vieira et al., 2021).

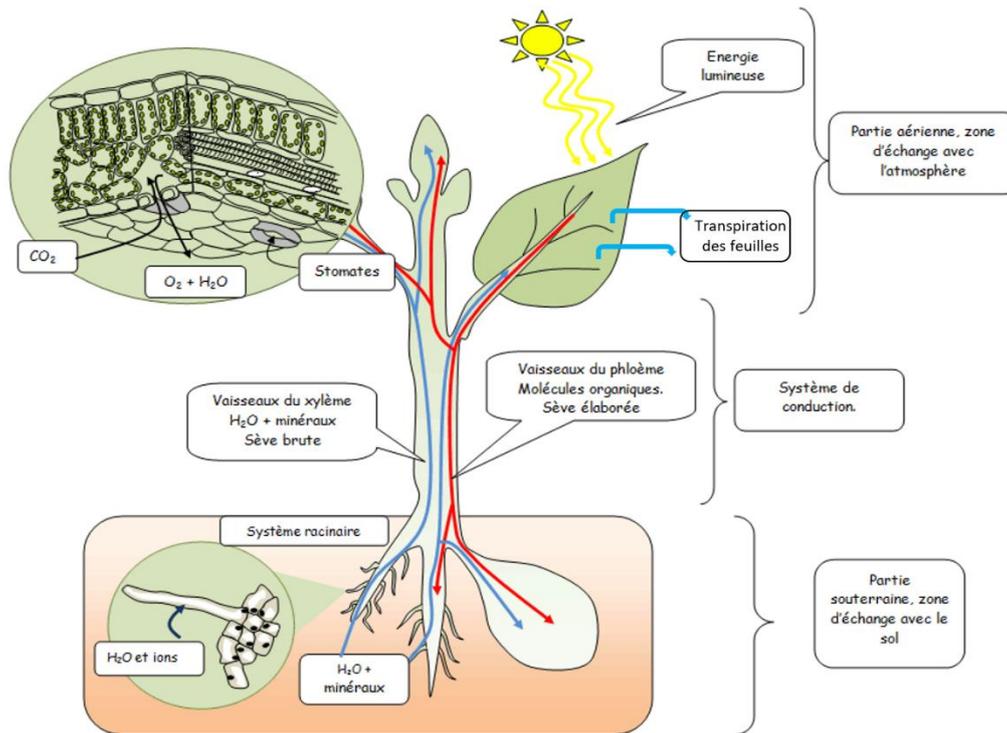


Figure 1.7 : Image révisée. Les surfaces d'échanges nutritifs des plantes (Banque de schémas de Dijon, 2024).

1.2.3 Traits fonctionnels et stratégies écologiques des espèces d'arbres

1.2.3.1 Traits fonctionnels de soutien mécanique

« Les traits fonctionnels du soutien mécanique sont appelés traits biomécaniques du tronc et dépendent de la forme de celui-ci, de ses dimensions et des caractéristiques de son bois » (Trouy, 2015). Le soutien mécanique renvoie à l'ensemble des mécanismes qui permettent à l'arbre de supporter sa propre masse, de contrôler sa posture via la motricité (Martone et al., 2010; Trouy, 2015) et d'éviter les dommages liés à des facteurs comme le vent (Fournier et al., 2013; Trouy, 2015). La fonction de soutien mécanique est davantage liée aux caractéristiques des fibres chez les feuillus. Chez les résineux par contre, ce sont les trachéides qui remplissent cette tâche et qui influent sur la densité du bois. Il existe une relation entre croissance en diamètre et densité du bois formé, selon l'essence et selon qu'on considère un résineux ou un feuillu (González-Melo, 2022).

La densité du bois est un trait biomécanique très important, car elle est en général liée à toutes les autres propriétés mécaniques du bois (Niklas & Spatz, 2010). Les espèces tolérantes à l'ombre sont plus denses (Adler et al., 2014; Lawton, 1984; Muller-Landau, 2004; Osunkoya et al., 2007; Thomas, 1996) et seraient donc plus rigides que les espèces exigeantes en lumière.

Chapitre 1 : Étude bibliographique

Ces espèces tolérantes à l'ombre auraient des propriétés mécaniques optimales et donc un soutien mécanique plus efficace (Tableau 1.2). Cette plus forte densité confère aux espèces tolérantes à l'ombre un taux de survie élevé par rapport à celles demandeuses de lumière (Román-Dañobeytia et al., 2021). La variation du trait de densité du bois est souvent vue comme un compromis de la croissance rapide compétitive au détriment de la qualité du bois, conférant à la plante exigeante en lumière une sécurité moins grande. Cependant, les traits biomécaniques de sécurité (rigidité en flexion, résistance au flambement, résistance à la casse ou au déracinement) impliquent aussi bien les facteurs de forme que les propriétés intrinsèques du bois.

Après la densité, l'angle des microfibrilles de cellulose dans la paroi secondaire, en particulier dans la couche S2, est un autre paramètre important qui influence la performance du soutien mécanique (Fournier et al., 2013). Une augmentation de l'angle des microfibrilles diminue la rigidité du bois et sa résistance aux contraintes longitudinales (De Borst et al., 2012; Trouy, 2015). Ce paramètre varie notamment en fonction du stade de développement. En effet, le bois juvénile présente un angle des microfibrilles plus grand et donc un bois moins rigide que celui du bois adulte (Trouy, 2015).

D'autres paramètres tels que les vaisseaux et la lignine influencent la rigidité du bois et donc affecte le soutien mécanique. Une réduction du taux de lignine entraînerait une diminution de la rigidité du bois (Voelker et al., 2011). S'agissant des vaisseaux, il a été démontré que les vaisseaux affectent la rigidité macroscopique du bois par leur contenu, leur disposition et leur forme (De Borst et al., 2012). Il existe en effet un lien entre efficacité hydraulique et soutien mécanique en relation avec les propriétés physiques, chimiques et anatomiques du bois.

Tableau 1.2 : Propriétés mécaniques et architecturales des espèces d'arbres tolérantes à l'ombre TO (n=20) et pionnières P (n=10) de la forêt tropicale. Les valeurs moyennes (\pm écart-type), les résultats du test t (t) et les niveaux de significativité (p) sont indiqués. ns, non significatif ; $p > 0,05$; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$. Densité sèche verticale (du tronc) : déterminée comme le rapport du poids sec (après séchage à 70°C) et du volume vert. Adapté de Van Gelder et al., (2006).

Propriétés	TO	P	t	p
Densité sèche verticale (g.cm ⁻³)	0.45 (0.08)	0.27 (0.13)	4.50	***
Résistance à la compression (N.mm ⁻²)	21.1 (4.5)	13.3 (8.3)	2.80	*
Module de rupture (N.mm ⁻²)	57.3 (13.5)	35.8 (24.1)	3.15	**
Module d'élasticité (N.mm ⁻²)	5220 (1431)	4420 (1082)	1.24	ns
Facteur de sécurité au flambage (cm.cm ⁻¹)	2.70 (0.34)	2.44 (0.38)	1.90	ns

Taille maximale à l'âge adulte (m)	21 (11.1)	24.9 (5.9)	-1.28	ns
------------------------------------	-----------	------------	-------	----

1.2.3.2 Traits fonctionnels de conduction

Les traits fonctionnels de conduction sont appelés traits hydrauliques. Dans le bois des feuillus, les cellules spécialisées pour la conduction de la sève et toute autre substance sont les vaisseaux. Cette fonction est assurée par les trachéides chez les résineux. Les vaisseaux sont caractérisés par un diamètre relativement gros par rapport aux autres cellules du même bois (Trouy, 2015).

La taille des vaisseaux et leur fréquence sont liées à la conductivité hydraulique. Des vaisseaux plus larges conduisent l'eau plus efficacement comparés aux vaisseaux plus étroits (Olson & Rosell, 2013). La hauteur de l'arbre est associée à la taille et à la fréquence des vaisseaux (Martínez-Cabrera et al., 2012; Preston et al., 2006). La conductivité hydraulique varie également avec le diamètre du tronc d'après McCulloh et al., (2010). Selon Fan et al., (2012), les caractéristiques anatomiques liées à la conductivité seraient de meilleurs descripteurs de la vitesse de croissance des arbres que la densité du bois. Koch et al., (2004) et Anfodillo et al., (2006) ont établi un lien entre croissance en hauteur et conductivité hydraulique ; les arbres de grande hauteur nécessitent une plus grande conductivité, donc des vaisseaux plus larges (Olson et al., 2014). Les espèces demandeuses de lumière auraient alors des vaisseaux plus larges que ceux des espèces tolérantes à l'ombre (Chave et al., 2009; González-Melo, 2022). La fonction de conduction serait optimale pour les espèces demandeuses de lumière. Le lien entre largeur des vaisseaux et fréquence a été notamment rapporté par Fan et al., (2012) ; plus les vaisseaux ont un diamètre important et moins ils sont nombreux. Les espèces tolérantes à l'ombre seraient caractérisées par des vaisseaux plus étroits et plus fréquents avec une efficacité hydraulique plus faible (Hacke et al., 2006; Pratt et al., 2007; Preston et al., 2006; Searson et al., 2004).

Les effets du climat sur la croissance varient selon les espèces et ces effets sont importants pour comprendre la dynamique des peuplements (Oboite & Comeau, 2021). Les différentes réponses des espèces à la sécheresse et au gel pourraient refléter les groupes écologiques (Jucker et al., 2014; Latreille et al., 2017; Nourtier et al., 2014). Pfautsch et al., (2016) a montré que la hauteur de l'arbre était favorisée par la disponibilité en eau. Cette disponibilité en eau serait donc indispensable pour la croissance des espèces demandeuses de lumière. Lors de grandes sécheresses ou de gel par exemple, si les stomates des feuilles des arbres ne sont pas totalement fermés, des bulles d'air se forment dans les vaisseaux et empêchent la conduction de l'eau créant ainsi une embolie appelée cavitation (Figure 1.8). La sensibilité à la cavitation est très variable d'une espèce à une autre. La nécessité de transporter de grandes quantités d'eau a

Chapitre 1 : Étude bibliographique

conduit à l'apparition de larges vaisseaux de xylème. Cependant, ces vaisseaux plus larges rendent l'arbre plus vulnérable à la cavitation. Les grosses bulles d'air étant plus susceptibles de se former dans les gros vaisseaux, cela induit une plus grande sensibilité des espèces demandeuses de lumière dans le cas d'embolie liée au gel-dégel chez les résineux (Charra-Vaskou et al., 2016; Latreille et al., 2017; Pittermann & Sperry, 2006). D'après Fan et al., (2012), la sécurité contre l'embolie serait assurée par des vaisseaux plus étroits et plus nombreux. Une plus grande résistance à la sécheresse caractérise en effet les espèces tolérantes à l'ombre (Adler et al., 2014; Jucker et al., 2014) et cette résistance serait due à des vaisseaux plus petits et plus nombreux (Baas et al., 2004; Hacke et al., 2006; Pratt et al., 2007; Preston et al., 2006; Searson et al., 2004). Des études récentes (Guillemot et al., 2022; Rüger et al., 2020) indiquent aussi une tendance à mieux résister à la sécheresse chez les espèces à croissance lente. Dans ce cas, l'embolie due à la sécheresse ne serait pas dépendante de la taille des vaisseaux mais plutôt de la dimension des pores au niveau de la paroi primaire des punctuations (Cochard & Granier, 1999). Levionnois et al., (2021) ont également montré un faible pouvoir prédictif du diamètre des vaisseaux sur la résistance à l'embolie due à la sécheresse, comparé au rapport diamètre - épaisseur de la paroi cellulaire. L'addition du manque de réserves et du niveau de cavitation peut entraîner le dépérissement de l'arbre et à terme sa mort (Figure 1.8). Il est donc crucial pour ce dernier de pouvoir s'adapter aux changements de son environnement immédiat.

En effet, face au phénomène de stress hydrique, les arbres déploient différentes stratégies de défense nécessaires à leur bon fonctionnement et à leur survie. Parmi ces stratégies, la fermeture des stomates de leurs feuilles (Figure 1.8), ce qui va entraîner une diminution de la transpiration, mais avoir pour conséquence le ralentissement de la photosynthèse et de la croissance. Pour certaines espèces, la capacité de faire sécher et tomber leurs feuilles constitue une autre stratégie. Celle-ci réduit les pertes en eau en limitant l'évapotranspiration. Chez d'autres peuplements, notamment ceux disposant d'éléments conducteurs de la sève plus résistants à l'apparition de bulles d'air, un profond enracinement permet de garder une certaine ouverture des stomates au détriment de la croissance. C'est le cas des espèces aux vaisseaux nombreux et étroits c'est-à-dire les espèces tolérantes à l'ombre (Fan et al., 2012). Une autre stratégie mais cette fois plus drastique est l'élimination des arbres les plus vulnérables au profit des plus résistants, ce qui à long terme permet aux nouveaux peuplements de développer certaines particularités (taille, forme, enracinement) adaptées aux environnements plus secs (Begović et al., 2023; Gong et al., 2024).

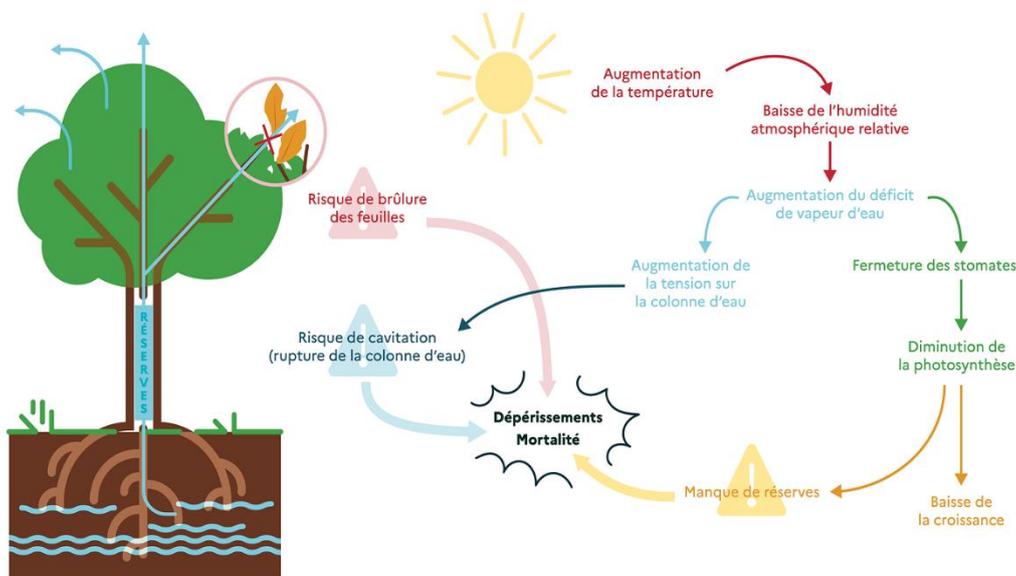


Figure 1.8 : Stress hydrique et sécheresse : les arbres contraints de s'adapter (ONF, 2024).

1.2.3.3 Traits fonctionnels de protection

Les traits fonctionnels de protection peuvent être qualifiés de « traits de défense ». Lorsque les plantes (ou arbres) sont attaquées par des insectes ou des champignons par exemple, elles ont recours à diverses stratégies pour se défendre. Ces mécanismes de défenses peuvent être classés en deux catégories : les défenses constitutives et les défenses induites. Les premières sont toujours existantes à l'intérieur de la plante, tandis que les secondes sont produites vers le lieu où la plante a été atteinte. Les défenses constitutives sont très variables et peuvent être réparties en deux groupes que sont les barrières physiques et les composés chimiques. Comme barrières physiques nous pouvons citer l'écorce, la cuticule et les trichomes. Les composés chimiques comprennent les alcaloïdes, les terpènes, les tanins et les glucosinolates (extractibles). Ces composés ont des propriétés toxiques, répulsives et anti-nutritionnelles. Quant aux défenses induites, elles comprennent des composés chimiques (composés ayant des effets antimicrobiens, antiviraux ou insecticides selon l'agresseur) et des protéines (protéines PR et inhibiteurs de protéases) de défense. L'avantage des défenses induites est qu'elles permettent une réponse spécifique et adaptée à chaque type d'agresseur (Karban et al., 1997). Compte tenu du rôle important des métabolites secondaires dans la défense des arbres (Buckley et al., 2019; Rasmann et al., 2014; Stevanovic & Perrin, 2009; Wink, 2010), nous nous intéresserons exclusivement aux défenses constitutives en particulier aux matières extractibles. En effet, les principales propriétés du bois qui entrent en jeu dans la durabilité du bois sont la quantité et la composition des matières extractibles du bois de cœur (Martín & López, 2023; Wink, 2010).

Chapitre 1 : Étude bibliographique

Les extractibles sont des composés organiques secondaires de faible poids moléculaire que l'on trouve dans le bois. Ils doivent leur nom au fait qu'on peut les extraire avec des solvants organiques ou de l'eau, sans procéder à des traitements sévères qui modifient chimiquement les constituants structuraux du bois. La nature des composants extraits sont dépendants du solvant utilisé pour les prélever et de l'origine de l'arbre (Stevanovic & Perrin, 2009). Les teneurs en extractibles sont pour leur part dépendants de nombreux facteurs, à savoir l'élément anatomique considéré, la position dans l'arbre, la vitesse de croissance de l'arbre, l'origine géographique, la génétique et la saison par exemple (Stevanovic & Perrin, 2009). C'est au cours du processus de duraminisation que sont synthétisés les métabolites secondaires qui confèrent au bois ses propriétés de résistance aux agressions extérieures (Hillis, 1971), c'est-à-dire la capacité du duramen à résister aux attaques des champignons et des insectes xylophages. Par cette protection, le duramen résiste au cours du temps et conserve ainsi l'intégrité de l'arbre. La densité du bois a également un lien avec la durabilité (Chave et al., 2006; Nock et al., 2009). Une forte densité du bois serait notamment associée à une meilleure protection contre les attaques fongiques (Falster, 2006; Villagra et al., 2013).

La plus grande part de la variabilité de la durabilité (dont la proportion de bois de cœur) est contrôlée génétiquement (Pâques, 2001). Les facteurs d'environnement, de gestion sylvicole et de site de croissance ont un effet plus marginal (Harju et al., 2001; Hillis, 1971; Taylor et al., 2002). En général, la teneur en extrait augmente de la moelle vers le bois de cœur externe et atteint un maximum dans la zone de transition entre le duramen et l'aubier. Longitudinalement, la concentration extractive diminue avec la hauteur de l'arbre. À mesure que l'arbre vieillit, la teneur en extrait augmente (Hillis, 2012). Les essences à longue durée de vie ont alors un bois de cœur plus durable (Wheeler et al., 1989).

Au stade de bois juvénile, une espèce tolérante à l'ombre et une espèce exigeante en lumière seraient alors toutes deux sensibles aux agressions extérieures. Cette sensibilité serait cependant plus accentuée pour l'espèce exigeante en lumière compte tenu du compromis croissance-défense existant à ce stade de développement (González-Melo, 2022). Le vieillissement de l'arbre peut être rattaché à la survie qui est une caractéristique des espèces tolérantes à l'ombre. On peut émettre l'hypothèse selon laquelle ces espèces produiront toujours plus de bois (quantité d'extractibles plus importante) que les espèces exigeantes en lumière. Ce qui viendrait confirmer les résultats observés par certains auteurs (Coley & Barone, 1996; Dudt & Shure, 1994; Falster, 2006; González-Melo, 2022; Imaji & Seiwa, 2010; Mađerek et al., 2017; Sillett

et al., 2010). Cet investissement dans la fonction de protection des espèces tolérantes à l'ombre se manifeste par des taux élevés des composés phénoliques et des tanins par exemple ainsi que de faibles niveaux d'attaque par les animaux se nourrissant de végétaux (herbivorie) (Brockley et al., 2010; Dudt & Shure, 1994; Imaji & Seiwa, 2010; Mađerek et al., 2017). Il faut cependant nuancer ce propos car l'étude des produits de la duraminisation ont révélé différentes stratégies de duraminisation possibles. Dans une étude comparative de la durabilité naturelle pour des essences très durables de Guyane Française, Amusant et al., (2014) ont proposé deux types de stratégies : quantité des extraits vs qualité des extraits. Il est alors suggéré que la durabilité naturelle de *Vouacapoua americana* est due à une forte quantité d'extractibles alors que celle de *Bocoa prouacensis* est due à une grande qualité et/ou spécificité/toxicité des extractibles à défaut d'une forte quantité.

1.3 Synthèse et orientation des travaux de thèse

Les arbres au cours de leur développement remplissent les fonctions de soutien mécanique, conduction et protection, nécessaires à leur survie. Les traits fonctionnels sont les différentes manières qui permettent de réaliser une fonction précise. Une même espèce ne peut pas être la plus performante pour toutes les fonctions et dans toutes les conditions de croissance, ce qui amène à la notion de compromis ou « trade-off ». Les traits fonctionnels sont alors le révélateur de la stratégie écologique d'une espèce. Les travaux publiés antérieurement permettent de connaître les principales caractéristiques, de dresser le « portrait-robot », des espèces selon leur degré de tolérance à l'ombrage.

Les espèces héliophiles sont caractérisées par une croissance rapide, pour atteindre de grandes hauteurs, avec un tronc très élancé. Ces espèces ont des vaisseaux plus larges et peu nombreux, ce qui leur confère une fonction de conduction performante et optimale. Par contre, elles semblent présenter des risques élevés de casse ou de déformation sous l'effet de vents violents. Les espèces tolérantes à l'ombre ont une croissance lente avec des diamètres de tronc plus grands (leur élancement est donc faible) et très souvent un enracinement profond dans le sol, ce qui leur permet de résister aux vents violents. Les houppiers sont larges et comportent des feuilles à longue durée de vie, par opposition aux espèces héliophiles. Les espèces tolérantes à l'ombre possèdent un bois plus dense et plus rigide avec un soutien mécanique plus performant, ce qui va de pair avec un faible élancement. La conductivité hydraulique est cependant moins efficace avec des vaisseaux plus étroits et plus fréquents, ce qui permet une sécurité à la cavitation du xylème. Les caractéristiques du sol (texture et composition) influencent à la fois

Chapitre 1 : Étude bibliographique

le développement, la croissance et le fonctionnement d'espèces tolérantes à l'ombre et héliophiles en favorisant l'expansion d'un groupe, en altérant la croissance et les traits anatomiques de ces espèces. Les espèces tolérantes à l'ombre possèderaient une meilleure protection contre les bio agresseurs avec des quantités d'extractibles plus importantes associées à une forte densité du bois. Il existe cependant peu d'informations bibliographiques relatives à la fonction de protection. D'une manière plus générale, il existe peu de travaux sur l'étude des traits fonctionnels en lien avec les stratégies écologiques des espèces tropicales malgré leur grande diversité.

Il est important de souligner le caractère intégrateur de la densité du bois. Cette propriété technologique apparaît en effet comme l'unique trait lié à toutes les fonctions de l'arbre. La densité est également liée à beaucoup de propriétés physico-mécaniques du bois. Cependant, la densité n'explique pas tout, l'arbre (et le bois) résultent d'une élaboration complexe et extrêmement sophistiquée fruit de l'évolution. Les propriétés, que nous avons nommé propriétés technologiques, physiques, anatomique, chimiques et mécaniques sont interdépendantes. Ces propriétés sont peu étudiées dans leur ensemble, mais leur connaissance permettrait une meilleure compréhension des différentes stratégies de croissance et de l'élaboration de la qualité du bois.

Ce travail de thèse porte uniquement sur des feuillus tropicaux et a été orienté en des sous-thématiques de recherche toutes liées entre elles. De façon globale, l'objectif est la mise en relation de la qualité du bois et du tempérament écologique à travers les fonctions de l'arbre. Pour ce faire, la qualité du bois a été étudiée à travers des propriétés technologiques et le tempérament écologique tiré de la bibliographie. L'étude des fonctions de l'arbre s'est faite grâce à des caractérisations physico-mécanique, anatomique et chimique de 25 feuillus tropicaux du Gabon. La caractérisation physico-mécanique renvoie au calcul de la densité du bois et à la détermination des performances mécaniques des espèces étudiées à travers des essais mécaniques normalisés. La caractérisation anatomique a été faite en mesurant les caractéristiques anatomiques des vaisseaux (diamètre et nombre/mm²) et des fibres (longueur et épaisseur). Enfin, la caractérisation chimique a été réalisée par le biais de la spectroscopie proche infrarouge. Elle visait à déterminer la composition chimique (Cellulose, hémicelluloses, lignine, extractibles notamment) des espèces en fonction du tempérament écologique. De plus, une mise en relation des fonctions de l'arbre entre elles a été faite afin de pouvoir expliquer les différences de comportement observées. Les conclusions et hypothèses des études précédentes

Chapitre 1 : Étude bibliographique

ainsi que l'effet de la densité du bois en tant que trait le plus influencé par le tempérament et lié à toutes les propriétés de l'arbre ont également été vérifiées.

Chapitre 2

2 Matériels et méthodes

Cette partie présente de façon exhaustive l'ensemble des essais et protocoles effectués dans le cadre de ce travail de thèse ainsi que le matériel végétal utilisé. Au total 9 campagnes expérimentales (5 essais mécaniques, 1 essai physique, 1 essai chimique et 2 essais anatomiques) ont été réalisées et environ une vingtaine de propriétés intrinsèques ont été déterminées dont 11 physico-mécaniques, 4 composés chimiques et 8 traits anatomiques relatifs aux vaisseaux et aux fibres.

2.1 Analyse de la base de données physico-mécanique du CIRAD

2.1.1 Mode opératoire

La base de données de notre étude est une compilation de résultats anciens obtenus entre 1950 et 1975. Ces résultats avaient été obtenus suivant des méthodologies françaises d'essais des bois qui ont évoluées au fil du temps (Sallenave, 1955, 1964, 1971). Les types d'éprouvettes utilisées sont définis par les normes NF B-51. Les bois sélectionnés pour cette étude sont 48 espèces feuillus tropicaux du Gabon et les arbres retenus sont ceux pour lesquels les essais comptaient suffisamment de bois pour réaliser 10 éprouvettes représentatives de l'arbre testé (Tableau 2.1). Au total, 135 arbres ont été sélectionnés. Ceux-ci étaient représentés par des planches de longueurs variables issues de billes entières d'arbres sur pied. Ces planches avaient été prélevées proches de la moelle autant que possible (quartier ou faux-quartiers) de manière à intégrer la variation radiale des propriétés. Les éprouvettes avaient été stabilisées dans une chambre climatique à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et une humidité relative de l'air (HR) de $65\% \pm 5\%$. Les propriétés retenues pour cette étude sont : la densité (ρ en kg/m^3), la dureté de Monnin ou de Chalais-Meudon (D sans unité), le point de saturation des fibres (PSF %), le retrait volumique total (R_V %), le retrait radial total (R_R %), le retrait tangentiel total (R_T %), le rapport des retraits ou anisotropie des retraits (R_T/R_R), la contrainte de rupture en flexion (flexion 3 points, σ_f MPa), la contrainte de rupture en compression parallèle (σ' MPa), la résistance au cisaillement longitudinal (τ MPa), la résistance à la traction perpendiculaire (σ_t MPa), la résilience ou énergie absorbée en flexion dynamique (W Joule), la résistance au fendage (Fend N/mm), le module d'élasticité longitudinal (E_L MPa) et le module spécifique (E_L/ρ MPa/ kg/m^3). Ces propriétés ont été choisies pour leur intérêt technologique. En effet, ce sont celles qui sont le plus susceptibles d'avoir un impact positif ou négatif sur les structures ou les objets en bois suivant que le matériau soit soumis à des sollicitations mécanique, hydrique ou thermique. De plus, elles sont liées aux caractéristiques anatomiques, structurelles,

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

hydrauliques et chimiques du bois. Les objectifs principaux de cette analyse étaient d'une part d'exploiter les données déjà disponibles dans cette base et d'autre part de vérifier par de nouveaux essais sur les mêmes bois si on retrouve les mêmes résultats et par ailleurs de compléter cette base de données par des résultats chimiques et des traits anatomiques.

Tableau 2.1 : Espèces étudiées et tempéraments écologiques associés. N : nombre d'arbre par espèce ; Temp : Tempérament écologique.

Temp	Espèces	Noms pilotes ou vernaculaires	Famille botanique	N
Pionnier (P)	¹ <i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	Ahinebe	Gentianaceae	3
	² <i>Antrocaryon klaineanum</i> Pierre	Onzabili	Anarcadiaceae	1
	² <i>Aucoumea klaineana</i> Pierre	Okoumé	Burseraceae	2
	¹ <i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	Ovok	Annonaceae	2
	¹ <i>Croton oligandrus</i> Pierre	Ngueul/Obamba	Euphorbiaceae	4
	² <i>Cylicodiscus gabunensis</i> Harms	Okan	Mimosaceae	5
	² <i>Detarium macrocarpum</i> Harms	Alen	Caesalpiniaceae	3
	¹ <i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	Atieghe	Euphorbiaceae	3
	² <i>Erythrophleum ivorense</i> A. Chev.	Tali	Caesalpiniaceae	4
	² <i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	Nieuk	Mimosaceae	1
	² <i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre	Eveuss	Irvingiaceae	3
	² <i>Lophira alata</i> Banks	Azobé	Ochnaceae	1
	² <i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C.C.Berg	Iroko	Moraceae	1
	² <i>Nauclea diderrichii</i> Merr.	Bilinga	Rubiaceae	1
	² <i>Testulea gabonensis</i> Pellegr.	Izombé	Ochnaceae	1
	² <i>Xylopia aethiopica</i> A.Rich.	Okala	Annonaceae	5
	Total(P)			40
Hémi-héliophile (HH)	² <i>Anthonotha fragrans</i> Exell et Hillcoat	Akoung élé	Caesalpiniaceae	1
	² <i>Baillonella toxisperma</i> Pierre	Moabi	Sapotaceae	1
	¹ <i>Brachystegia laurentii</i> Louis	Bomanga	Caesalpiniaceae	1
	² <i>Celtis tessmannii</i> Rendle	Diana	Ulmaceae	5
	² <i>Dacryodes buettneri</i> H.J.Lam	Ozigo	Burseraceae	9
	² <i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	Ossabel	Burseraceae	7
	² <i>Erismadelphus exsul</i> Mildbr.	Angoa	Vochysiaceae	1
	¹ <i>Gilbertiodendron brachystegioides</i> J.Leon.	Limbali / Abeum	Caesalpiniaceae	1
	¹ <i>Gosseweilodendron balsamiferum</i> Harms	Tola	Caesalpiniaceae	1
	² <i>Guibourtia ehie</i> J.Leon.	Ovèngkol	Caesalpiniaceae	8
	² <i>Guibourtia tessmannii</i> J.Leon.	Kevazingo/Bubinga	Caesalpiniaceae	1
	¹ <i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	Essang	Mimosaceae	1
	² <i>Piptadeniastrum africanum</i> Brenan	Dabéma	Mimosaceae	4
	² <i>Poga oleosa</i> Pierre	Ovoga	Anisophylleaceae	1
	² <i>Pterocarpus soyauxii</i> Taub.	Padouk	Fabaceae	1

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

	² <i>Pycnanthus angolensis</i> Warb.	Ilomba	Myristicaceae	1
	¹ <i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	Ozouga	Humiriaceae	1
	² <i>Scyphocephalum mannii</i> Warb.	Sorro	Myristicaceae	7
	Total (HH)			52
Tolérant à l'ombre (TO)	² <i>Beilschmiedia</i> spp. Nees	Nkonengui / Kanda	Lauraceae	4
	² <i>Berlinia bracteosa</i> Benth.	Ebiara	Caesalpiniaceae	1
	² <i>Coelocaryon preussii</i> Warb.	Ekoune	Myristicaceae	6
	² <i>Dacryodes igaganga</i> Aubrev. et Pellegr.	Igaganga	Burseraceae	6
	¹ <i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe	Faro	Caesalpiniaceae	1
	² <i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	Alep	Irvingiaceae	2
	² <i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	Omvong / Eyoum	Caesalpiniaceae	2
	² <i>Gilbertiodendron dewevrei</i> J.Leon.	Limbali / Abeum	Caesalpiniaceae	4
	² <i>Julbernardia pellegriniana</i> Troupin	Béli / Awoura	Caesalpiniaceae	5
	² <i>Santiria trimera</i> Aubrev.	Ebo	Burseraceae	1
	¹ <i>Scytopetalum klaineum</i> Pierre	Andong	Scytopetalaceae	2
	² <i>Sindoropsis letestui</i> J.Leon.	Ghéombi	Caesalpiniaceae	7
	² <i>Tetraberlinia bifoliolata</i> Haum.	Ekaba	Caesalpiniaceae	1
² <i>Tieghemella africana</i> Pierre	Douka	Sapotaceae	1	
	Total (TO)			43
	Total = Total (P) + Total (HH) + Total (TO)			135

¹(Bénédet et al., 2019) ; ²(Meunier et al., 2015)

2.1.2 Principe et analyse

La question de recherche qui nous a permis d'analyser cette base de données, fait référence à la stratégie de croissance des arbres liée au tempérament écologique. Nous avons analysé les propriétés des arbres de cette base de données en fonction du tempérament écologique. Le tempérament écologique ici peut être définie comme un ensemble de stratégies des arbres à croître, survivre et à se reproduire dans des conditions de lumière particulières en fonction du stade de développement (Oldeman & Van Dijk, 1991). En l'absence d'informations telles que le diamètre à hauteur de poitrine, la hauteur de l'arbre ou la hauteur de la canopée par exemple, il était évident que nous manquions d'informations sur les tempéraments écologiques des espèces étudiées. La définition des tempéraments écologiques s'est donc faite en s'aidant de la littérature en particulier celle de Meunier et al., (2015) dans son livre intitulé "Les Arbres utiles du Gabon". Cette littérature se base sur un éclaircissement relatif pour classer les espèces. Les tempéraments de 36 des 48 espèces étudiées ont été tirés de cet ouvrage. Pour les 12 autres, le tempérament était soit inconnu soit absent chez Meunier et al., (2015). Pour combler ce manque, nous avons eu recours à une base de données d'informations sur les caractères des plantes africaines du CIRAD (Bénédet et al., 2019). De façon global, le critère utilisé pour définir le tempérament écologique de ces 12 espèces dans cette base de données était le besoin

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

en lumière. Au total 4 tempéraments écologiques ont émergé de ces deux références à savoir les pionniers, les héliophiles non pionniers, les semi-héliophiles et les tolérants à l'ombre. En comparant les semi-héliophiles de Meunier et al., (2015) et les héliophiles non pionniers de Bénédet et al., (2019), nous sommes arrivés à la conclusion qu'il s'agissait du même groupe écologique et que c'était la dénomination qui était différente. Les espèces étudiées ont donc été réparties en trois tempéraments écologiques plutôt qu'en quatre, à savoir : les pionniers (P), les héliophiles non pionniers et/ou les semi-héliophiles que nous avons décidé de nommer « hémi-héliophile (HH) » et enfin les tolérants à l'ombre (TO). Les pionniers sont des espèces qui ont besoin du plein soleil dès le début et jusqu'à la fin de leur cycle de vie et qui sont capables de coloniser rapidement des zones perturbées et de produire de nombreuses graines (Swaine & Whitmore, 1988). Il existe par ailleurs différents types de pionniers avec une qualité de bois différente, à savoir les pionniers à longue durée de vie (longévifs) et à courte durée de vie (Woodcock & Shier 2002 ; Van Gelder et al., 2006 ; Hietz et al., 2013 ; Meunier et al., 2015). D'après la bibliographie, les pionniers longévifs sont généralement de grande taille et présentent un bois de meilleure qualité avec par exemple une densité de bois et une rigidité plus élevées que les pionniers non-longévifs. Ce bois de qualité différente est mis en place pour des raisons biomécaniques ou pour persister dans la canopée qui se referme. Les hémi-héliophiles elles, ont un fort besoin de lumière durant tout leur cycle, mais peuvent supporter l'ombre de manière temporaire (Fourdrigniez & Meyer, 2008). Enfin, les tolérantes à l'ombre sont des espèces capables de s'installer dans la canopée même avec un faible apport de lumière (Canham, 1989; Gravel et al., 2010). Les noms vernaculaires et les familles botaniques des espèces étudiées sont tirés d'une part du livre "Atlas des Bois Tropicaux" de Gérard et al., (2016) et du livre "La forêt du Gabon" de De Saint Aubin (1963).

2.2 Échantillonnage de la thèse

2.2.1 Identification et prélèvement du matériel végétal

Une campagne expérimentale a été menée dans la mesure du possible sur des espèces de la base de données du CIRAD échantillonnées à cette époque. L'objectif initial était de prélever les 48 espèces retenues dans la base de données. Malheureusement, lors de leur échantillonnage au niveau de la collection des bois du CIRAD à Montpellier, nous n'avons pu identifier qu'un total de 25 espèces (Tableau 2.2). Celles-ci étaient disponibles sous forme de planche.

Tableau 2.2 : Espèces étudiées pour les caractérisations physico-mécanique et chimique et les tempéraments écologiques associés. N : nombre d'arbre par espèce ; N_moy : nombre

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

d'échantillons moyen par arbre ; N_tot : nombre total d'échantillons par espèce ; Temp : Tempérament écologique.

Temp	Espèces	Noms pilotes ou vernaculaires	Famille botanique	N	N_moy	N_tot
Pionnier (P)	¹ <i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	Ahinebe	Gentianaceae	3	5	16
	¹ <i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	Ovok / Avom	Annonaceae	3	4	11
	¹ <i>Croton oligandrus</i> Pierre	Ngueul / Obamba	Euphorbiaceae	6	6	37
	¹ <i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	Atieghe	Euphorbiaceae	4	7	26
	² <i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	Nieuk	Mimosaceae	1	10	10
	² <i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre	Eveuss	Irvingiaceae	2	15	29
	Total (P)			19	xxx	129
Hémi-héliophile (HH)	² <i>Baillonella toxisperma</i> Pierre	Moabi	Sapotaceae	1	6	6
	¹ <i>Brachystegia laurentii</i> Louis	Bomanga	Caesalpiniaceae	3	5	15
	² <i>Celtis tessmannii</i> Rendle	Diana	Ulmaceae	1	4	4
	² <i>Dacryodes buettneri</i> H.J.Lam	Ozigo	Burseraceae	1	4	4
	² <i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	Ossabel	Burseraceae	2	10	19
	¹ <i>Dialium dinklagei</i> Harms	Eyoum	Caesalpiniaceae	1	10	10
	² <i>Eriomadelpus exsul</i> Mildbr.	Angoa	Vochysiaceae	2	14	27
	¹ <i>Gilbertiodendron brachystegioides</i> J.Leon.	Limbali / Abeum	Caesalpiniaceae	1	8	8
	¹ <i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	Tola	Caesalpiniaceae	1	18	18
	¹ <i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	Essang	Mimosaceae	1	15	15
	² <i>Poga oleosa</i> Pierre	Ovoga	Anisophylleaceae	1	6	6
	¹ <i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	Ozouga	Humiriaceae	2	5	10
	² <i>Scyphocephalum mannii</i> Warb.	Sorro	Myristicaceae	2	6	11
	Total (HH)			19	xxx	153
Tolérant à l'ombre (TO)	² <i>Beilschmiedia spp.</i> Nees	Nkonengui / Kanda	Lauraceae	3	8	25
	² <i>Dacryodes igaganga</i> Aubrev. et Pellegr.	Igaganga	Burseraceae	1	5	5
	¹ <i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe	Faro	Caesalpiniaceae	1	17	17
	² <i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	Alep	Irvingiaceae	1	12	12
	² <i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	Omvong / Eyoum	Caesalpiniaceae	1	10	10

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

¹ <i>Scytopetalum klaineianum</i> Pierre	Andong	Scytopetalaceae	4	4	17
Total (TO)			11	xxx	86
Total = Total (P) + Total (HH) + Total (TO)			49		368

¹(Bénédet et al., 2019) ; ²(Meunier et al., 2015)

Les planches étaient repérables par un numéro CTFT du Centre Technique Forestier Tropical. Un numéro CTFT représentait une planche et donc un arbre, et une espèce comptait au minimum un numéro CTFT. Nous avons pu au total identifier 49 numéros CTFT représentatifs des 25 espèces d'arbres et référencés avec des étiquettes comme le montre l'Image 2.1 ci-dessous. Une fois les arbres identifiés, des parallélépipèdes rectangles (plateaux) de 60 cm de longueur et d'une épaisseur d'au moins 3 cm étaient prélevés sur la planche (Image 2.1). Une fois le prélèvement des plateaux terminé, nous procédions au traçage des éprouvettes sur les plateaux afin de guider la découpe et ainsi permettre un usinage correct de ces dernières. Des scans ont ensuite été réalisés sur chacun des plateaux marqués afin de pouvoir retrouver la position des échantillons dans le plateau et ainsi mieux expliquer et comprendre les résultats des propriétés obtenues par la suite. Les plateaux marqués ont ensuite été découpés à la scie circulaire en des barreaux (ébauches) suivant le traçage des éprouvettes (Image 2.2). Les tempéraments écologiques sont définis et choisis de la même façon que pour l'analyse de la base de données du CIRAD (Bénédet et al., 2019; Meunier et al., 2015).

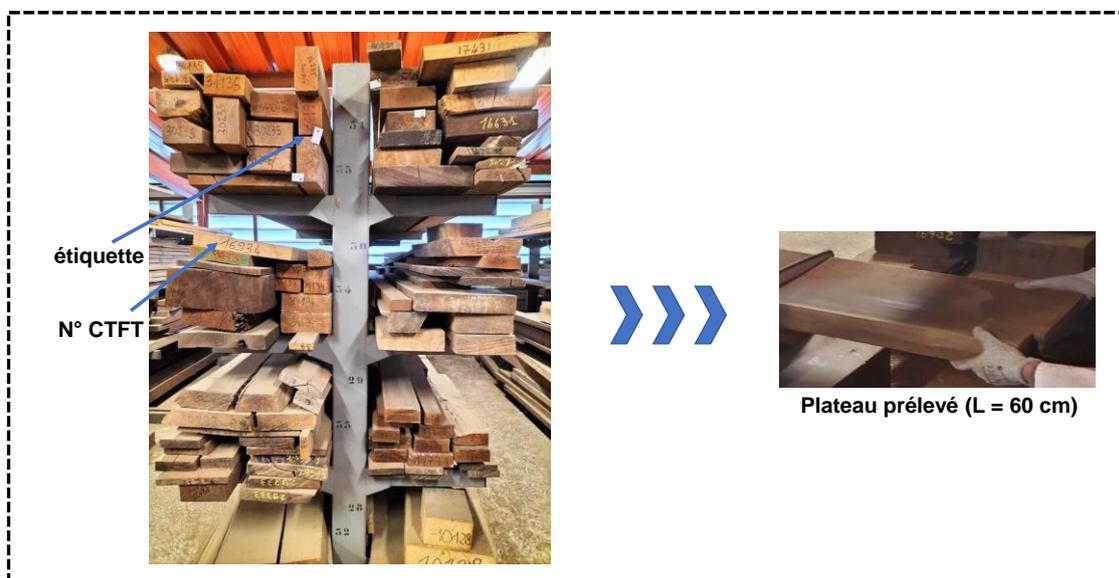


Image 2.1 : Identification et prélèvement des arbres.

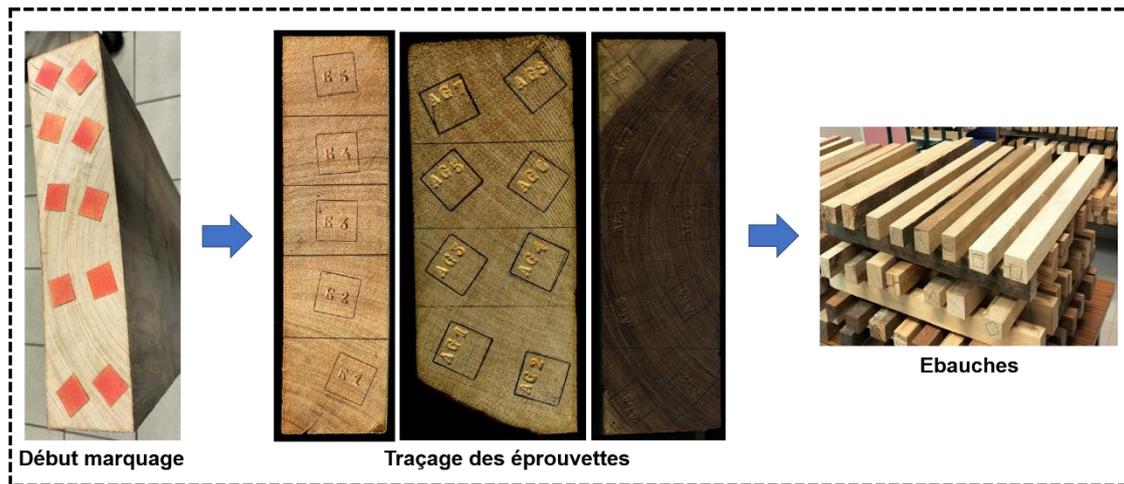


Image 2.2 : Traçage des éprouvettes sur les plateaux et prélèvement des ébauches.

2.2.2 Protocole de découpe et usinage

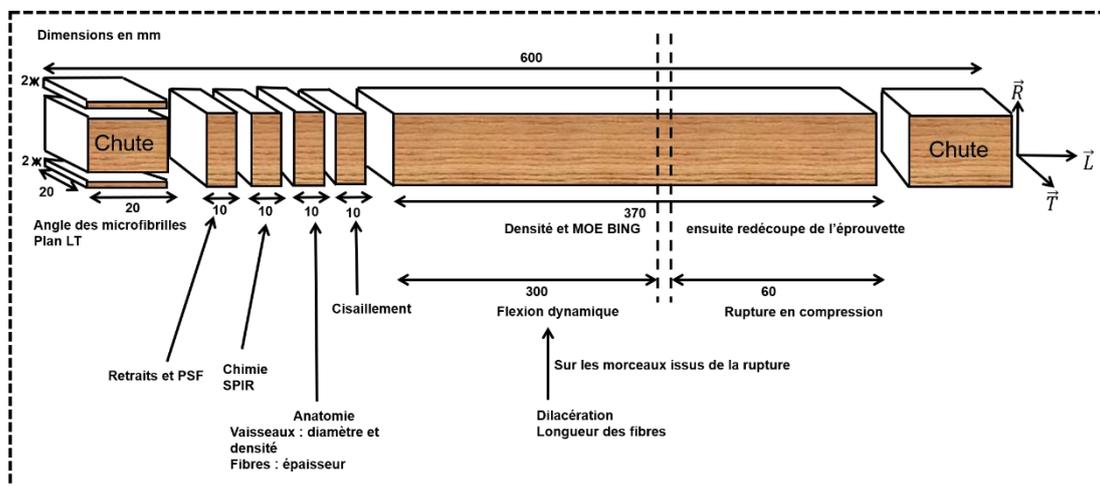


Figure 2.1 : Protocole de découpe des éprouvettes.

Les éprouvettes testées ont été usinées suivant le protocole de découpe de la [Figure 2.1](#). Deux éprouvettes de dimensions 2 mm × 20 mm × 20 mm (radial \vec{R} , tangentiel \vec{T} , longitudinal \vec{L}) servant à la mesure des angles des microfibrilles (AMF) de cellulose dans la couche S2 de la paroi cellulaire ont été usinées au début de l'ébauche c'est-à-dire à l'endroit où le traçage avait été réalisé. L'AMF désigne l'angle entre le grand axe de la fibre et les microfibrilles de cellulose qui s'enroulent autour de la cellule. Il varie avec l'orientation des fibrilles de cellulose dans les différentes couches de la paroi cellulaire (Stevanovic & Perrin, 2009). Quatre éprouvettes de dimensions 20 mm × 20 mm × 10 mm (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) ont ensuite été usinées et destinées à la détermination des retraits (R_R et R_T) et points de saturation des fibres (PSF), à la détermination de la composition chimique via la spectroscopie proche infrarouge (SPIR), à la quantification des traits anatomiques des vaisseaux et des fibres et enfin à la détermination de la contrainte de

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

rupture en cisaillement longitudinal. Faute de suffisamment de bois et compte tenu de leur usinage complexe, les éprouvettes de cisaillement usinées dans notre cas (ASTM D143-94, 1994) sont différentes de celles couramment utilisées dans la norme (NF B51-012, 2019). Nous avons tenu à réaliser cet essai à des fins comparatives avec les résultats de la base de données du CIRAD et en raison de son importance dans les structures bois. Un barreau rectangulaire de 370 mm de longueur a été usiné pour l'essai de détermination du module d'élasticité longitudinal. L'essai étant non destructif, après le test, l'éprouvette a été redécoupée en deux autres éprouvettes de longueurs 310 mm et 60 mm pour les essais de flexion dynamique et de rupture en compression axiale respectivement. Les morceaux issus de la rupture en flexion dynamique ont ensuite été utilisés pour la détermination des longueurs des fibres. Nous avons pu obtenir au total 368 éprouvettes pour les essais physico-mécanique et ceux de la SPIR, dont 129 pour les pionniers, 153 pour les hémi-héliophiles et 86 pour les tolérants à l'ombre (Figure 2.1). Pour les essais anatomiques, nous avons retenus 90 éprouvettes dont 30 par tempérament écologique (Tableau 2.3). En effet, ces essais sont très longs et les résultats attendus difficiles à obtenir. Les éprouvettes ont toutes été stabilisés dans une chambre climatique à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et une humidité relative de l'air de $65\% \pm 5\%$.

Tableau 2.3 : Espèces retenues pour la détermination des caractéristiques anatomiques et tempéraments écologiques associés. N_tot : nombre total d'échantillons par espèce ; Temp : Tempérament écologique.

Temp	Espèces	Noms vernaculaires	Famille botanique	N_tot
Pionnier (P)	¹ <i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	Ahinebe	Gentianaceae	6
	¹ <i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	Ovok	Annonaceae	6
	¹ <i>Croton oligandrus</i> Pierre	Ngueul / Obamba	Euphorbiaceae	6
	¹ <i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	Atieghe	Euphorbiaceae	6
	² <i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	Nieuk	Mimosaceae	6
	Total (P)			30
Hémi-héliophile (HH)	² <i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	Ossabel	Burseraceae	6
	¹ <i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	Tola	Caesalpiniaceae	6
	¹ <i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	Essang	Mimosaceae	6
	¹ <i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	Ozouga	Humiriaceae	6
	² <i>Scyphocephalum mannii</i> Warb.	Sorro	Myristicaceae	6
	Total (HH)			30
Tolérant à l'ombre (TO)	² <i>Beilschmiedia spp.</i> Nees	Nkonengui / Kanda	Lauraceae	6
	¹ <i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe	Faro	Caesalpiniaceae	6
	² <i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	Alep	Irvingiaceae	6
	² <i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	Omvong / Eyoum	Caesalpiniaceae	6
	¹ <i>Scytopetalum klaineianum</i> Pierre	Andong	Scytopetalaceae	6
	Total (TO)			30
Total = Total (P) + Total (HH) + Total (TO)				90

¹(Bénédet et al., 2019) ; ²(Meunier et al., 2015)

2.3 Essais de caractérisation physico-mécanique

2.3.1 Essais de rupture

2.3.1.1 Rupture en compression axiale

La résistance à la compression est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges (les contraintes) qui tendent à réduire sa taille par écrasement au-delà de sa limite d'élasticité. L'essai de compression axiale du bois est un essai de résistance mécanique qui est mis en place sur une machine d'essais assurant une vitesse constante de 0,01 mm/s de déplacement de la tête mobile (Figure 2.2) suivant la norme (NF B51-007, 1985). Il est réalisé sur des éprouvettes de dimension 20 mm × 20 mm × 60 mm (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) stabilisés à 12%. L'objectif est la détermination de la contrainte de rupture sous un effort de compression progressivement croissant exercé parallèlement au fil d'éprouvettes de bois sans défauts. L'effort exercé pendant l'essai est mesuré avec une précision de $\pm 1\%$. Avant le début de l'essai, les dimensions transversales (\vec{R} et \vec{T}) de l'éprouvette sont mesurées aux deux extrémités et au milieu à l'aide d'un pied à coulisse de précision $\pm 0,01$ mm. Pendant l'essai, on place l'éprouvette au centre du dispositif d'application de la charge qui est composé de deux plateaux dont l'un est muni d'une rotule. On exerce ensuite l'effort de façon continue à vitesse constante jusqu'à rupture de l'éprouvette. La rupture est détectée lorsque la courbe contrainte/déformation devient constante. La contrainte de rupture en compression axiale σ' de l'éprouvette est calculée suivant l'équation (1) :

$$\sigma'(MPa) = \frac{F}{ab} \quad (1)$$

Où F est la charge maximale en newtons, a et b sont les dimensions en millimètres de la section transversale de l'éprouvette.



Figure 2.2 : Banc d'essai de compression.

2.3.1.2 Rupture en cisaillement longitudinal

L'essai de cisaillement correspond aux efforts qui tendent à faire glisser les fibres les unes sur les autres. En générale, les forces de cisaillement obligent l'une des surfaces du matériau à se déplacer dans une direction tandis que l'autre surface se déplace dans la direction opposée, ce qui provoque une contrainte par le biais du mouvement de glissement. Cet essai implique des forces parallèles à ces surfaces contrairement aux essais de traction et de compression. Le but de cet essai est d'évaluer la contrainte maximale que le matériau peut supporter avant de céder. Habituellement, il se fait sur des éprouvettes conventionnelles de forme définie selon la norme (NF B51-012, 2019). Pour des raisons pratiques, le type d'éprouvette dans notre cas (Figure 2.3) est plus proche de celui utilisé par la norme (ASTM D143-94, 1994). Le protocole employé est une adaptation de cette norme. Les éprouvettes sont des petits cubes de dimensions $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) stabilisés à 12%. Ici, la force produisant le cisaillement est appliquée par compression suivant le plan (LR) (identique à celui de la norme (NF B51-012, 2019)). Pendant l'essai, l'éprouvette est placée avec soin dans l'outil de cisaillement (Figure 2.3). Cela permet de veiller à ce que la barre transversale soit ajustée de sorte que les bords de l'éprouvette soient verticaux et que ses extrémités reposent uniformément sur le support dans la zone de contact. On applique ensuite la charge (force) de façon continue à une vitesse de déplacement de la traverse mobile de 0,01 mm/s en soutenant l'éprouvette sur les surfaces d'extrémité. On observe l'évolution de la charge maximale et la rupture est détectée lorsque la courbe contrainte/déformation devient constante. La contrainte de résistance au cisaillement est donnée par l'équation 2.

$$\tau(\text{MPa}) = \frac{F}{ab} \quad (2)$$

Où F est la charge maximale en newtons, a et b sont les dimensions en millimètres de la section cisailée (plan LR).

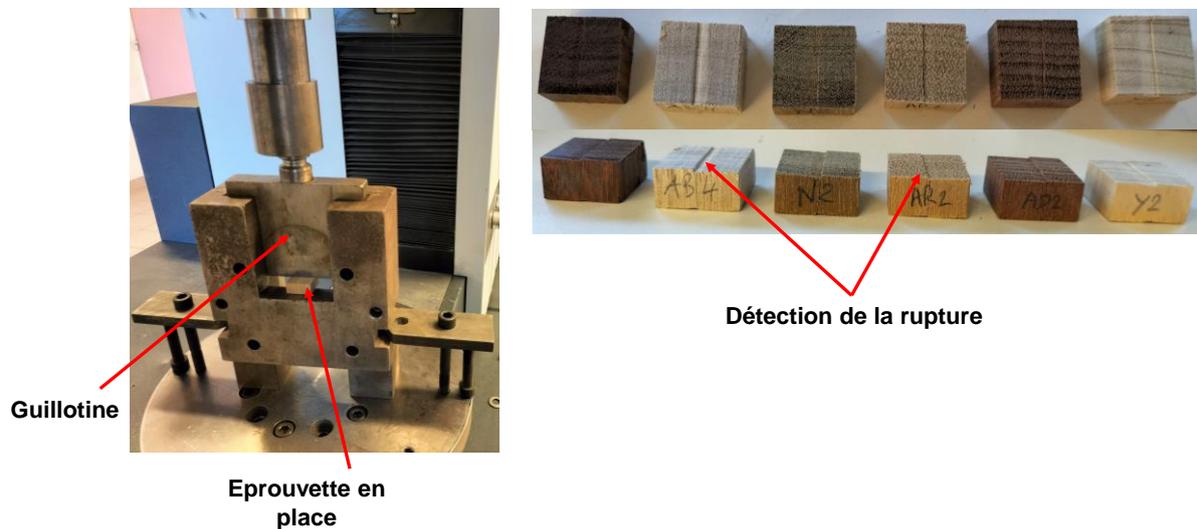


Figure 2.3 : Dispositif expérimental de l'essai de cisaillement.

2.3.1.3 Rupture en flexion dynamique

L'essai de flexion dynamique a pour but de déterminer l'énergie de rupture d'une éprouvette de bois reposant sur deux appuis, par application d'un effort dynamique exercé au milieu de la portée. C'est un essai rapide réalisé au moyen d'un mouton-pendule dont l'énergie disponible au moment du choc est de l'ordre de 3 à 5 fois l'énergie absorbée à la rupture et dont la panne a une masse de 10,2 kg (Figure 2.4). Il a été réalisé suivant la norme (NF B51-009, 1985) sur des éprouvettes rectangulaires de dimensions 20 mm × 20 mm × 310 mm (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) issues des éprouvettes de détermination du module d'élasticité longitudinal redécoupées et stabilisées à 12%. Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées aux deux extrémités et au milieu à l'aide d'un pied à coulisse de précision $\pm 0,01$ mm. Pendant l'essai, l'éprouvette repose sur deux appuis distants de 240 mm \pm 1 mm et le choc est appliqué tangentiellement aux cernes du bois au milieu des appuis par la panne du mouton-pendule. L'éprouvette est rompue par un seul choc et on mesure l'énergie totale emmagasinée par l'éprouvette lors de sa rupture à 1 Joule (J) près. Selon les éprouvettes, la rupture était soit franche soit esquilleuse.

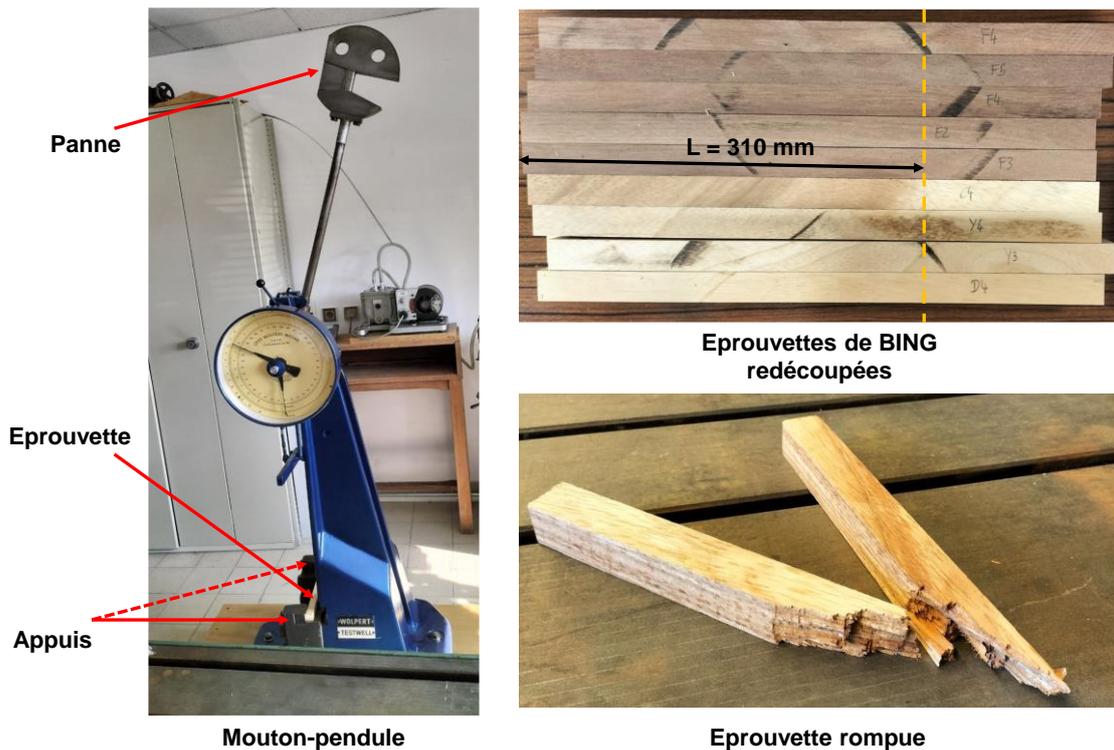


Figure 2.4 : Dispositif de rupture en flexion dynamique.

2.3.2 Essais de rigidité

2.3.2.1 Détermination du module d'élasticité longitudinal

Le dispositif BING (Beam Identification by Non-Destructive Grading) est une méthode de caractérisation mécanique du matériau bois rapide et non-destructive qui permet de déterminer le module d'élasticité longitudinal d'une poutre de bois. Elle permet également d'obtenir une estimation des modules de cisaillement (G_{LT} ou G_{LR}) et de l'amortissement de chaque fréquence de résonance (Aramaki et al., 2007; Brancheriau et al., 2006; Brancheriau, 2014). Elle a été développée par Bordonné (1989) et améliorée par Brancheriau & Bailleres (2002). En pratique, l'éprouvette à tester de dimension $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 370 \text{ mm}$ (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) et dont le poids est connu, repose sur deux supports élastiques afin que la propagation des vibrations soit la plus libre possible lors de la percussion perpendiculaire aux fibres du bois par une bille métallique sur l'une de ses extrémités. À l'autre extrémité, un microphone enregistre les vibrations émises et les transmet à une carte d'acquisition (convertisseur analogique-numérique) qui fournit au micro-ordinateur le signal numérisé, traité par Transformée de Fourier Rapide (FFT) afin d'interpréter l'information dans le domaine fréquentiel (Figure 2.5). Le traitement mathématique des fréquences sélectionnées (calcul et régression linéaire) est effectué à partir de la masse et des caractéristiques géométriques mesurées en trois points de l'échantillon pour

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

les deux directions (\vec{R} et \vec{T}). Ces caractéristiques permettent également de déterminer la masse volumique de l'échantillon testé (Equation 3).

$$\rho \left(\text{kg}/\text{m}^3 \right) = \frac{M}{a \times b \times e} \quad (3)$$

Où M est la masse de l'éprouvette en kilogrammes (kg), a, b et e respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette en mètres (m).

L'analyse spectrale des vibrations de flexion permet d'identifier les fréquences propres de la poutre issues de la sollicitation de tous ses modes propres de vibration (Figure 2.5) selon le modèle de Timoshenko. Trois premières fréquences sont en général suffisantes pour déterminer le module d'élasticité longitudinal E_L comme indiqué aux équations 4 et 5.

$$\frac{E_X}{\rho} - \frac{E_X}{KG_{XY}} \left[\alpha F_2(m) 4\pi^2 \frac{SL^4 f_n^2}{I_{Gz} X_n} \right] = 4\pi^2 \frac{SL^4 f_n^2}{I_{Gz} X_n} [1 + \alpha F_1(m)] \quad (4)$$

Les valeurs de E_X et G_{XY} se calculent en effectuant une régression linéaire sur les couples (x,y), dépendant de l'indice n (Hearmon 1958, 1966 dans (Brancheriau & Bailleres, 2002)), tels que :

$$\begin{cases} x = \alpha F_2(m) 4\pi^2 \frac{SL^4 f_n^2}{I_{Gz} X_n} \\ y = 4\pi^2 \frac{SL^4 f_n^2}{I_{Gz} X_n} [1 + \alpha F_1(m)] \end{cases} \quad (5)$$

Où ρ désigne la masse volumique ou la densité, X_n la solution de Bernoulli, L la longueur de la poutre, f les fréquences de vibrations, E_X et G_{XY} les module d'élasticité et de cisaillement, $F_1(m)$ et $F_2(m)$ les paramètres dépendant du rang de la fréquence de vibration, S l'aire de la section droite, I_{Gz} le moment quadratique de la section droite, K le facteur de forme de la section droite et α le facteur d'élanement.

Les paramètres m, X_n , $F_1(m)$ et $F_2(m)$ se calculent en fonction de l'indice n.

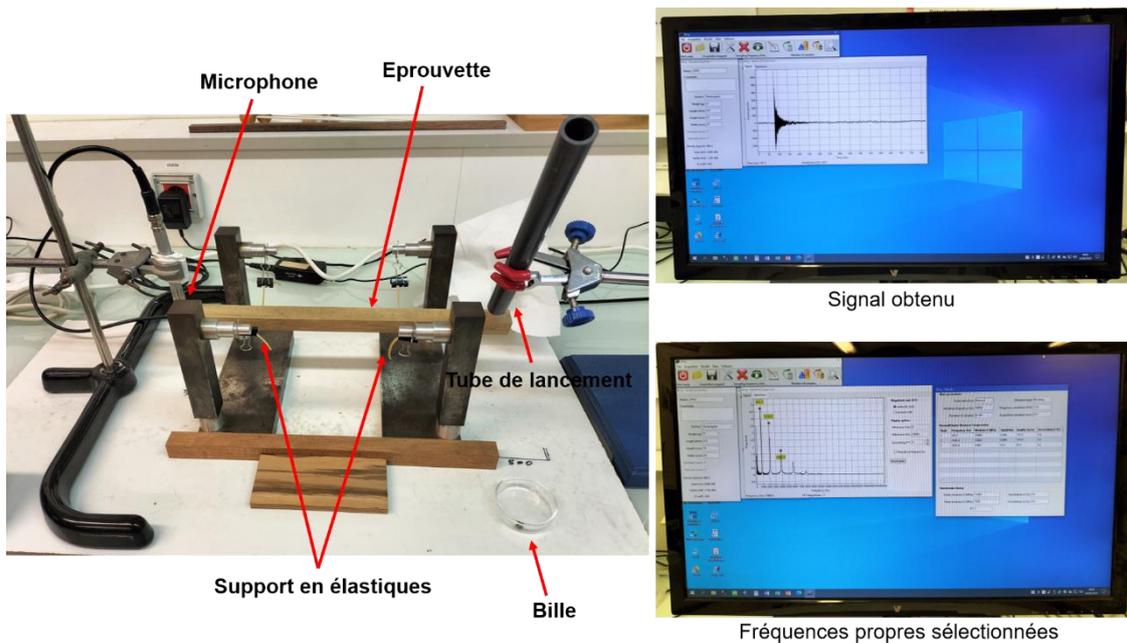


Figure 2.5 : Dispositif expérimental de l'essai de détermination du module d'élasticité longitudinal.

2.3.2.2 Détermination de l'angle des microfibrilles

La diffraction de rayons X (DRX) correspond à un phénomène d'interférence des photons ayant interagi avec des électrons fortement liés aux atomes d'un matériau. La DRX est utilisée comme une technique standard de cristallographie. Compte tenu du caractère cristallin des microfibrilles de cellulose, la DRX peut être utilisée davantage comme une méthode indirecte, mais robuste et rapide pour l'estimation de l'angle des microfibrilles (AMF). Au contraire des mesures de cristallinité des matériaux, la mesure de l'AMF n'utilise pas un matériau transformé en poudre, car la structure microscopique de la paroi cellulaire doit être préservée. Les échantillons sont coupés selon les plans d'anisotropie du bois et le faisceau X incident est perpendiculaire à la surface de l'échantillon. Selon la section transversale du faisceau et l'épaisseur de l'échantillon, plusieurs centaines de cellules de bois contribuent à la diffraction (Baettig 2005 dans (Ruelle, 2006)). La technique de diffraction utilisée pour déterminer l'AMF est la diffraction des rayons X aux grands angles (WAXS – Wide Angle X-ray Scattering), basée sur l'équation de Bragg (Équation 6).

$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (6)$$

Avec d la distance inter réticulaire c'est-à-dire entre deux plans cristallographiques, θ l'angle de Bragg, soit la moitié de l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur, n l'ordre de diffraction et λ la longueur d'onde des rayons X.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

Le diffractomètre utilisé pour la détermination de l'AMF pendant l'essai est le modèle Supernova de chez Oxford Diffraction. Il est constitué de différents éléments pouvant être classés en trois catégories : source, positionnement et acquisition des données. Le protocole d'essai consiste dans un premier temps à placer un échantillon de dimension 2 mm × 20 mm × 10 mm (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) sur un porte-échantillon. Puis avec le logiciel CrysAlis Pro, l'échantillon est aligné avec le faisceau de rayon-X à l'aide des vis de réglage. Le goniomètre replace ensuite l'échantillon entre le tube à rayon-x et la caméra CCD. Un faisceau de rayon-X est ensuite envoyé sur la face tangentielle (LT) de l'échantillon. L'émission des rayons X se fait grâce à une source microfocus avec une anticathode en cuivre, fonctionnant à 50keV/0,8mA. Un système optique, constitué d'un shutter rapide (volet qui s'ouvre pour laisser passer les rayons X), d'un monochromateur et d'un collimateur permet d'obtenir un faisceau de rayons X monochromatique d'environ 300 μm de diamètre (Placet et al., 2011). Les actions qui consistent à réaliser un tir et à enregistrer l'image obtenue s'effectuent via l'interface du logiciel. Les résultats sont enregistrés sous forme de diffractogrammes, qui traduisent graphiquement des pics de diffraction. L'AMF est corrélé à la largeur du pic de diffraction d'un plan 002 de la cellulose selon la formule de Cave (1966).

$$AMF = 0.6 \times T \quad (7)$$

Avec T la demi-largeur du pic de diffraction.

La [Figure 2.6](#) présente le dispositif expérimental.

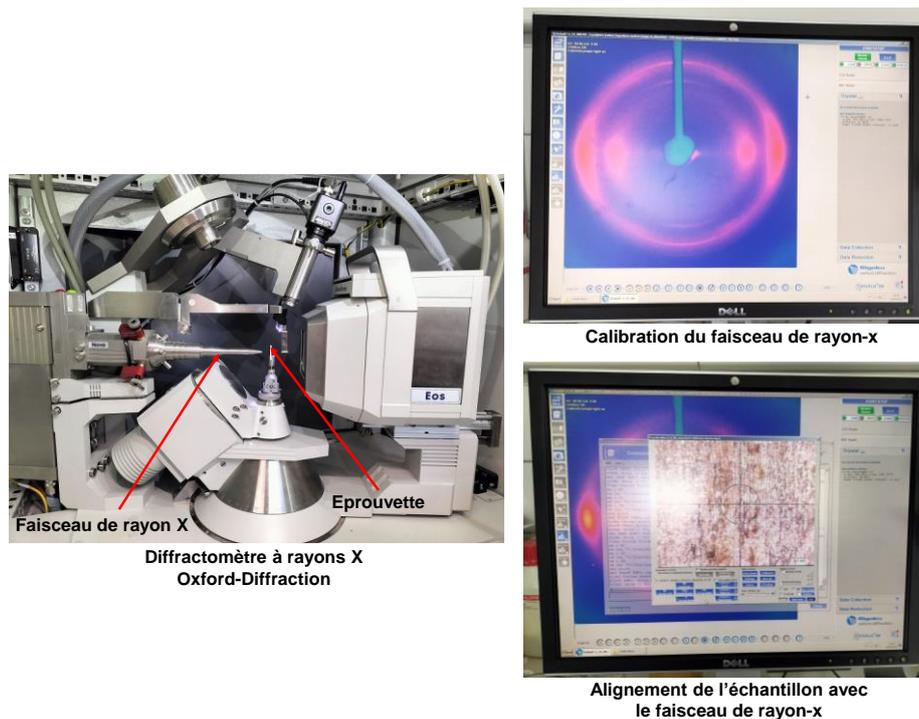


Figure 2.6 : Diffractomètre Oxford-Diffraction pour la détermination des angles des microfibrilles (AMF).

2.3.3 Essais hygroscopiques

Les variations de masse et des dimensions des espèces étudiées ont été déterminées sur de petites éprouvettes de section $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}). Celles-ci ont été référencées et leurs arêtes ébavurées au papier de verre fin (240). Des cercles ont été réalisés à l'aide d'un tampon encreur sur les faces (LR) et (LT) des spécimens afin de s'assurer que les mesures successives soient toujours réalisées au même endroit (Figure 2.8). Une première étape de saturation des éprouvettes a été réalisée afin d'avoir comme point de départ un état très humide ou vert. Les éprouvettes ont donc été immergées dans des bocaux en verre contenant de l'eau distillée (chaque espèce dans un bocal). Afin de permettre leur immersion totale, un poids a été introduit dans chaque bocal. De plus, un trou a été réalisé sur les couvercles des bocaux afin de permettre une bonne circulation de l'air. Les bocaux ont enfin été introduit dans un autoclave et des cycles de mise sous vide et à pression atmosphérique ont été réalisés pendant 48 heures (Figure 2.7). Au terme de ce temps de saturation, les masses et les dimensions radiale et tangentielle des éprouvettes saturées ont été mesurées. Les mesures sont faites à l'aide d'un comparateur au $1/1000^e$ mm et les pesées sont faites sur une balance au $1/1000^e$ g (Figure 2.8). Les éprouvettes ont ensuite été stabilisées (masses constantes) à des paliers différents en enceinte climatique. D'abord à une humidité théorique H_t d'environ 18 % pendant 16 jours (30°C et 85% HR), puis à 12 % pendant 13 jours (20°C et 65% HR) et enfin à 6% pendant 13

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

jours (20°C et 30% HR). Pour chaque palier de stabilisation, les mesures des masses et des dimensions des éprouvettes ont été effectuées. La masse anhydre a été déterminée à 103°C après 48 heures.

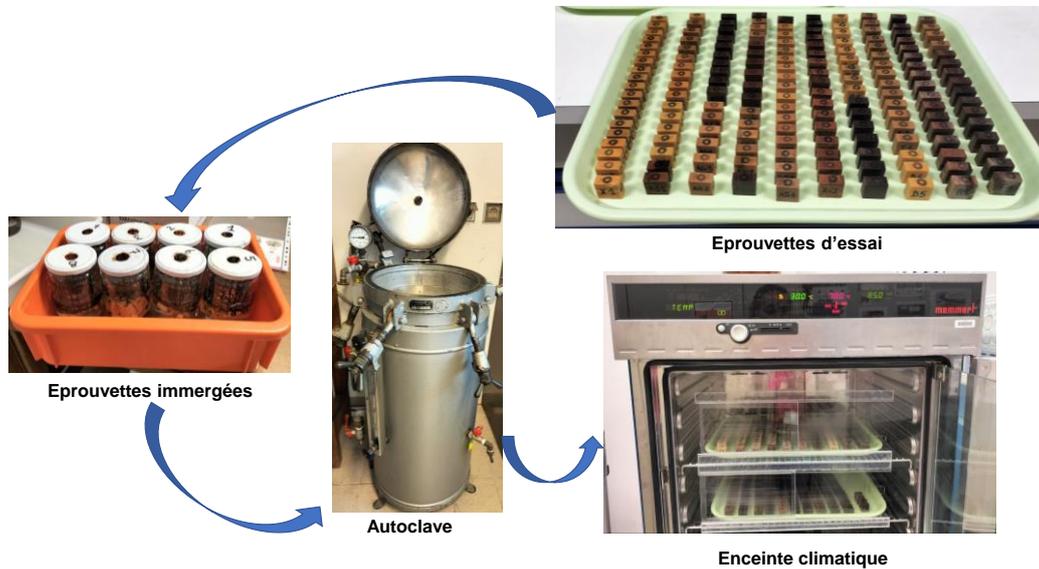


Figure 2.7 : Conditionnement des éprouvettes destinées aux calculs des retraits et PSF.

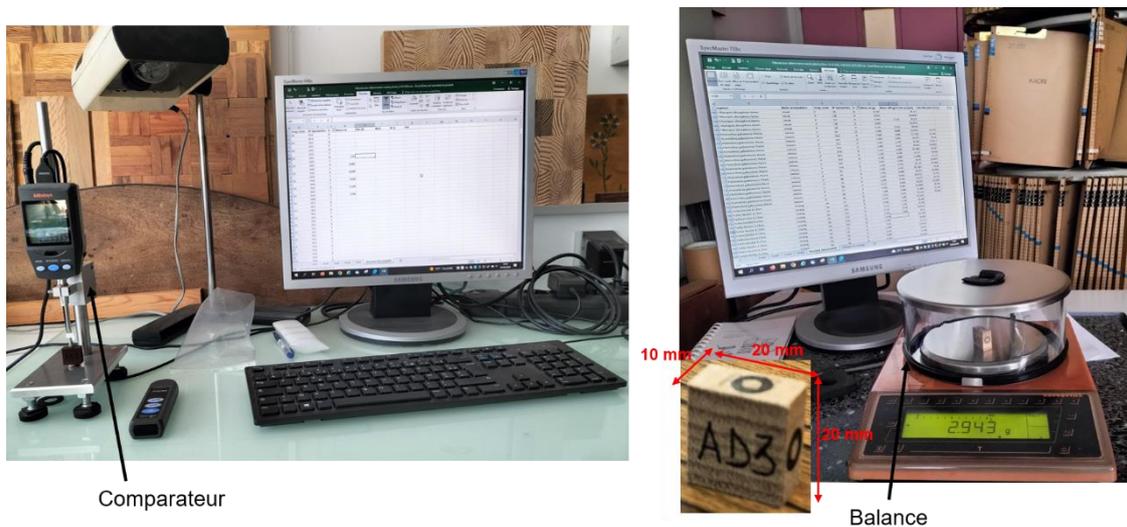


Figure 2.8 : Mesure des éprouvettes de retraits.

Les mesures des dimensions radiale et tangentielle des éprouvettes à saturation et à l'état anhydre ont permis de déterminer les paramètres de stabilité dimensionnelle de nos bois, à savoir les retraits totaux radial (R_R en %) et tangentiel (R_T en %) et l'anisotropie des retraits ($\frac{R_T}{R_R}$). Les équations suivantes sont utilisées :

$$R_R(\%) = \frac{L_{SR} - L_{OR}}{L_{SR}} \times 100 \quad (8)$$

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

$$R_T(\%) = \frac{L_{ST} - L_{0T}}{L_{ST}} \times 100 \quad (9)$$

Où L_{SR} et L_{ST} sont les dimensions radiale et tangentielle des éprouvettes à l'état saturé et L_{0R} et L_{0T} les dimensions radiale et tangentielle à l'état anhydre.

Le point de saturation des fibres (PSF) a été déterminé suivant la méthode développée par Anne Thibaut dans les années 90 au CIRAD (Guibal et al., 2023). Cette méthode repose sur la mesure des dimensions radiales et tangentielles énoncée plus haut d'éprouvettes orientées, successivement dans des états : saturé puis stabilisé et enfin anhydre. Pour ces différents états, la surface de l'éprouvette (dimension radiale \times dimension tangentielle) ainsi que son taux d'humidité réelle H_r (Equation 10) ont été déterminés. Le PSF correspond à l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire entre d'une part la différence entre la surface de l'éprouvette à l'état saturé et sa surface à un autre état (en abscisse), et d'autre part l'humidité réelle de l'éprouvette à l'état correspondant (en ordonnée). La Figure 2.9 ci-dessous illustre les régressions linéaires permettant d'obtenir les PSF de trois éprouvettes de bois.

$$H_r(\%) = \frac{M_{H_t} - M_0}{M_0} \times 100 \quad (10)$$

Où M_{H_t} est la masse à l'humidité théorique H_t et M_0 la masse à l'état anhydre.

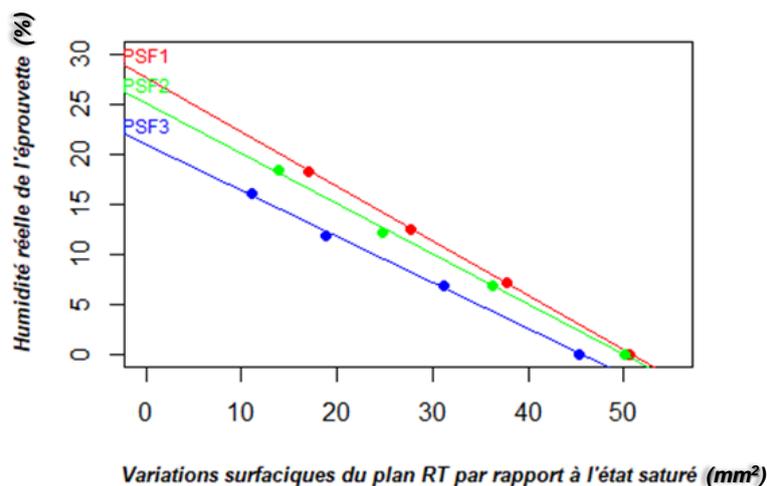


Figure 2.9 : Détermination du PSF par régression linéaire.

2.4 Essais de caractérisation anatomique

2.4.1 Longueur des fibres : dilacération

La dilacération est un essai qui consiste à mesurer les longueurs des fibres de bois. Le procédé utilisé est celui de Franklin (Normand, 1998). Il consiste à prendre un morceau de bois (issu de la rupture en flexion dynamique dans notre cas) qu'on fend en plusieurs buchettes de la grosseur d'une allumette. Ces buchettes de bois sont ensuite introduites dans un petit flacon à bouchon vissé contenant une solution à parties égales d'acide acétique pur cristallisable et d'eau oxygénée à 20 volumes. Le flacon fermé hermétiquement est ensuite placé à l'étuve à 60°C pendant 48 heures. Au bout des 48 heures, le flacon est retiré de l'étuve et laissé refroidir avant ouverture. Une fois refroidi, on rince les buchettes à l'eau en vidant le plus de mélange possible et en le remplaçant plusieurs fois par de l'eau. Après le dernier rinçage, on laisse une quantité suffisante d'eau dans le flacon contenant les buchettes puis on le ferme et l'agite. Après agitation, on obtient une dispersion des fibres du bois dans l'eau. Au total, 90 éprouvettes ont été testées. La durée d'une mesure pour une éprouvette est d'environ 50 heures. La Figure 2.10 résume ce protocole. Compte tenu de la difficulté à mesurer des fibres de bois directement, il était nécessaire de passer par la création d'image à l'aide d'un microscope instrumenté de marque Olympus BX60.

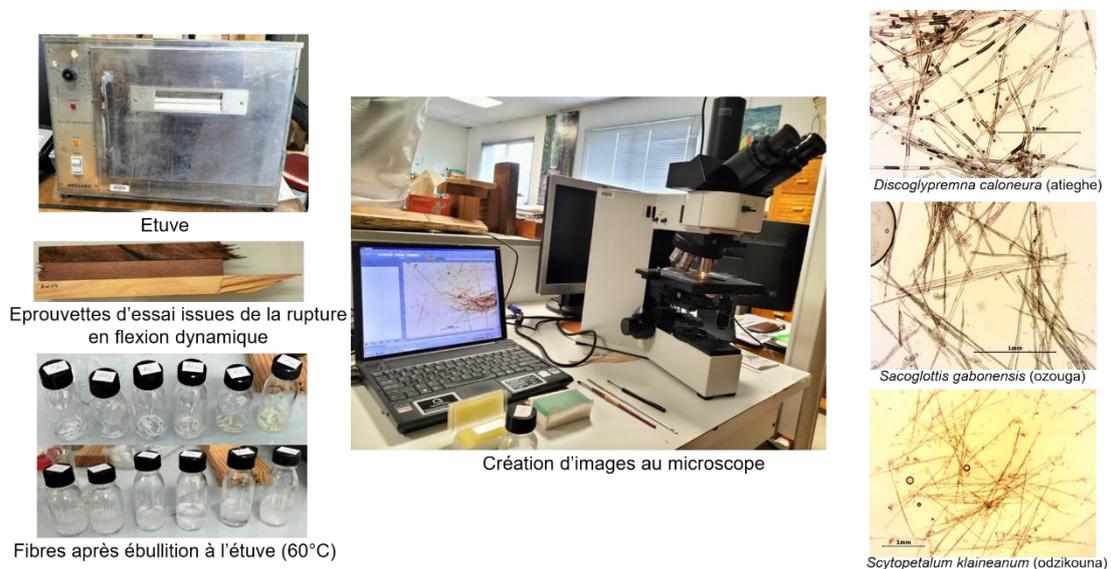


Figure 2.10 : Détermination des longueurs des fibres.

La mesure des longueurs des fibres s'est faite grâce au logiciel d'analyse d'image imageJ (Figure 2.11). Par éprouvette, 12 à 20 images étaient nécessaires pour pouvoir mesurer 50 fibres. La moyenne des 50 fibres représentait la longueur moyenne des fibres d'une éprouvette.

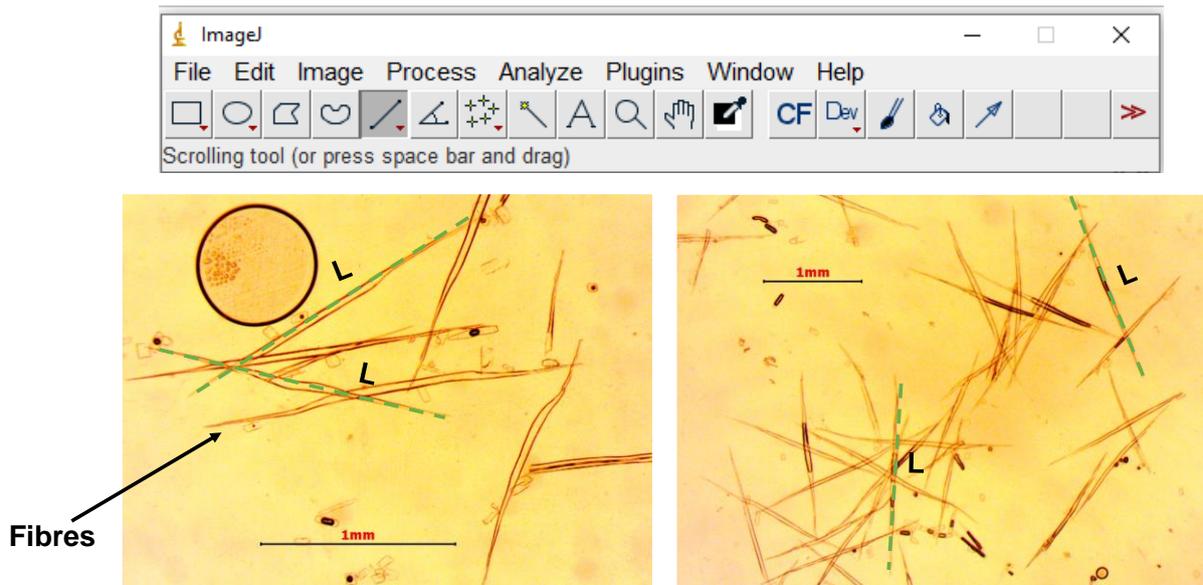


Figure 2.11 : Mesures des longueurs des fibres. L : longueur mesurée en mm (pointillés vert).

2.4.2 Caractéristiques des vaisseaux et des parois des fibres

Découpage et ramollissement des échantillons

Une des 4 éprouvettes de dimension 20 mm × 20 mm × 10 mm (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) a été redécoupée au ciseau à bois en de plus petites éprouvettes de dimension maximum 10 mm × 10 mm × 10 mm. Les échantillons (368 éprouvettes) ont au préalable été ramollis pour pouvoir ensuite être découpés au microtome à bois. Pour cela, une solution d'eau déminéralisée, de glycérol et d'alcool a été préparée. Elle a été dosée suivant deux protocoles. Une première fois à 1 volume de glycérol pour 1 volume d'eau à froid puis une seconde fois à 1 volume d'alcool à 95°, 3 volumes de glycérol et 1 volume d'eau car le ramollissement était toujours difficile au bout d'un mois d'immersion des échantillons dans la première solution. Afin d'optimiser l'imprégnation de la solution dans les échantillons et la rendre plus homogène, le glycérol a été dissout dans de l'eau pendant 1 heure sous agitation (barreau aimanté) et en chauffant légèrement (Figure 2.12). Les échantillons y sont restés immergés jusqu'à un éventuel ramollissement. Afin d'accélérer l'effet du glycérol sur les parois des cellules du bois pour les échantillons les plus durs, la solution a été portée à 100°C avec un agitateur à 100 tours par minute. Bien que certains échantillons durs aient coulés, la majorité d'entre eux n'étaient toujours pas suffisamment ramollis.

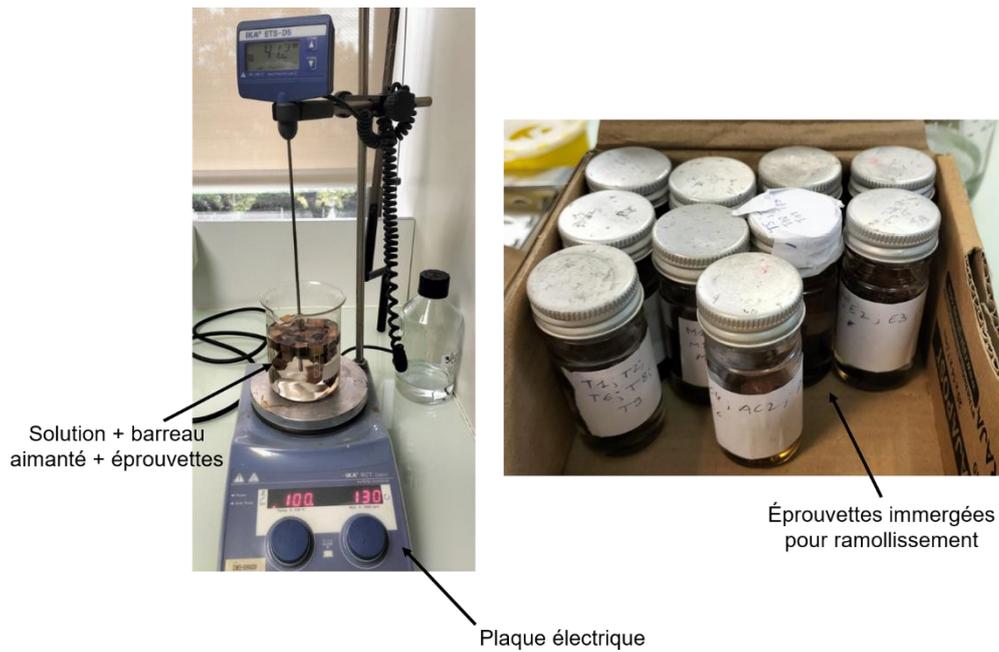


Figure 2.12 : Ramollissement des éprouvettes.

Découpage au microtome

Au total 134 échantillons ont pu être ramollis et ont donc été découpés au microtome à bois. Pour le découpage, l'échantillon était fixé dans l'étau du microtome afin d'éviter tout endommagement de l'échantillon (Figure 2.13). On vérifiait l'inclinaison de la surface du bloc et on s'assurait qu'elle soit suffisamment droite pour réaliser des coupes exploitables. Les lames utilisées pour la coupe devaient être régulièrement changées toutes les 3 à 5 coupes. Lors du processus de découpe, un pinceau imbibé de glycérol (solution d'immersion des échantillons) était déposé sur le morceau de cube de bois ainsi que sur la lame afin de permettre à celle-ci de glisser dessus sans s'abîmer. Une fois la coupe effectuée, celle-ci était récupérée à l'aide d'un pinceau ou d'une pince et déposée dans du glycérol. Les coupes étaient d'une épaisseur comprise entre 25 et 30 μm . Des raclements étaient fréquents lors de la découpe des bois les plus durs, indiquant qu'ils n'étaient pas suffisamment ramollis. Ils étaient donc remis au trempage et même après chauffage, nous n'avons pas pu obtenir de coupe. Nous avons pu obtenir au total 88 coupes exploitables mais pas suffisamment pour les groupes écologiques des hémi-héliophiles et des tolérants à l'ombre (les plus durs). Pour combler ce manque, nous avons poncé d'abord au papier à grain puis à la ponceuse électrique 18 échantillons des bois de ces deux tempéraments écologiques jusqu'à pouvoir distinguer les vaisseaux et fibres du bois au microscope. Nous avons choisi de garder 30 coupes par tempéraments écologiques pour pouvoir faire une comparaison statistique entre les groupes.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

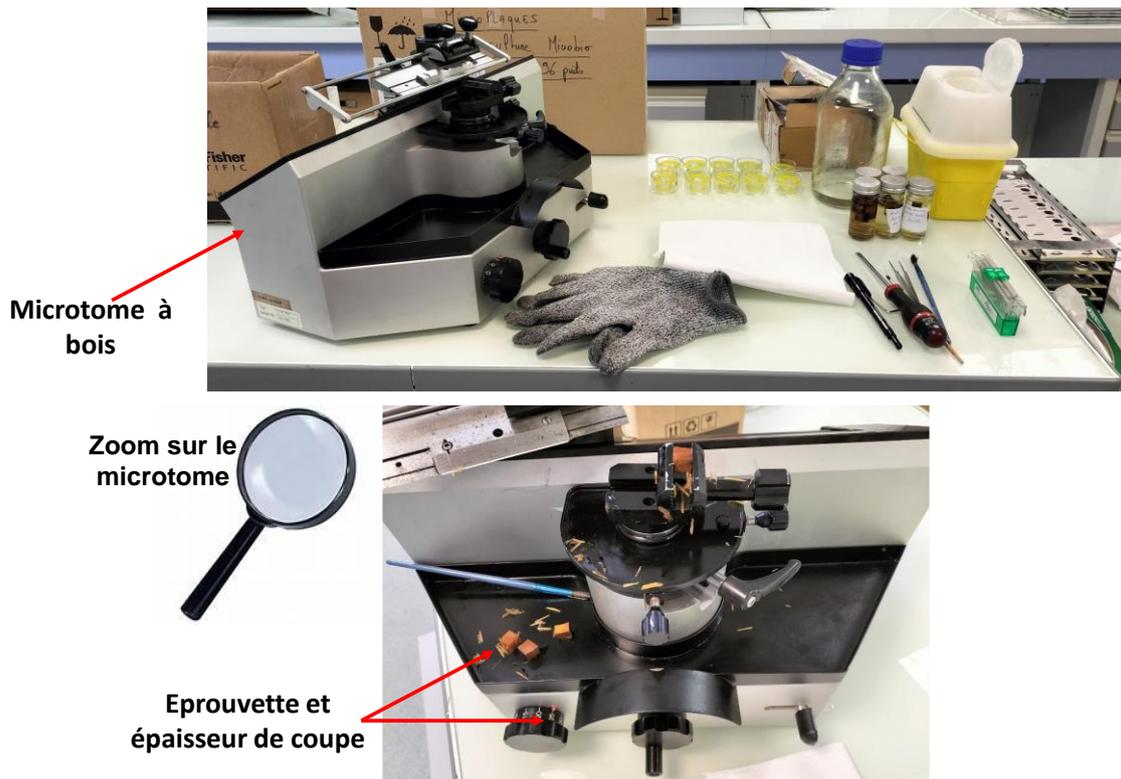


Figure 2.13 : Découpage des éprouvettes au microtome à bois.

Coloration des coupes

Les coupes obtenues ont été colorées à l'aide d'une solution de bleu de toluidine à l'alcool. La composition de la préparation était la suivante : 1 g de poudre de bleu de toluidine, 1 ml d'alcool à 70° et 90 ml d'eau distillée. Les étapes de la préparation consistaient à dissoudre le bleu de toluidine dans l'alcool, à agiter le mélange, puis à rajouter de l'eau distillée et enfin à agiter le mélange à l'agitateur magnétique pendant 30 minutes maximum. Une fois la solution prête, sous hotte aspirante, la coupe était trempée dans la solution pendant 30 secondes. La coupe était ensuite retirée et rincée dans trois bacs successifs d'eau distillée. Après cela, la coupe était immergée dans de l'alcool à 70° pendant 15 secondes (Figure 2.14). Ensuite, à l'aide d'un pinceau ou d'une pince la coupe colorée était déposée sur une lame. Avec une petite spatule on la recouvrait d'une goutte d'histolaque suffisante pour recouvrir l'entièreté de la coupe puis on posait une lamelle par-dessus. La lame obtenue restait à sécher pendant 5 jours à une semaine avec dessus un poids fait de plomb enveloppé de papier d'aluminium (Figure 2.14).

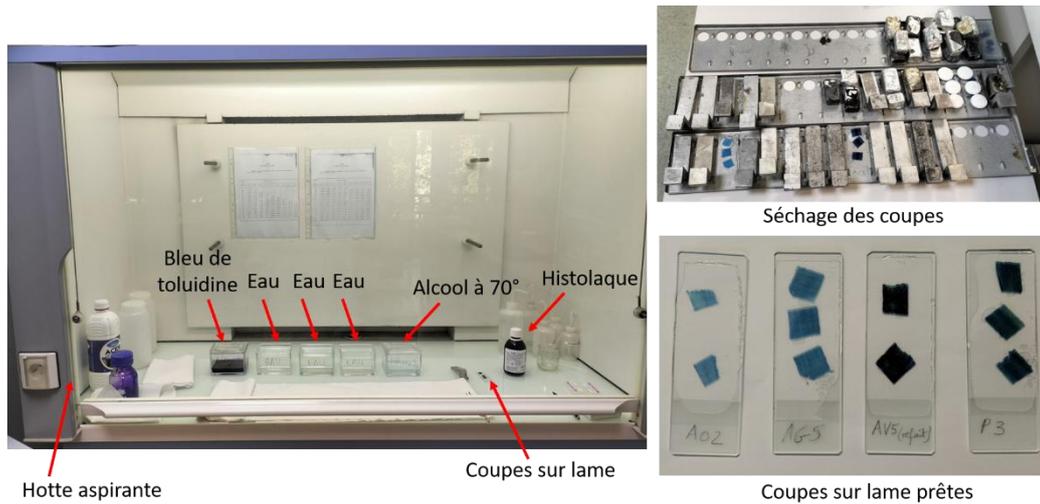


Figure 2.14 : Coloration des coupes et préparation des lames.

Création d'images avec le microscope Kayence

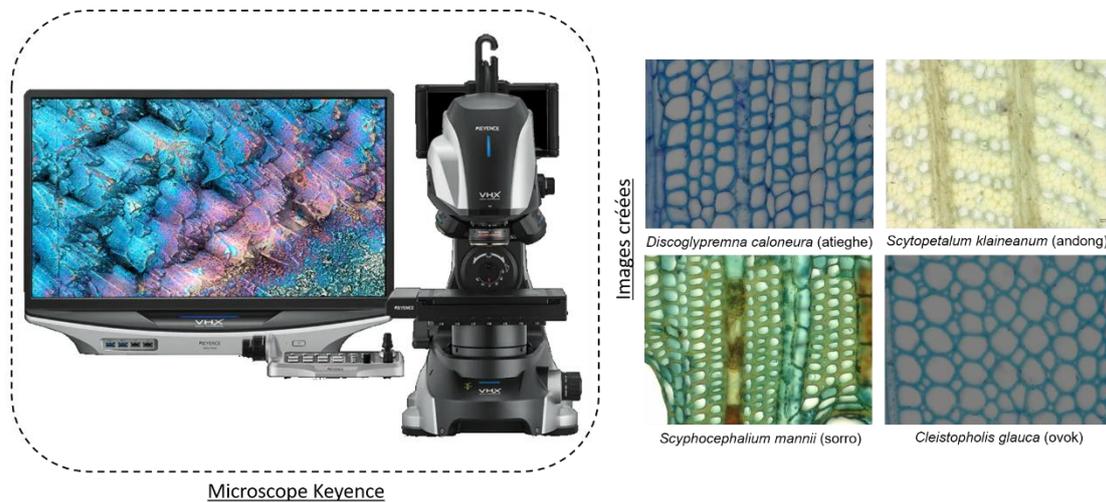
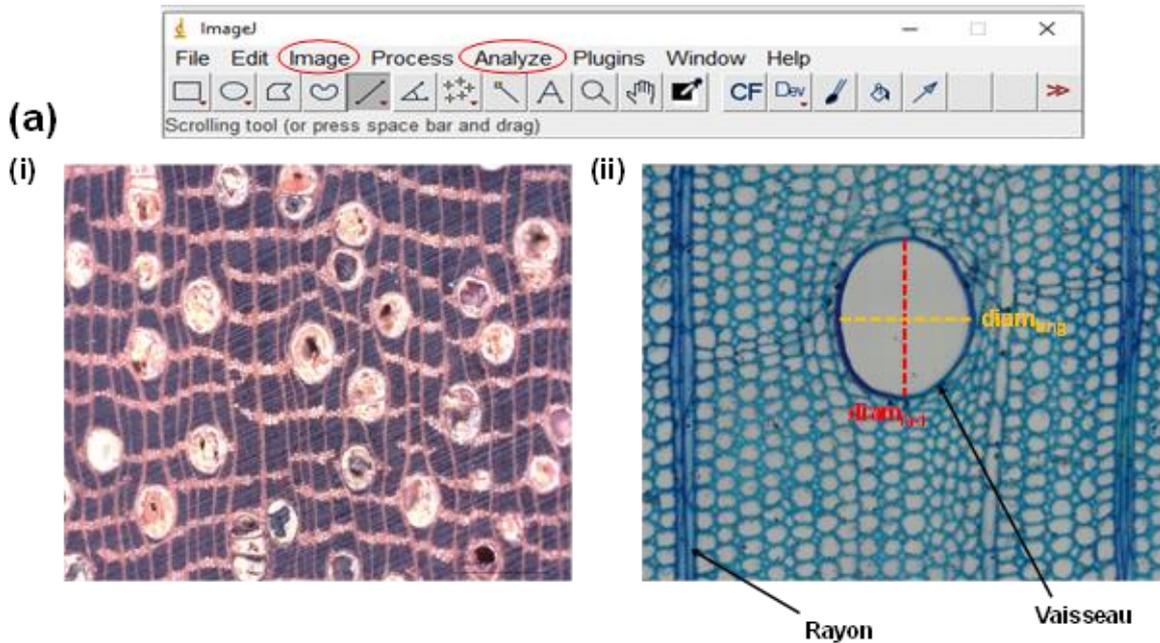


Figure 2.15 : Utilisation du microscope numérique Keyence pour la création d'images microscopiques.

À partir des images obtenues grâce au microscope numérique Keyence (Figure 2.15), nous avons pu déterminer les caractéristiques anatomiques des vaisseaux (a et b de la Figure 2.16) et des parois des fibres (c de la Figure 2.16) telles que les diamètres (radial, tangentiel et moyen) des vaisseaux, le nombre de vaisseaux par mm^2 et les épaisseurs (radiale, tangentielle et moyenne) des parois des fibres. Les mesures ont été réalisées à l'aide du logiciel imageJ. Un diamètre radial et une épaisseur radiale correspondent à des mesures effectuées parallèlement aux rayons du bois (Figures a et c). Les traits tangentiels correspondent à des mesures réalisées perpendiculairement aux rayons du bois (Figures a et c). Le nombre de vaisseaux a été déterminé grâce à une analyse particulière automatique et parfois manuelle lorsque plusieurs vaisseaux se touchaient (Schneider et al., 2012). L'analyse automatique des particules

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

(vaisseaux) nécessite une image « binaire » c'est-à-dire en noir et blanc par la définition d'un seuil (étape 1 de la figure b). On obtient ainsi des informations sur chaque particule (vaisseaux) de l'image (étape 3 de la figure b). Le nombre, la surface et la taille moyenne des vaisseaux sont renvoyés dans une fenêtre de texte. Au total, 30 vaisseaux et parois étaient requis pour déterminer la moyenne d'un trait par échantillon.



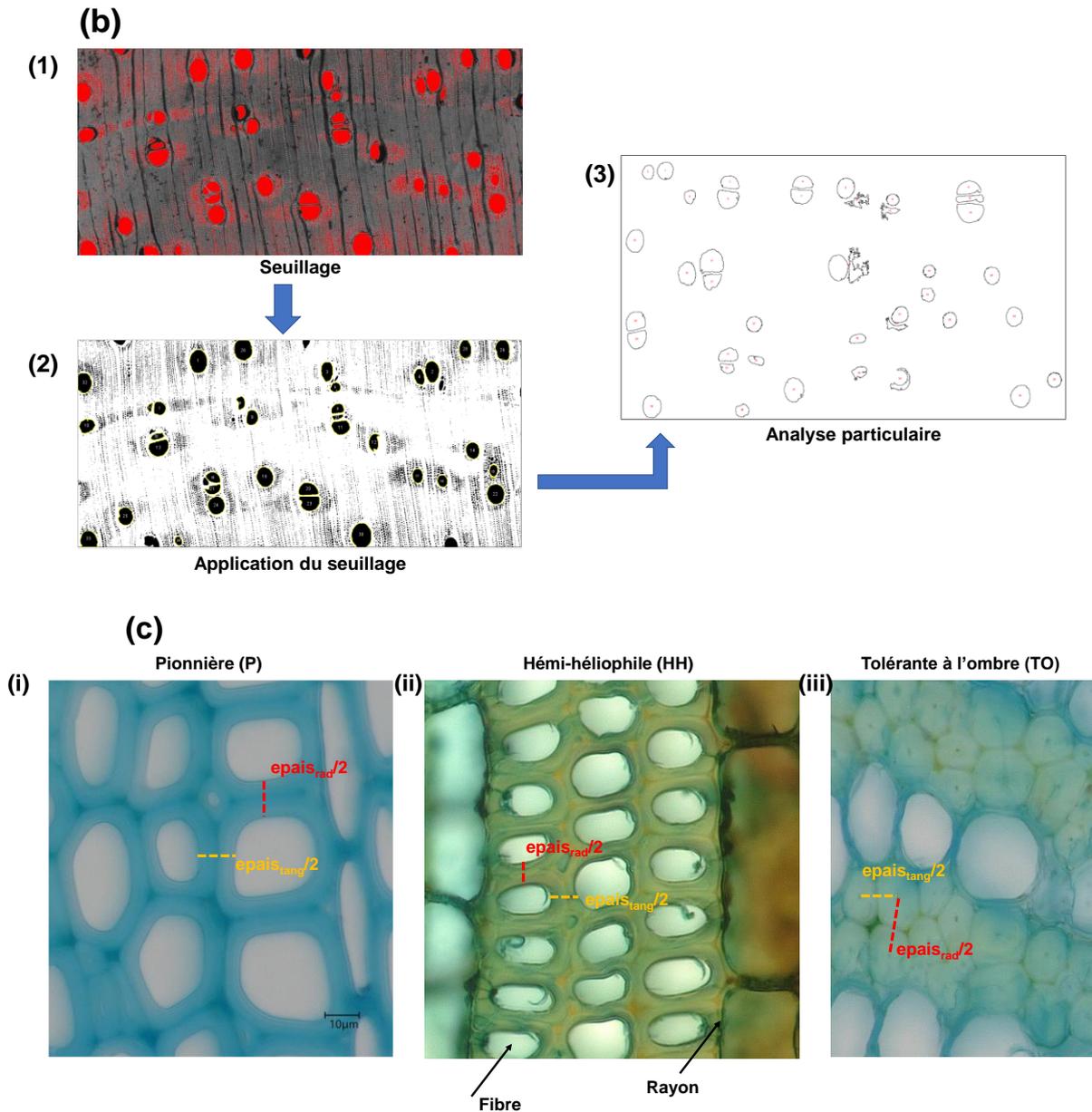


Figure 2.16 : Mesures des caractéristiques anatomiques sous le logiciel imageJ. (a) Mesures des diamètres radial et tangentiel des vaisseaux. (b) Détermination du nombre de vaisseaux par unité de surface. (c) Mesures des épaisseurs radiale et tangentielle des parois des fibres. $diam_{tang}$ et $epais_{tang}$ correspondent respectivement au diamètre et épaisseur tangentiels ; $diam_{rad}$ et $epais_{rad}$ représentent respectivement les diamètres radiaux et les épaisseurs radiales.

2.5 Détermination de la composition chimique via la spectroscopie proche infrarouge

2.5.1 Obtention des spectres

La Spectroscopie proche infrarouge (SPIR) est une méthode d'analyse non destructive à la fois quantitative et qualitative. Elle permet de prédire la teneur en constituants chimiques et aide à identifier un produit ou composé suivant son empreinte spectrale. Les éprouvettes utilisées pour

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

cet essai étaient de petits cubes de bois de section $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}). Les surfaces des cubes ont été poncées afin d'avoir une qualité de surface optimale (lisse, homogène et sans rugosité). L'acquisition des spectres s'est faite sur la face transversale des cubes (Figure 2.17) à l'aide du spectromètre Spectrum Two N (PerkinElmer) par réflectance dans la plage $[10000 ; 4000\text{ cm}^{-1}]$ (1000 à 2500 nm). La résolution du spectromètre est de 16 cm^{-1} avec une moyenne de 32 acquisitions.

Le principe de fonctionnement de la SPIR repose sur l'absorption du rayonnement proche infrarouge par la matière organique. Dans l'infrarouge, les mécanismes en jeu sont les vibrations des liaisons moléculaires, en particulier des liaisons chimiques C-H, O-H et N-H. On trouve ces groupes fonctionnels dans tous les constituants du bois (cellulose, hémicellulose, lignine, extractibles), de sorte que tout changement dans la composition du bois, est quantifiable. Pendant la mesure, le spectromètre acquiert une valeur d'absorption pour chacune des longueurs d'onde émises dans le proche infrarouge. Le spectre d'absorption permet de représenter graphiquement l'ensemble de ces données spectrales, acquises sur une surface d'analyse correspondante au spot de lumière proche infrarouge (Giroud et al., 2020). Pour un matériau complexe comme le bois, les spectres d'absorption recueillis sont difficilement interprétables ; c'est pourquoi des techniques d'analyse statistique sont utilisées afin de mettre au point des modèles qui servent ensuite à estimer et quantifier les composés chimiques présents.

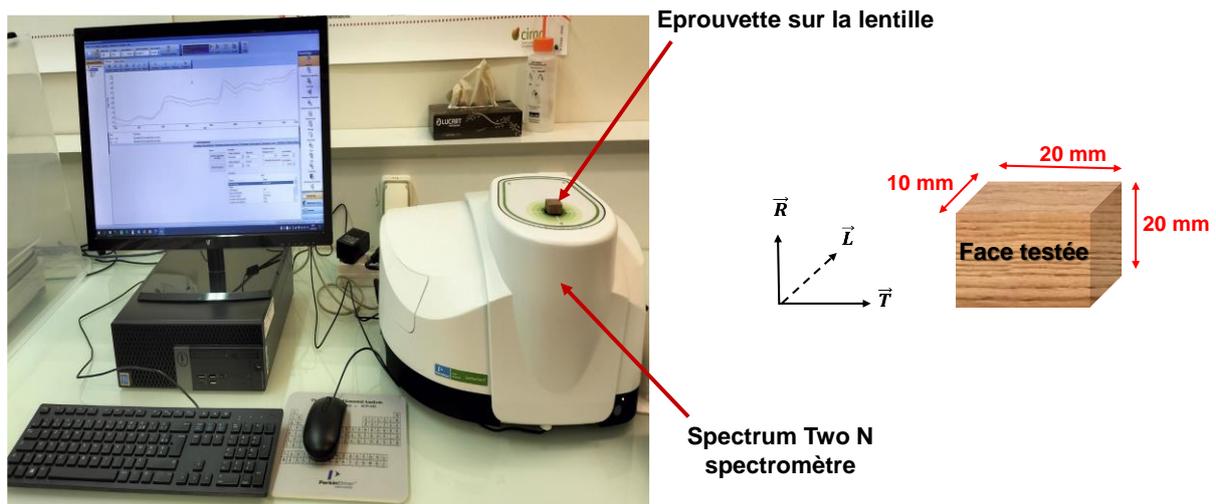


Figure 2.18 : Obtention des spectres de bois par spectroscopie proche infrarouge.

2.5.2 Traitements des spectres

L'analyse des échantillons étant faite en réflectance diffuse, cela entraîne des différences dans les spectres obtenus. Ces différences sont dues à la dispersion du faisceau qui dépend de plusieurs facteurs à savoir la longueur d'onde, l'état de surface et l'indice de réfraction de l'échantillon. Cette dispersion n'étant pas uniforme sur tout le spectre, l'effet induit est unique pour chaque spectre. Les traitements réalisés pour résoudre ces problèmes sont alors fait individuellement. Parmi les traitements apportés, une correction SNV (Standard Normal Variate) a été faite. Celle-ci permet de supprimer l'effet des éventuelles irrégularités sur les surfaces des échantillons et ainsi de réduire la variabilité intra spectre. La dispersion est corrigée en normalisant chaque spectre par l'écart-type des réponses sur tout le spectre (Équations 11 et 12). Un autre type de traitement est le calcul des dérivées secondes des spectres SNV en utilisant l'algorithme de Savitzky & Golay (1964) avec une plage de lissage de 11 points de données et un polynôme du troisième degré afin de résoudre les problèmes de chevauchement des pics et les grandes variations de ligne de base. La dérivée première corrige dans une moindre mesure ces deux effets, les dérivées d'ordre supérieur corrigent ces effets et résolvent de façon plus prononcée l'effet de chevauchement des pics, mais sont cependant plus sensibles au bruit de mesure.

$$A_{i(SNV)} = \frac{(A_i - \bar{a}_i)}{\sqrt{\sum_{j=1}^p \frac{(A_{i,j} - \bar{a}_i)^2}{(p-1)}}} \quad (11)$$

$$\bar{a}_i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p A_{i,j} \quad (12)$$

Où :

A représente la matrice (n,p) des données spectrales, n le nombre d'échantillons, p le nombre de longueurs d'onde, A_i le vecteur (1,p) des réponses pour un échantillon, a_i la moyenne des réponses pour ce vecteur, i variant de 1 à n et j de 1 à p.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

2.6 Méthodes statistiques utilisées

2.6.1 Logiciel utilisé

Le logiciel utilisé pour l'analyse des données est le logiciel R-4.3.3 (2024). R est un langage de programmation et un logiciel libre destiné aux statistiques et à la science des données soutenu par la R Foundation for Statistical Computing. C'est un langage largement utilisé par les statisticiens pour le développement de méthodes et l'analyse des données.

2.6.2 Tests non paramétriques

Compte tenu de la non normalité et de la non homogénéité des variances de nos données, des tests statistiques non paramétriques ont été préférés aux tests paramétriques. Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé dans notre cas pour tester les différences entre les groupes de tempéraments écologiques. Un test de Kruskal-Wallis permet de déterminer s'il existe ou non une différence statistiquement significative entre les moyennes de trois groupes indépendants ou plus. Avant de pouvoir effectuer le test de Kruskal-Wallis, nous nous sommes assurés que les hypothèses suivantes étaient respectées, à savoir que la variable de réponse était catégorielle, que les observations de chaque groupe étaient indépendantes et que les distributions de chaque groupe avaient des formes similaires. Le risque statistique est fixé à 0,05.

S'agissant des liens entre les propriétés, des corrélations ont été calculées suivant la méthode de Spearman (non paramétrique) et les significations (p -values) des différentes corrélations ont été déterminées grâce au test statistique de Spearman.

Par ailleurs, une alternative non paramétrique à une analyse de covariance sur les rangs a été réalisée avec les propriétés ou variables significatives du test de Kruskal-Wallis. Ce test statistique consiste à comparer les intervalles de confiance des coefficients directeurs et des constantes des droites de régressions linéaires des trois groupes. Si au moins un de ces deux paramètres pour un groupe est différent des paramètres des autres groupes (p -value $< 0,05$), on conclut que la droite de régression linéaire et de facto le groupe écologique considéré est différent des autres groupes et par conséquent que le tempérament écologique influence la relation linéaire entre les propriétés considérées. Le but en effet est de vérifier si les corrélations obtenues (corrélogrammes) peuvent être perturbées par le tempérament écologique des espèces.

2.6.3 Tests post-hoc

Un test post hoc ou test à postériori est un test utilisé après une ANOVA ou un test non paramétrique tel que le test de Kruskal-Wallis. Le test de Kruskal-Wallis significatif indique qu'il existe au moins un groupe qui diffère significativement des autres, mais ne spécifie pas lequel. Les tests post-hoc sont conçus pour comparer les groupes entre eux et indiquer quels groupes diffèrent des autres.

Différents tests post-hoc existent. Chacun d'eux a ses propres hypothèses et conditions d'application. Pour choisir le test post hoc approprié, il faut prendre en compte les objectifs spécifiques de l'étude et la structure des données. Si l'étude vise à comparer plusieurs groupes de traitement à un groupe contrôle, il faut choisir le test de Dunn.

Le test post-hoc de Dunn est un test non paramétrique de comparaisons multiples par paires pour des données quantitatives qui permet d'identifier et de classer différents types en différents groupes en fonction d'une variable (ici le tempérament écologique). Il est généralement utilisé après un test de Kruskal-Wallis. Il a été utilisé pour nos analyses et ajusté suivant la méthode de Holm.

2.6.4 Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une procédure statistique qui utilise une transformation orthogonale pour convertir un ensemble d'observations de variables corrélées en variables non corrélées appelées composantes principales. Elle permet de résumer l'information en réduisant le nombre de variables tout en préservant un maximum d'informations. Elle a été utilisée dans le cadre de l'analyse des spectres SPIR compte tenu du nombre très important de longueurs d'onde dans la plage de 1000 à 2500 nm (> 400 variables). Parmi ces longueurs d'ondes, on souhaitait savoir lesquelles étaient les plus discriminantes afin de mettre en évidence des éventuelles différences de composition chimique entre les tempéraments étudiés.

2.6.5 Modèle de discrimination PLS-DA

L'analyse discriminante par moindres carrés partiels (PLS-DA) fait référence à une régression PLS qui est une technique qui vise à prédire les valeurs prises par une variable à expliquer Y à partir d'une série de variables explicatives X corrélées entre elles, lorsque le nombre de variables explicatives est élevé. Dans le cas de la PLS-DA, la variable Y est catégorielle. La régression PLS consiste à réaliser une ACP de l'ensemble des variables X, sous la contrainte

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

que les composantes calculées soient aussi “explicatives” que possible de la variable Y (Tenenhaus et al., 1995). Une composante PLS est obtenu en maximisant la covariance entre Y et les combinaisons linéaires des variables X. La contribution de cette composante est ensuite retranchée de X et Y, et une nouvelle composante est calculée en utilisant les matrices résiduelles. Cette analyse a été utilisée sur les spectres SPIR et a permis de développer des modèles de classification des espèces en fonction du tempérament écologique.

Chapitre 3

Chapitre 3 : Résultats et analyses

3 Résultats et analyses

Cette troisième et dernière partie a pour objectif de présenter et discuter les résultats obtenus pour chaque type d'essai et de les mettre en relation avec le tempérament écologique des espèces étudiées. Les différences observées par tempérament écologique sont expliquées par la composition chimique et les traits anatomiques des espèces.

3.1 Analyse de la base de données physico-mécanique du CIRAD en relation avec le tempérament écologique

Les résultats analysés dans cette partie représentent des moyennes d'éprouvettes par arbre. En d'autres termes, pour un arbre, le résultat associé représente la moyenne de dix éprouvettes.

Statistiques descriptives

Le [Tableau 3.1](#) présente les statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques étudiées en fonction du tempérament écologique. De façon générale, on observe que quel que soit le tempérament écologique, les coefficients de variations restent largement supérieurs à 15%. Ce qui est synonyme d'une dispersion importante des données dans chaque tempérament. Les plus grandes variations sont enregistrées pour la dureté D et l'énergie W . Le PSF et le module spécifique E_L/ρ ont les plus faibles dispersions ($cv \leq 15\%$). On remarque aussi que le retrait tangentiel est égal à au moins 1,5 fois le retrait radial tel qu'indiqué dans la littérature (Tropix, 7) et cela quel que soit le tempérament écologique. L'anisotropie des retraits est en moyenne élevée pour les trois groupes.

Tableau 3.1 : Statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques de la base de données du CIRAD en fonction du tempérament écologique. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation. R_T/R_R : anisotropie du retrait ; E_L/ρ : module spécifique ; PSF : point de saturation des fibres ; R_R : retrait radial ; R_V : retrait volumétrique ; R_T : retrait tangentiel ; w : énergie absorbée en flexion dynamique ; E_L : module d'élasticité ; σ' : contrainte de rupture en compression parallèle ; σ_f : contrainte de rupture en flexion statique ; ρ : densité ; D : dureté ; τ : résistance au cisaillement longitudinal ; Fend : résistance au fendage ; σ_t : résistance à la traction perpendiculaire.

Propriétés	Tempérament écologique								
	Pionnier			Hémi-héliophile			Tolérant à l'ombre		
	m	sd	cv (%)	M	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
ρ (kg/m^3)	706.00	220.38	31.22	671.35	124.54	18.55	722.79	155.08	21.46
R_V (%)	12.58	2.88	22.93	11.95	2.40	20.09	12.34	2.42	19.59
R_T (%)	7.84	1.54	19.67	7.57	1.52	20.02	7.99	1.54	19.30
R_R (%)	4.74	1.58	33.37	4.38	1.11	25.41	4.34	1.00	23.12

Chapitre 3 : Résultats et analyses

σ' (MPa)	58.70	21.32	36.33	55.94	14.08	25.17	60.13	18.09	30.09
D	5.88	4.66	79.24	4.61	2.49	53.92	4.99	2.95	59.07
PSF (%)	26.83	4.62	17.22	27.83	5.72	20.57	25.65	4.09	15.94
E_L (MPa)	13761	4760.98	34.60	13302	3362.79	25.28	13796	3974.39	28.81
E_L/ρ (MPa/kg/m ³)	19.49	3.01	15.45	19.71	2.77	14.06	18.93	2.69	14.20
R_T/R_R	1.76	0.44	24.85	1.78	0.35	19.69	1.87	0.28	14.71
σ_f (MPa)	118.70	43.04	36.26	112.79	28.76	25.50	124.61	36.47	29.27
τ (MPa)	8.33	3.51	42.13	7.99	2.70	33.76	9.81	3.03	30.87
W (J)	28.30	14.36	50.74	26.35	11.61	44.08	31.63	16.93	53.53
F_{end} (N/mm)	18.27	7.59	41.51	18.60	6.35	34.13	21.30	5.62	26.40
σ_t (MPa)	2.62	0.93	35.57	2.68	0.73	27.37	2.97	0.69	23.35

L'objectif de la présentation des statistiques descriptives par espèces dans le [Tableau A.1](#) (Annexe A) est de permettre d'identifier les espèces secondaires (moins connues) qui pourraient être des substituts des espèces plus connues qui subissent une forte pression d'exploitation au regard de leurs performances physico-mécaniques. Les espèces ont été regroupées en trois classes "d'exploitation" P1, P2 et S suivant l'arrêté ministériel de 2004 (Annexe F). La classe P1 correspond exclusivement à l'okoumé (*Aucoumea klaineana*) et l'ozigo (*Dacryodes buettneri*). La classe P2 désigne les bois autres que l'okoumé et l'ozigo faciles à commercialiser et enfin la classe S concerne les autres bois peu connus à promouvoir (essences secondaires). Les espèces du groupe S sont qualifiées de « secondaires » en raison de l'absence de connaissance scientifique sur la qualité de leur bois et non pas parce qu'elles présenteraient des troncs avec des caractéristiques morphologiques inexploitable.

On remarque ici que les résultats par espèce ([Tableau A.1](#)) présentent des coefficients de variation moins élevés que les résultats moyennés ([Tableau 3.1](#)). Pour les espèces *Anthocleista nobilis* et *Gossweilerodendron balsamiferum* nous n'avons pas pu déterminer dans la bibliographie (Annexe F) à quelle classe (S ou P2) elles appartenaient. On remarque aussi que la moitié des espèces sont des espèces secondaires c'est-à-dire des espèces moins connues à promouvoir. Il y a plus d'espèces secondaires chez les pionniers que chez les hémi-héliophiles et les tolérants à l'ombre chez lesquels il y a autant d'espèces secondaires (S) que d'espèces divers faciles à commercialiser (P2). En comparant par exemple les propriétés de *Croton oligandrus*, *Cylicodiscus gabunensis* et *Klainedoxa gabonensis* trois espèces secondaires appartenant au groupe des pionniers aux propriétés d'*Aucoumea klaineana* une espèce pionnière fortement exploitée au Gabon, on se rend compte que les trois espèces secondaires présentent de meilleures performances mécaniques, des densités plus élevées, des points de

Chapitre 3 : Résultats et analyses

saturation des fibres inférieurs à 30% et pour *Cylicodiscus gabunensis* et *Klainedoxa gabonensis* une bonne stabilité dimensionnelle. *Croton oligandrus* par contre s'avère sensible aux déformations hydriques. Étant donné le nombre de données manquantes (NA) dans le groupe des héli-héliophiles, nous avons comparé uniquement deux espèces à savoir *Dacryodes buettneri* espèce très commercialisée au Gabon (P1) et *Scyphocephalium manni* espèce secondaire. Il apparaît dans l'ensemble que les propriétés de l'espèce secondaire sont assez proches de celles de *Dacryodes buettneri* (par exemple, leurs densités et modules d'élasticité sont très proches). Les grandes différences se situent au niveau de la résistance à la flexion statique et à leur stabilité dimensionnelle. *Dacryodes buettneri* résiste mieux à la flexion statique et est stable. Enfin, pour les tolérants à l'ombre, nous avons choisi de comparer l'espèce *Gilbertiodendron dewevrei* qui est une espèce facile à commercialiser au Gabon (P2) aux espèces secondaires *Desbordesia glaucescens* et *Dialium pachyphyllum*. On peut aisément remarquer que les deux espèces secondaires présentent de meilleures propriétés dans l'ensemble par rapport à l'espèce facile à commercialiser. *Desbordesia glaucescens* est également plus stable que les deux autres. Pour *Dialium pachyphyllum* on note un point de saturation des fibres plus petit (23%) mais une moins bonne résistance au cisaillement.

Corrélations entre les propriétés

Les corrélations entre les propriétés ainsi que leur significativité sont représentées par les corrélogrammes présentés en Figure 3.1.

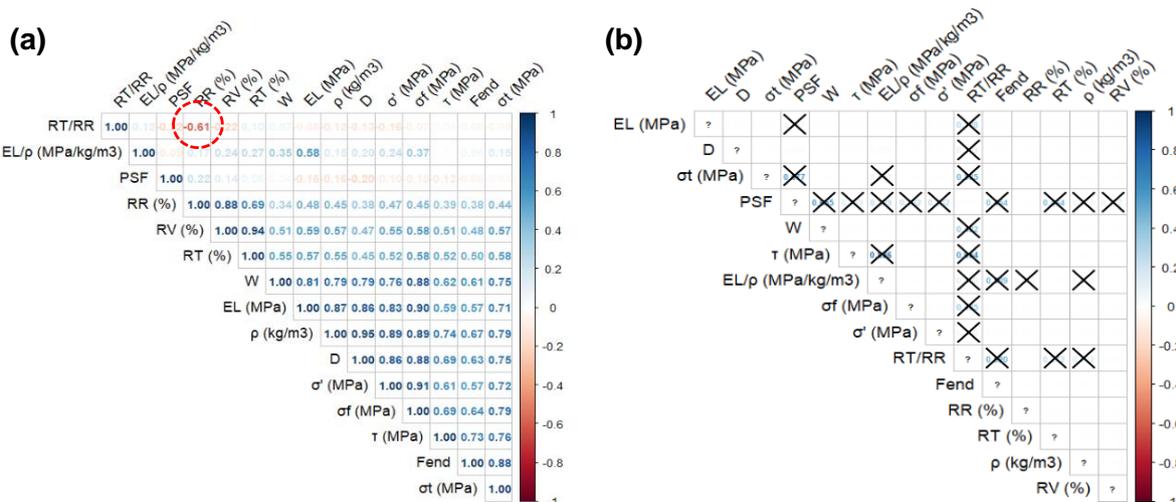


Figure 3.1 : Corrélogrammes des propriétés physico-mécaniques de la base de données du CIRAD. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq +0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p -values non significatives sont marquées par une croix. R_T/R_R : anisotropie du

Chapitre 3 : Résultats et analyses

retrait ; E_L/ρ : module spécifique ; PSF : point de saturation des fibres ; R_R : retrait radial ; R_V : retrait volumétrique ; R_T : retrait tangentiel ; W : énergie absorbée en flexion dynamique ; E_L : module d'élasticité ; σ' : contrainte de rupture en compression parallèle ; σ_f : contrainte de rupture en flexion statique ; ρ : densité ; D : dureté ; τ : résistance au cisaillement longitudinal ; $Fend$: résistance au fendage ; σ_t : résistance à la traction perpendiculaire.

De façon globale, on observe que les propriétés étudiées sont majoritairement corrélées ($\rho > 0,5$) positivement entre elles, en particulier toutes les propriétés mécaniques (Figure 3.1(a)). Ces dernières sont également corrélées positivement à la densité, ce qui est conforme à la littérature (Fernandes et al., 2017; Takahashi et al., 2023). Toutes ces corrélations sont significatives (Figure 3.1(b)). Il n'y a quasiment pas de forte corrélation négative exceptée celle observée entre l'anisotropie des retraits R_T/R_R et le retrait radial R_R (entourée en rouge sur la Figure 3.1) égale à $\rho = -0.61$. Les retraits radial et tangentiel sont positivement et significativement corrélés entre eux et à la densité du bois. L'anisotropie des retraits est faiblement corrélée au retrait tangentiel et est corrélée négativement mais pas significativement à la densité du bois. Tous ces résultats relatifs aux retraits et à leur anisotropie confirment les observations de Masserann & Mariaux (1985) et de Messaoudène et al., (2008). Il n'y a aucune corrélation forte entre le PSF et les autres propriétés. Toutefois, les corrélations entre le PSF et l'anisotropie R_T/R_R d'une part et le PSF et le retrait radial R_R d'autre part sont significatives (Figure 3.1(b)).

Tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn

Tableau 3.2 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les propriétés de la base de données du CIRAD, montrant l'importance des différences dans les profils écologiques des arbres étudiés. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

Propriétés	Test de Kruskal-Wallis <i>p</i> -values	Test de Dunn		
		P-HH	HH-TO	TO-P
ρ	0.3077	ns	ns	ns
R_V	0.5837	ns	ns	ns
R_T	0.5217	ns	ns	ns
R_R	0.5264	ns	ns	ns
σ'	0.5744	ns	ns	ns
D	0.8422	ns	ns	ns
PSF	0.2163	ns	ns	ns
E_L	0.9100	ns	ns	ns
E_L/ρ	0.4517	ns	ns	ns
σ_f	0.3202	ns	ns	ns
W	0.3810	ns	ns	ns
R_T/R_R	0.1366	ns	ns	ns
τ	0.0047 "***"	ns	**	*
$Fend$	0.0324 "****"	ns	.	.
σ_t	0.0694 ".*"	ns	ns	.

Chapitre 3 : Résultats et analyses

Le [Tableau 3.2](#) a été obtenu grâce au test non paramétrique de Kruskal-Wallis et au test de comparaisons multiples de Dunn ajusté avec la méthode de Holm. On observe que l'effet tempérament est significatif pour 2 propriétés sur les 15 sélectionnées. Autrement dit, 2 propriétés permettent de mettre en évidence les différences entre les tempéraments écologiques. Ces propriétés sont le cisaillement et le fendage (par ordre de significativité). Nous constatons par ailleurs que ces propriétés sont exclusivement des propriétés mécaniques. Contrairement à plusieurs auteurs dans littérature (Adler et al., 2014; de Lima Vieira et al., 2021; Hoeber et al., 2014; Janse-Ten Klooster et al., 2007; Morel et al., 2018; Poorter et al., 2010, 2012; Rüger et al., 2012; Van Gelder et al., 2006), la densité du bois ne fait pas partie des propriétés influencées par le tempérament écologique. Les boxplots qui suivent présentent les différences significatives observées ([Figure 3.2](#)).

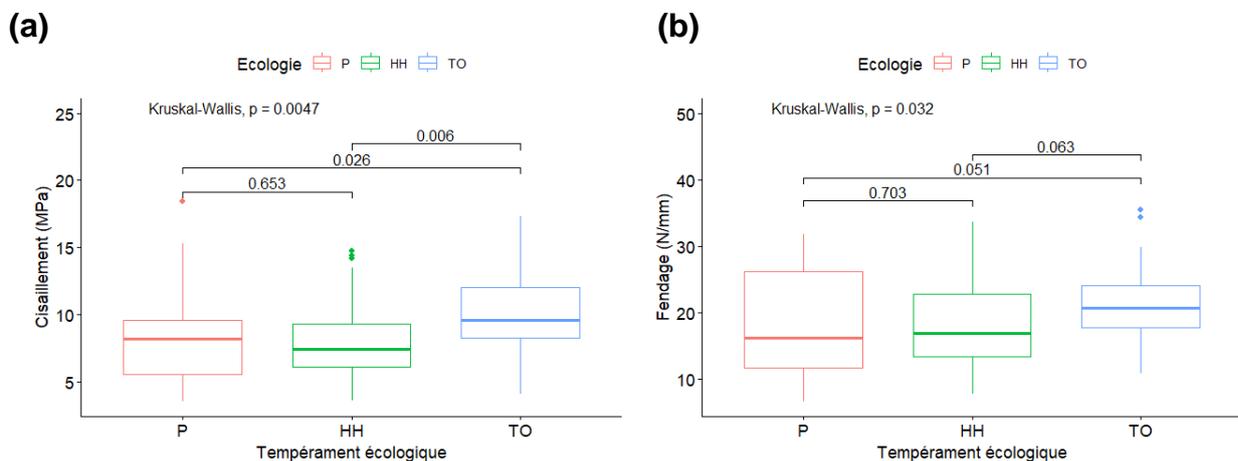


Figure 3.2 : Distribution des propriétés de la base de données du CIRAD statistiquement significatives en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre.

Les figures (a) et (b) de la [Figure 3.2](#) présentent respectivement la résistance au cisaillement et la résistance au fendage pour chaque tempérament écologique. Le cisaillement est une propriété importante lorsque le bois est mis en structure. Il s'agit de la force qui tend à faire glisser les fibres les unes sur les autres (glissement) dans le plan considéré. On observe pour cette propriété ([Figure 3.2\(a\)](#)) que les espèces tolérantes à l'ombre sont plus résistantes au cisaillement que les pionnières et beaucoup plus que les espèces hémi-héliophiles avec des coefficients de variation supérieurs à 30% ([Tableau 3.1](#)). Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les groupes des pionniers et des hémi-héliophiles. D'autre part, on note que les valeurs moyennes du cisaillement pour les trois groupes restent relativement élevées de l'ordre de 7 MPa. En effet selon Sallenave (1955), la résistance au cisaillement est considérée comme

moyenne lorsqu'elle est comprise entre 7 et 10 MPa. La résistance au fendage du bois quant à elle, est déterminée par la résistance à la traction dans la direction radiale ou tangentielle (Gérard et al., 2016). Les espèces tolérantes à l'ombre semblent plus résistantes au fendage que les héliophiles et beaucoup plus que les espèces pionnières (Figure 3.2 (b)). Il n'y a cependant pas de différence significative une fois de plus entre les pionnières et les héliophiles. Les coefficients de variation pour cette propriété (Tableau 3.1) sont également très élevés quel que soit le tempérament. Les points au-dessus des boxplots (Figure 3.2) pourraient correspondre à des valeurs aberrantes, mais ce n'est pas forcément le cas. Le bois étant un matériau biologique, des valeurs extrêmes peuvent être dues à des conditions de développement particulières de l'arbre.

Analyse de covariance non paramétrique

Étant donné que la densité du bois est corrélée positivement et significativement aux propriétés mécaniques et aux différents retraits étudiés, nous avons voulu vérifier si ces corrélations pouvaient être influencées par le tempérament écologique des espèces. Pour ce faire, nous avons réalisé une alternative non paramétrique à une analyse de covariance sur les rangs entre la densité du bois et toutes les propriétés avec lesquelles il y avait des corrélations significatives (Figure 3.1). Ce test statistique consiste à comparer les intervalles de confiance des coefficients directeurs et des constantes des droites de régressions linéaires des trois groupes. Nous avons par ailleurs recherché quelle fonction pouvait le mieux prédire la relation entre la dureté et la densité du bois (Figure 3.3(c)). Les résultats obtenus (Tableau 3.3) indiquent une influence du tempérament écologique dans les relations entre le cisaillement τ , le fendage Fend, la traction perpendiculaire σ_t et la dureté D avec la densité du bois ρ (p -values $< 0,05$). Il n'y a cependant aucun effet du tempérament dans les relations entre la contrainte de rupture en flexion statique σ_f , la contrainte de rupture en compression parallèle σ' , le module d'élasticité E_L , l'énergie absorbée en flexion dynamique W et les différents retraits $R_{R, T, V}$ avec la densité du bois (p -values $> 0,05$). Il a été observé des relations linéaires fortes ($R^2 > 0,5$) entre la contrainte de rupture en flexion, la contrainte de rupture en compression, le module d'élasticité et la flexion dynamique avec la densité du bois chez les trois tempéraments (Figure 3.3(d, e, f et h)). En d'autres termes lorsque la densité augmente, ces propriétés augmentent également quel que soit le tempérament écologique. D'autre part, lorsque la densité du bois des espèces pionnières augmente, leurs résistances au cisaillement, à la traction et au fractionnement ainsi que leurs retraits radial et volumique augmentent aussi (Figure 3.3(a, b, g, j et k)). Pour les espèces

Chapitre 3 : Résultats et analyses

d'ombre, lorsque leur densité augmente leur résistance à la traction et leurs retraits tangentiels et volumiques augmentent aussi (Figure 3.3(g, i et k)). Par ailleurs, la relation entre la densité et la dureté a été mieux approchée par une fonction puissance telle que décrit dans la littérature (Mania et al., 2020; Wiemann, 2007) et ce, quel que soit le tempérament écologique.

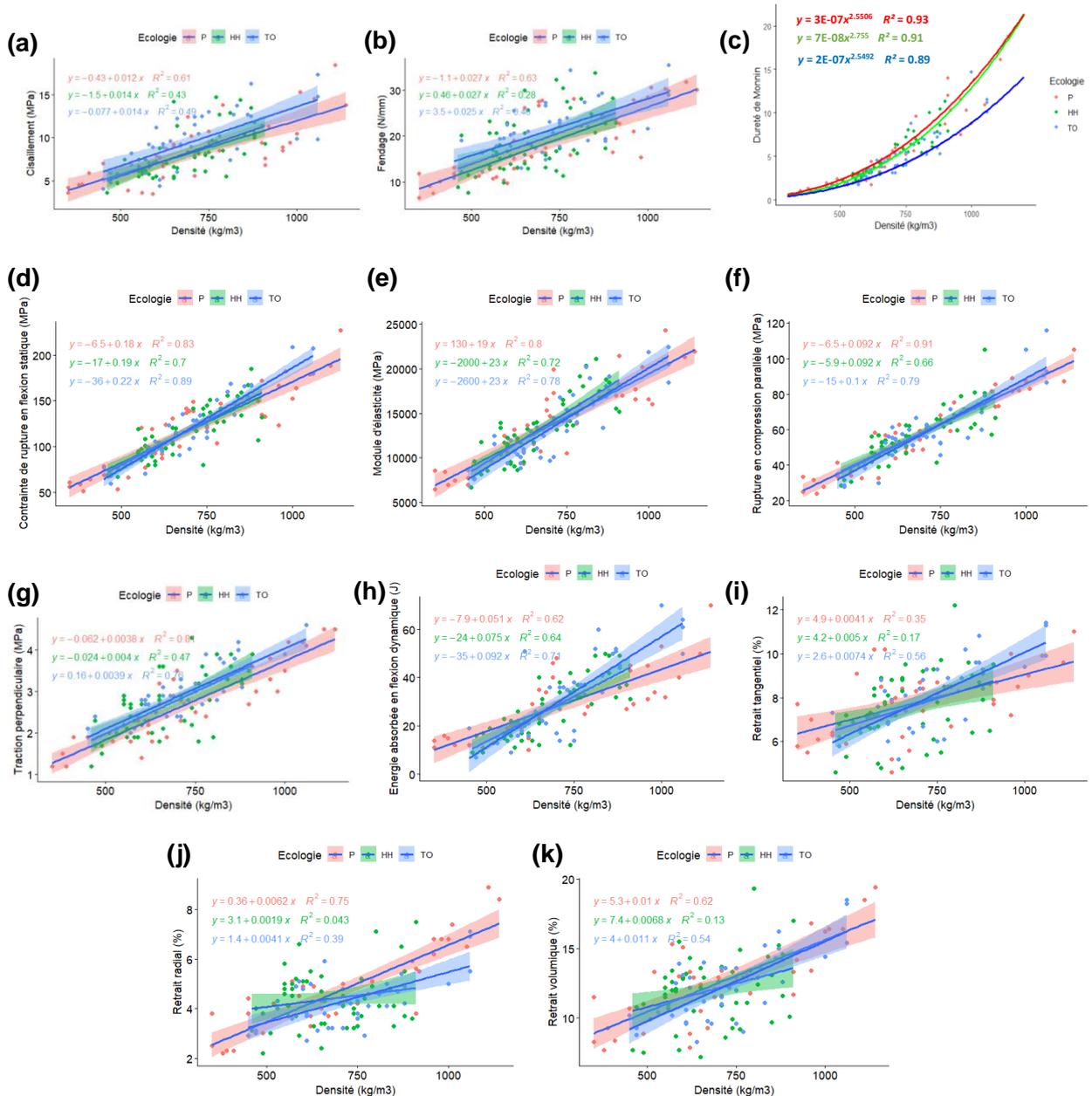


Figure 3.3 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre la densité du bois et les propriétés mécaniques de la base de données du CIRAD (a et b) ; Évolution de la dureté en fonction de la densité du bois suivant le tempérament écologique (c).

Tableau 3.3 : Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les propriétés physico-mécaniques de la base de données du CIRAD et la densité du bois. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

Lorsque la p -value du coefficient directeur ou de la constante des relations étudiées est significative ($< 0,05$), au moins l'une des droites des régressions linéaires (Figure 3.3) est différente des autres. Il y a donc un effet positif du tempérament écologique dans la relation étudiée.

Relation entre propriétés physico-mécaniques et densité du bois	ANCOVA non paramétrique	
	p -values et significativité	
	Tempérament écologique	
	Coefficient directeur	Constante
$\rho - \tau$	0.0028 "****"	0.0026 "****"
$\rho - F_{end}$	0.0295 "**"	0.0302 "**"
$\rho - D$	0.0031 "****"	0.0029 "****"
$\rho - \sigma_t$	0.0274 "**"	0.0268 "**"
$\rho - \sigma_f$	0.942 "ns"	0.942 "ns"
$\rho - \sigma'$	0.796 "ns"	0.794 "ns"
$\rho - E_L$	0.174 "ns"	0.171 "ns"
$\rho - W$	0.754 "ns"	0.757 "ns"
$\rho - R_R$	0.3064 "ns"	0.336 "ns"
$\rho - R_T$	0.904 "ns"	0.905 "ns"
$\rho - R_V$	0.6969 "ns"	0.702 "ns"

Bien qu'il existe une influence du tempérament écologique dans les relations entre le cisaillement et le fendage (propriétés significatives du test de Kruskal-Wallis) avec la densité du bois en plus des corrélations positives significatives observées, il n'est pas possible d'expliquer les différences de résistances mécaniques observées entre les groupes écologiques (Figure 3.2) en particulier la résistance au cisaillement élevée (Figure 3.2(a)) des espèces d'ombre par rapport aux pionniers et hémi-héliophiles par la densité du bois. En fait, la densité du bois n'était pas différente entre les trois tempéraments (p -value de Kruskal-Wallis $> 0,05$). En d'autres termes, il n'y a pas eu d'effet du tempérament écologique sur la densité du bois.

3.2 Liens entre caractérisation physico-mécanique et tempérament écologique

Statistiques descriptives

Le Tableau 3.4 présente les statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques obtenus dans le cadre de la campagne expérimentale de cette thèse. De façon globale, les coefficients de variations cv des propriétés sont élevés et nettement supérieurs à 10% en

Chapitre 3 : Résultats et analyses

particulier l'énergie W , ce qui traduit une dispersion des données. Par contre, le coefficient de variation du PSF est inférieur à 9%. On observe également que le retrait tangentiel R_T représente le double du retrait radial R_R quel que soit le tempérament écologique, ce qui est conforme à la littérature (Tropix, 7). L'angle des microfibrilles AMF est globalement petit indépendamment du tempérament écologique. Comme énoncé précédemment, les conditions de croissance ainsi que les paramètres environnementaux et intrinsèques des espèces étudiées peuvent être à l'origine de la variabilité dans les propriétés et peuvent avoir eu un impact plus prononcé sur certaines propriétés en particulier.

Tableau 3.4 : Statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques obtenus lors d'une nouvelle campagne d'essais en fonction du tempérament écologique. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation. R_T/R_R : anisotropie du retrait ; E_L/ρ : module spécifique ; PSF : point de saturation des fibres ; R_R : retrait radial ; R_T : retrait tangentiel ; W : énergie absorbée en flexion dynamique ; E_L : module d'élasticité ; σ' : contrainte de rupture en compression parallèle ; AMF : angle des microfibrilles ; ρ : densité et τ : résistance au cisaillement longitudinal.

Propriétés	Tempérament écologique								
	Pionnier			Hémi-héliophile			Tolérant à l'ombre		
	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
ρ (kg/m^3)	647.44	251.31	38.82	659.49	143.47	21.76	758.80	181.66	23.94
R_T (%)	8.65	1.33	15.34	8.00	2.02	25.25	7.21	1.48	20.55
R_R (%)	4.03	1.73	43.02	4.17	1.22	29.13	4.29	1.21	28.22
σ' (MPa)	52.36	20.39	38.95	51.54	13.65	26.49	58.75	19.84	33.76
PSF (%)	25.80	2.01	7.80	26.09	2.12	8.11	25.14	2.12	8.42
E_L (MPa)	15525.2 9	6078.00	39.15	14726.8 3	4993.72	33.91	17473.2 8	5951.42	34.06
E_L/ρ (MPa/k g/m^3)	24.20	3.34	13.80	21.91	3.76	17.14	22.58	3.09	13.67
R_T/R_R	2.56	1.11	43.45	2.11	0.90	42.76	1.81	0.64	35.69
τ (MPa)	17.30	7.78	44.98	17.41	4.32	24.84	18.98	6.05	31.88
W (J)	22.46	13.61	60.59	23.05	14.87	64.54	21.06	11.55	54.86
AMF (°)	11.15	2.13	19.15	12.86	3.37	26.25	12.11	2.51	20.69

L'objectif des statistiques descriptives par espèces présentées en [Tableau A.2](#) (Annexe A) est le même que celui énoncé précédemment à savoir identifier les espèces secondaires qui pourraient être des remplaçants d'espèces fortement exploitées au Gabon. Plus de la majorité des espèces étudiées sont des espèces secondaires. Les résultats des statistiques descriptives par espèce montrent une faible dispersion des données dans l'ensemble sauf pour l'énergie absorbée en flexion dynamique W pour laquelle on observe toujours une grande dispersion des

Chapitre 3 : Résultats et analyses

données chez la plupart des espèces. Comme dans l'analyse de la base de données, nous comparons les propriétés de quelques espèces secondaires aux propriétés d'espèces exploitées régulièrement au Gabon. Pour le groupe des pionniers, on ne compte malheureusement pas d'espèces soit P1 ou P2. Pour la comparaison, nous avons choisi de comparer comme dans la base de données du CIRAD les propriétés (Tableau A.2) de *Klainedoxa gabonensis* espèce secondaire pionnière aux propriétés d'*Aucoumea klaineana* dans la littérature (Tropix, 7). Pour les propriétés absentes de la bibliographie telles que la résistance au cisaillement et l'énergie absorbée en flexion dynamique, nous comparons avec les résultats de la base de données du CIRAD (Tableau A.1). Aucune comparaison n'a été faite avec l'angle des microfibrilles car il existe très peu de données dans la bibliographie. De plus, dans la base de données du CIRAD, cette propriété n'a pas été déterminée. Une fois de plus, *Klainedoxa gabonensis* présente des propriétés physico-mécaniques plus élevées et est plus stable dimensionnellement. Pour les hémi-héliophiles, nous avons également comparé *Dacryodes buettneri* (P1) à *Scyphocephalum mannii* et *Sacoglottis gabonensis* (espèces secondaires). *Scyphocephalum mannii* présente de moins bonnes propriétés que *Dacryodes buettneri* tandis que *Sacoglottis gabonensis* montre de très bonnes performances physico-mécaniques mais une forte instabilité dimensionnelle. Pour le groupe des tolérants à l'ombre, nous avons comparé les espèces P2 à toutes les espèces secondaires. De façon global on remarque que les espèces secondaires ont de très bonnes propriétés physico-mécaniques et sont majoritairement stables. Toutefois, à l'exception de la densité et du module d'élasticité, *Beilschmiedia spp.* a de moins bonnes propriétés que *Dacryodes igaganga*.

Chapitre 3 : Résultats et analyses

Corrélations entre les propriétés

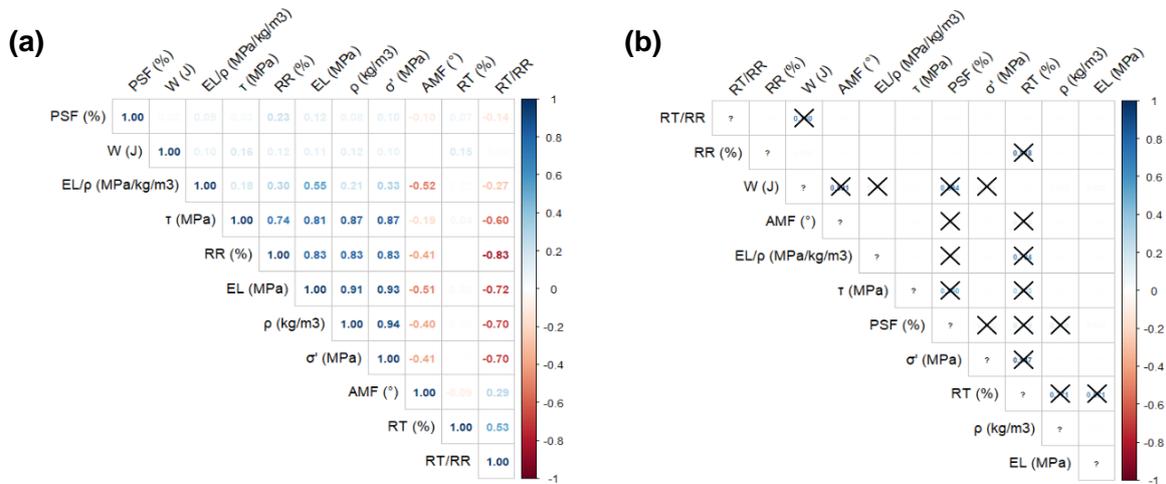


Figure 3.4 : Corrélogrammes des propriétés physico-mécaniques des nouveaux essais. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq +0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix. R_T/R_R : anisotropie du retrait ; E_L/ρ : module spécifique ; PSF : point de saturation des fibres ; R_R : retrait radial ; R_T : retrait tangentiel ; W : énergie absorbée en flexion dynamique ; E_L : module d'élasticité ; σ' : contrainte de rupture en compression parallèle ; ρ : densité ; τ : résistance au cisaillement longitudinal et AMF : angle des microfibrilles.

La Figure 3.4(a) présente les corrélations observées entre les propriétés étudiées. La densité du bois est positivement corrélée à toutes les propriétés mécaniques comme l'indique la littérature (Fernandes et al., 2017; Takahashi et al., 2023), mais très faiblement à l'énergie absorbée en flexion dynamique W. Ces corrélations sont toutes significatives (Figure 3.4(b)). Les propriétés mécaniques sont positivement corrélées entre elles mais les corrélations avec W sont une fois de plus très faibles (Figure 3.4(a)). Les corrélations négatives significatives (Figure 3.4(a et b)) sont enregistrées entre l'anisotropie des retraits R_T/R_R et le cisaillement, le retrait radial, le module d'élasticité, le module spécifique, le PSF, la densité et la compression axiale d'une part et l'angle des microfibrilles AMF et le module spécifique, le module d'élasticité, le cisaillement, le retrait radial, la compression axiale et la densité d'autre part. Autrement dit, lorsque l'AMF et/ou l'anisotropie des retraits diminue, les propriétés corrélées négativement et significativement avec eux augmentent. R_T/R_R est corrélée positivement à R_T et cette corrélation est significative. La densité du bois est fortement et significativement corrélée au retrait radial mais la corrélation avec le retrait tangentiel est très faible et non significative. Les retraits radial et tangentiel ne sont pas significativement corrélés entre eux. Le PSF et l'énergie W sont très faiblement corrélés aux autres propriétés. Cependant, les corrélations entre l'énergie

W avec les retraits radial et tangentiel, le cisaillement et le module d'élasticité sont significatives. De plus, les corrélations entre le PSF avec le module d'élasticité, l'anisotropie et le retrait radial sont significatives.

Tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn

Tableau 3.5 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les propriétés physico-mécaniques des nouveaux essais, montrant l'importance des différences dans les profils écologiques des arbres étudiés. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1. 'P' pionnier ; 'HH' hémi-héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

<i>Propriétés</i>	<i>Test de Kruskal-Wallis</i>	<i>Test de Dunn</i>		
	<i>p-values</i>	P-HH	HH-TO	TO-P
τ	2.45E-01	ns	ns	ns
W	9.92E-01	ns	ns	ns
R_R	8.14E-02 ". "	ns	ns	ns
ρ	2.44E-05 "****"	ns	***	***
E_L	4.13E-03 "***"	ns	**	*
σ'	2.98E-02 "**"	ns	.	.
AMF	1.31E-04 "****"	***	ns	**
E_L/ρ	3.76E-06 "****"	***	ns	**
R_T	1.35E-07 "****"	**	**	***
R_T/R_R	1.23E-05 "****"	**	*	***
PSF	4.09E-03 "***"	ns	**	*

Le [Tableau 3.5](#) présente les résultats des tests de Kruskal-Wallis et de Dunn. Le test de Kruskal-Wallis a permis de mettre en évidence 8 propriétés significatives sur les 11 étudiées. En d'autres termes, il y a une influence du tempérament écologique sur le retrait tangentiel R_T , le module spécifique E_L/ρ , l'anisotropie R_T/R_R , la densité ρ , l'angle des microfibrilles AMF , le point de saturation des fibres PSF , le module d'élasticité E_L et la compression axiale σ' (Par ordre de significativité). Les résultats du test de Dunn indiquent que les différences les plus significatives sont enregistrées d'abord entre les pionniers et les tolérants à l'ombre (TO-P), puis entre les pionniers et les hémi-héliophiles (P-HH) et enfin entre les hémi-héliophiles et les tolérants à l'ombre (HH-TO). En accord avec la littérature, la densité du bois a été l'une des propriétés les plus influencées par le tempérament écologique (Adler et al., 2014; de Lima Vieira et al., 2021; Hoerber et al., 2014; Janse-Ten Klooster et al., 2007; Morel et al., 2018; Poorter et al., 2010, 2012; Rüger et al., 2012; Van Gelder et al., 2006). Les boxplots qui suivent présentent les différences observées en détails ([Figure 3.5](#)).

Chapitre 3 : Résultats et analyses

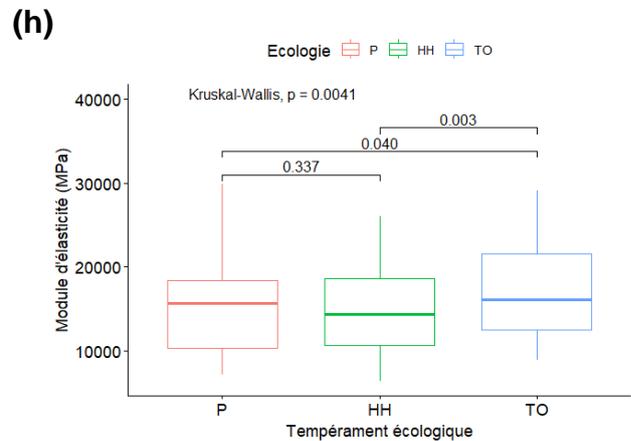
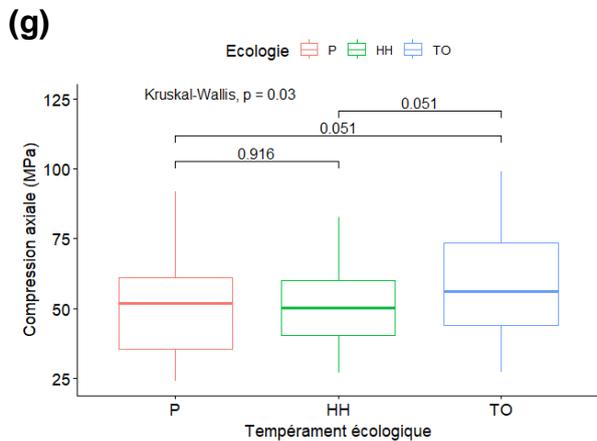
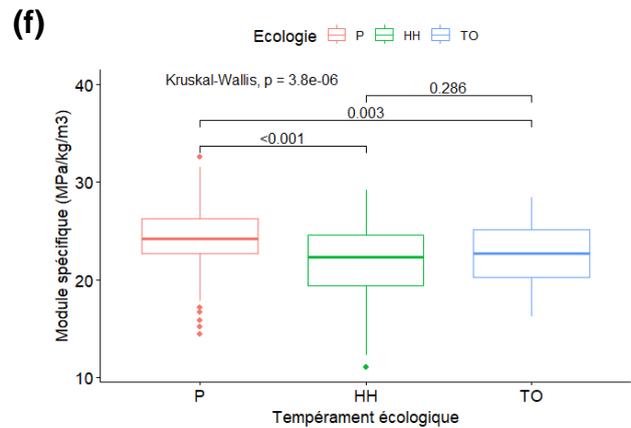
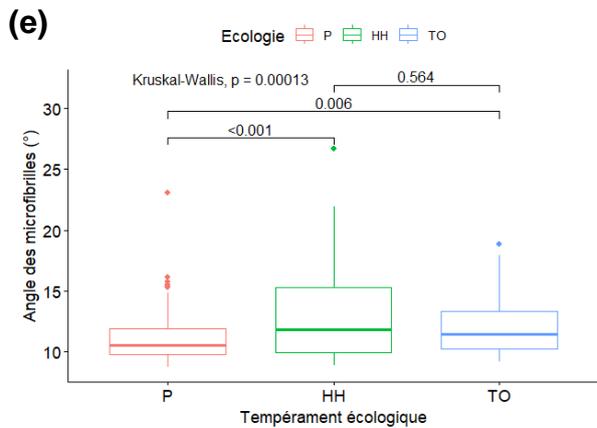
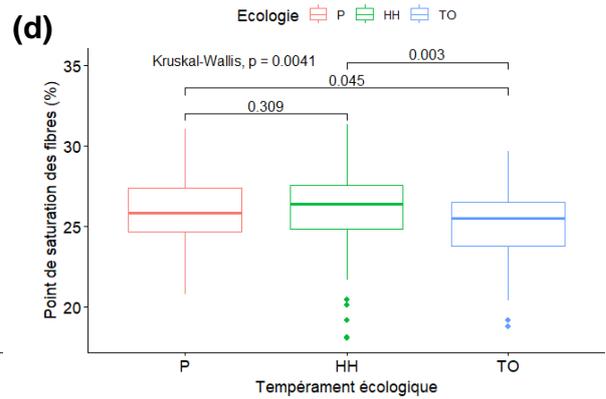
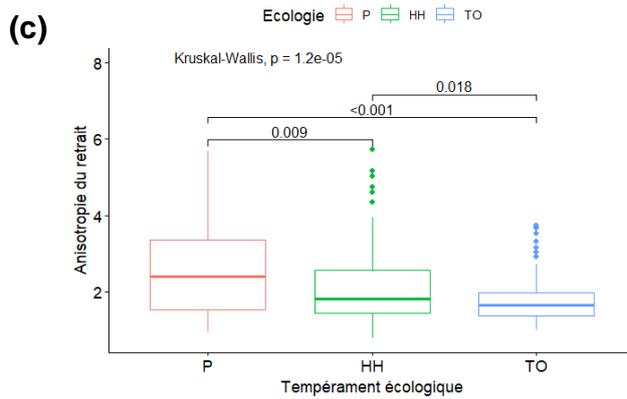
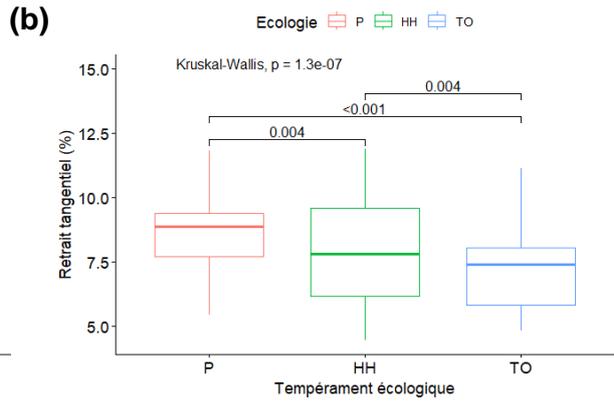
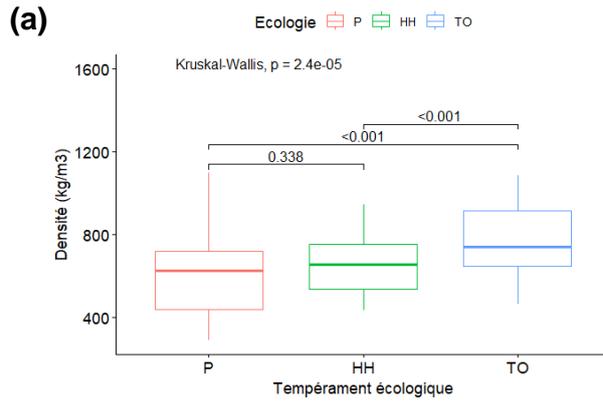


Figure 3.5 : Distribution des propriétés physico-mécaniques statistiquement significatives des nouveaux essais en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre.

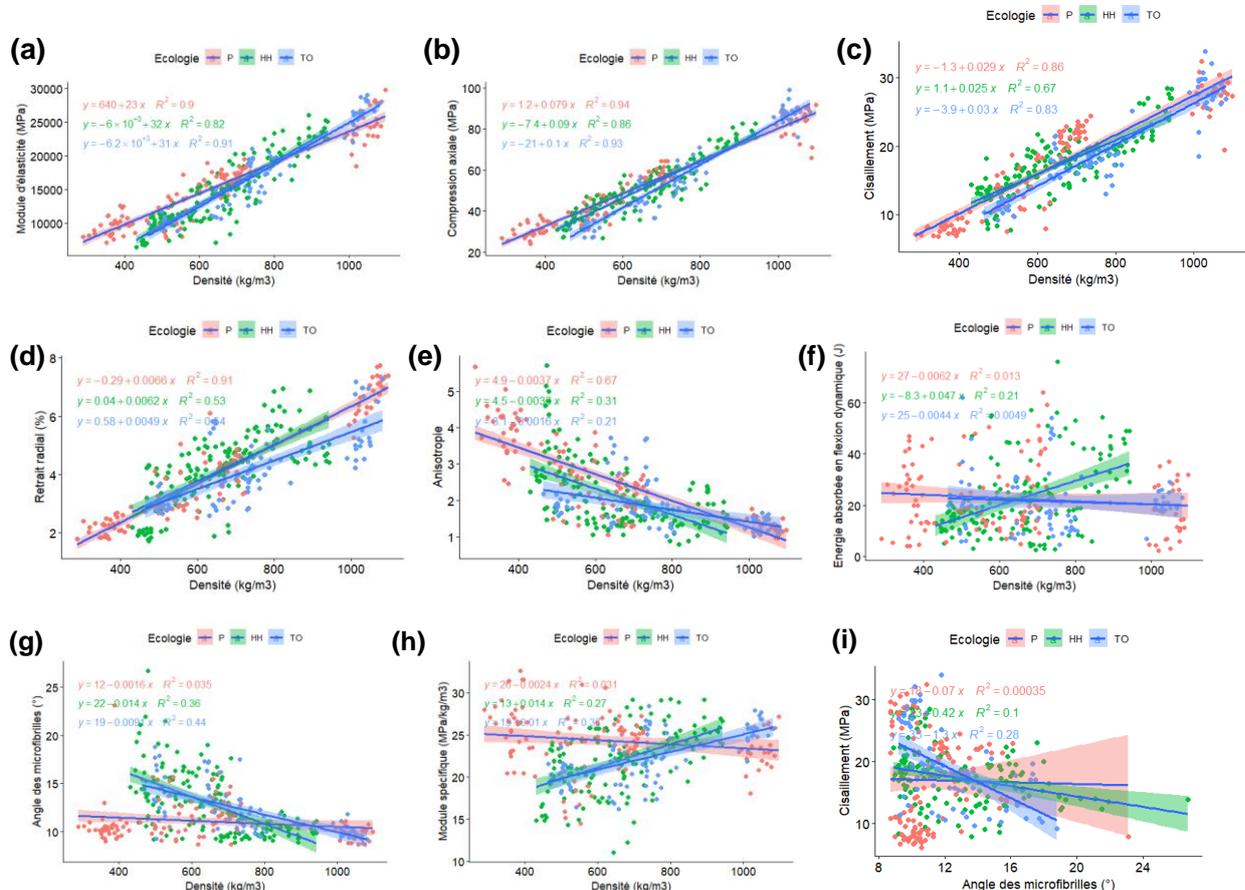
Les espèces tolérantes à l'ombre apparaissent plus denses que les hémi-héliophiles et les pionnières (Figure 3.5(a)), ce qui est conforme à la littérature (Adler et al., 2014; Lawton, 1984; Muller-Landau, 2004; Osunkoya et al., 2007; Román-Dañobeytia et al., 2021; Thomas, 1996). Le retrait tangentiel des espèces pionnières est beaucoup plus important que celui des hémi-héliophiles et beaucoup plus que celui des tolérantes à l'ombre (Figure 3.5(b)). De plus, les hémi-héliophiles ont un retrait tangentiel plus élevé que les espèces d'ombre. Selon l'atlas des bois tropicaux (Gérard et al., 2016), l'anisotropie des retraits R_T/R_R (Figure 3.5(c)) quantifie la déformation d'une pièce de bois lors des variations de teneur en humidité du bois. C'est un paramètre clé de stabilité dimensionnelle du matériau bois (Ab Latib et al., 2020; Geimer et al., 1997; Pliura et al., 2005). Plus ce rapport est proche de 1, plus le bois est stable. Si, au contraire, il tend vers une valeur supérieure ou égale à 2, cela signifie qu'une essence est sensible aux déformations hydriques (instable). Pour les pionniers et les hémi-héliophiles, la moyenne de l'anisotropie est supérieure à 2 (Tableau 3.4) ce qui traduit une anisotropie très élevée et donc une instabilité dimensionnelle (Gérard et al., 1998). Tandis que chez les espèces d'ombre elle est inférieure à 2 sans être proche de 1, ce qui traduit également une instabilité cependant moins prononcée. L'anisotropie des espèces pionnières semble plus prononcée que celle des hémi-héliophiles et beaucoup plus que celle des tolérantes à l'ombre (Figure 3.5(c)). Les hémi-héliophiles ont une anisotropie plus élevée que les espèces d'ombre. Le PSF des tolérantes à l'ombre est moins élevé que celui des pionnières et de loin moins élevée que celui des hémi-héliophiles (Figure 3.5(d)). En d'autres termes, pour ces espèces les variations dimensionnelles apparaîtront plus tardivement. Il n'y a pas de différence statistique significative entre le PSF des pionnières et celui des hémi-héliophiles. L'AMF est un paramètre qui est lié à la paroi secondaire du bois et qui influence son soutien mécanique (Fournier et al., 2013). Par exemple, une augmentation de l'AMF diminue la rigidité du bois et sa résistance aux contraintes longitudinales (De Borst et al., 2012; Trouy, 2015). Ce paramètre varie notamment en fonction du stade de développement. Le bois juvénile présente un angle des microfibrilles plus grand et donc un bois moins rigide que celui du bois adulte (Trouy, 2015). Les valeurs moyennes faibles d'AMF (Tableau 3.4) observées dans l'ensemble traduisent une rigidité élevée et permet d'avoir une indication sur le stade de développement des espèces étudiées. Les hémi-héliophiles et les tolérantes à l'ombre présentent un AMF légèrement plus élevé que celui des pionnières (Figure 3.5(e)). Toutefois, celui-ci reste inférieur à 15° quel que soit le groupe écologique.

Chapitre 3 : Résultats et analyses

L'AMF des héli-héliophiles n'est pas statistiquement différent de celui des tolérantes à l'ombre. Le module spécifique des pionnières apparaît plus élevé que celui des tolérantes à l'ombre et beaucoup plus que celui des héli-héliophiles (Figure 3.5(f)). La contrainte de rupture en compression axiale des espèces d'ombre est légèrement plus élevée que celle des héli-héliophiles et des pionnières (Figure 3.5(g)). Enfin, le module d'élasticité des espèces d'ombre est plus élevé que celui des pionnières et beaucoup plus que celui des héli-héliophiles (Figure 3.5(h)). Autrement dit, les espèces tolérantes à l'ombre sont plus rigides que les espèces des deux autres groupes.

Analyse de covariance non paramétrique

Comme pour l'analyse de la base de données physico-mécanique du CIRAD, nous avons vérifié que les corrélations significatives entre la densité du bois et les propriétés physico-mécaniques que sont la résistance à la compression, le module d'élasticité, la résistance au cisaillement, le retrait radial, l'énergie W, l'AMF, le module spécifique et l'anisotropie étaient influencées par le tempérament écologique des espèces. Une analyse de covariance non paramétrique sur les rangs entre la densité du bois et ces propriétés a de ce fait été réalisée.



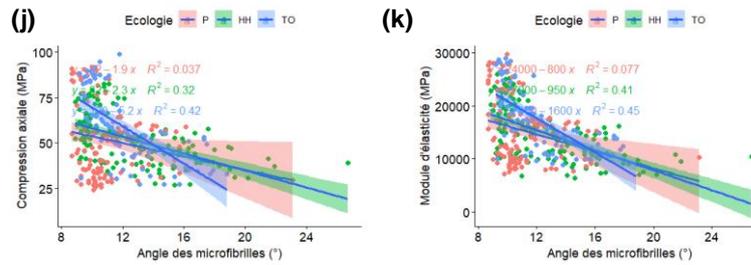


Figure 3.6 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre la densité du bois d’une part et l’AMF et d’autre part et les propriétés physico-mécaniques des nouveaux essais.

Les résultats obtenus (Tableau 3.6) indiquent un effet significatif (p -values < 0,05) du tempérament écologique dans toutes les relations avec la densité du bois. En d’autres termes, au moins une des droites de régression est différente des deux autres droites (Figure 3.6). De plus, quel que soit le tempérament écologique, il y a de très fortes relations linéaires ($R^2 > 0,5$) entre la densité du bois et les propriétés mécaniques et entre la densité du bois et le retrait radial (Figure 3.6(a, b, c et d)). Ce qui signifie que lorsque la densité du bois augmente, le module d’élasticité, la contrainte de rupture en compression axiale, le cisaillement et le retrait radial augmentent quel que soit le tempérament écologique. En outre, lorsque la densité diminue, seule l’anisotropie du retrait des espèces pionnières augmente (Figure 3.6(e)). Les modèles de régression entre la densité et l’anisotropie des héliophiles et des tolérants à l’ombre sont faibles ($R^2 < 0,5$). Il en est de même des modèles de régression entre la densité et l’énergie W , la densité et l’AMF, l’AMF et les propriétés mécaniques et la densité et le module spécifique quel que soit le tempérament écologique (Figure 3.6(f, g, h, i, j et k)). Il n’est donc pas possible d’observer l’éventuel effet du tempérament écologique sur ces régressions entre propriétés.

Tableau 3.6 : Résultats de l’analyse de covariance non paramétrique entre les propriétés physico-mécaniques de la nouvelle campagne d’essais et la densité du bois. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1.

Relation entre propriétés physico-mécaniques et densité du bois	ANCOVA non paramétrique	
	p -values et significativité	
	Tempérament écologique	
	Coefficient directeur	Constante
$\rho - E_L$	2.2E-06 “***”	2.93E-06 “***”
$\rho - \sigma'$	6.52E-07 “***”	1.41E-06 “***”
$\rho - \tau$	1.3E-06 “***”	2.47E-06 “***”
$\rho - W$	2.42E-06 “***”	0.7073 “ns”
$\rho - AMF$	3.73E-12 “***”	5.81E-10 “***”
$\rho - E_L/\rho$	4.16E-14 “***”	3.23E-9 “***”
$\rho - R_R$	6.82E-06 “***”	7.61E-06 “***”
$\rho - R_T/R_R$	0.0057 “***”	0.0061 “***”

Chapitre 3 : Résultats et analyses

Les résultats significatifs des corrélations, le test de Kruskal-Wallis et l'analyse de covariance non paramétrique permettent de déduire que la densité du bois peut être utilisée pour expliquer les différences observées entre les tempéraments écologiques étudiés (Figure 3.5). En d'autres termes, la rigidité élevée (module d'élasticité) des espèces tolérantes à l'ombre s'expliquent par leur densité du bois élevée par rapport aux espèces des deux autres tempéraments. Il est difficile de conclure pour la contrainte de rupture en compression car les significativités entre les groupes étaient à peine acceptables (p -value = 0,051). Malgré des corrélations significatives avec la densité du bois et les résultats des tests de covariances, il est difficile de conclure par rapport aux différences observées au niveau de l'AMF et du module spécifique (Figure 3.5) compte tenu des coefficients de détermination des droites de régression très faibles (Figure 3.6(g et h)) et des corrélations négatives avec la densité du bois. L'anisotropie élevée des espèces pionnières par rapport aux hémi-héliophiles et aux tolérants à l'ombre est liée à leur faible densité du bois. Enfin, il n'a pas été possible d'expliquer les différences de retrait tangentiel et de PSF par la densité du bois car les corrélations avec la densité n'étaient pas significatives.

3.3 Comparaisons entre la base de données du CIRAD et les propriétés physico-mécaniques expérimentales

Après les différentes analyses d'une part de la base de données physico-mécanique du CIRAD et d'autre part des propriétés physico-mécaniques obtenues expérimentalement pendant ce travail de thèse sur les mêmes bois, quelques différences ont pu être mises en évidence. Tout d'abord on remarque que pour les mêmes propriétés (densité, module d'élasticité, résistance au cisaillement, résistance à la compression, flexion dynamique, point de saturation des fibres, retraits radial et tangentiel et anisotropie), et un nombre plus important d'espèces dans l'analyse de la base de données, l'effet du tempérament est très différent. C'est le cas de la résistance au cisaillement qui variait suivant le tempérament écologique dans la base de données du CIRAD et qui dans les nouveaux résultats n'est plus impactée par le tempérament des espèces. Cette différence pourrait être liée aux méthodes de détermination de la résistance au cisaillement qui sont différentes ainsi qu'au type d'éprouvettes utilisé. Pour la base de données c'est la méthode classique française qui a été utilisée (NF B51-012, 2019) et pour les nouveaux essais, la méthode anglaise a été utilisée (ASTM D143-94, 1994). Par ailleurs, lorsqu'on filtre les espèces de la base de données en ne gardant que celles utilisées dans les nouveaux essais à une espèce près (*Dialium dinklagei*), les p -values du test de Kruskal-Wallis (Tableau 3.7) changent de telle sorte qu'il y a beaucoup plus de propriétés impactées par le tempérament et en accord avec les

Chapitre 3 : Résultats et analyses

résultats obtenus sur les nouveaux essais. Par exemple, l'énergie absorbée en flexion dynamique et le retrait radial sont non significatifs, le retrait tangentiel, l'anisotropie, la densité et la résistance en compression sont significatifs pour la base de données et les nouveaux essais. Par contre, pour le cisaillement, le PSF et le module d'élasticité et par conséquent le module spécifique, avec les mêmes espèces, on n'obtient pas les mêmes résultats. Cela semble être lié aux méthodes de détermination (techniques d'essais) de ces propriétés et au fait que les résultats de la base de données représentent des moyennes par arbre tandis que dans les nouveaux essais, les résultats sont donnés par éprouvette. En effet, les méthodes utilisées pour les nouveaux essais sont différentes de celles utilisées dans la base de données pour ces propriétés. Dans la base de données, le module d'élasticité a été déterminé en flexion 4 points et le PSF à partir de mesures de variations de volume entre un état saturé et un état anhydre par immersion dans du mercure. Pour le cisaillement, les différentes méthodes ont déjà été énoncées.

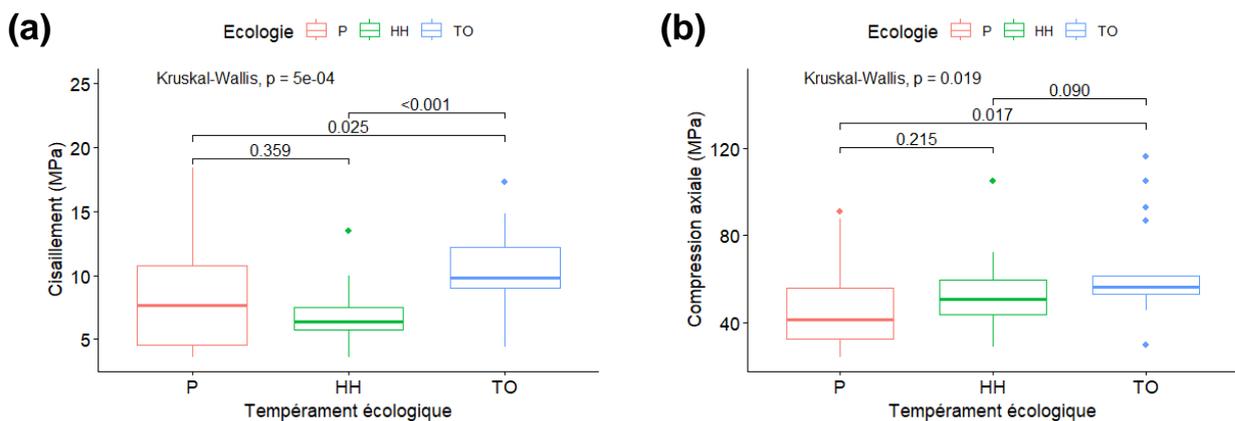
Tableau 3.7 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn de la base de données du CIRAD sur les mêmes espèces que celles testées lors des nouveaux essais. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

Propriétés	Test de Kruskal-Wallis <i>p-values</i>	Test de Dunn		
		P-HH	HH-TO	TO-P
R_V	0.05861 "ns"	ns	.	ns
R_R	0.2001 "ns"	ns	ns	ns
W	0.2255 "ns"	ns	ns	ns
D	0.1010 "ns"	ns	ns	ns
PSF	0.3114 "ns"	ns	ns	ns
E_L	0.3275 "ns"	ns	ns	ns
E_L/ρ	0.1449 "ns"	ns	ns	ns
ρ	0.0058 "****"	ns	*	*
R_T	0.01245 "**"	ns	*	ns
R_T/R_R	0.0027 "****"	**	ns	ns
σ'	0.0193 "**"	ns	.	*
σ_f	0.0469 "**"	ns	.	.
τ	0.0005 "****"	ns	***	*
$Fend$	0.0012 "****"	ns	***	*
σ_t	0.0025 "****"	ns	**	*

La Figure 3.7 ci-dessous présente les résultats des comparaisons entre les groupes (test de Dunn) uniquement pour les propriétés communes à la base de données et aux nouveaux essais, et uniquement pour les propriétés significatives du test de Kruskal-Wallis (Tableau 3.7). Il s'agit du cisaillement, de la compression, de la densité, du retrait tangentiel et de l'anisotropie.

Chapitre 3 : Résultats et analyses

Pour le cisaillement (Figure 3.7(a)), les résultats varient entre les tempéraments de la même façon qu'avec les 48 espèces. Les espèces d'ombre ont toujours en moyenne une résistance au cisaillement plus élevée par rapport aux héliophiles. Il n'y a pas de différence significative avec les pionniers. Aucune comparaison n'est possible avec les nouveaux résultats car pour ces derniers, il n'y a pas eu d'effet du tempérament écologique sur le cisaillement. Pour la compression (Figure 3.7(b)), les résultats sont plus significatifs comparés aux résultats des nouveaux essais. Une différence significative est mise en évidence entre les pionniers et les tolérants à l'ombre ce qui n'était pas le cas. Les espèces d'ombre résistent mieux à la compression que les pionniers. Pour la densité (Figure 3.7(c)), les observations sont les mêmes à savoir une plus forte densité pour les espèces d'ombre comparées aux héliophiles et pionniers. Pour le retrait tangentiel (Figure 3.7(d)), les observations sont totalement opposées. Les espèces d'ombre apparaissent plus sensibles aux déformations hydriques dans le sens tangentiel par rapport aux héliophiles, telle est la seule différence mise en évidence. Tandis que dans les nouveaux résultats, ce sont les espèces pionnières qui sont plus sensibles à ce type de déformation suivies des héliophiles et des tolérants à l'ombre. Enfin, pour l'anisotropie (Figure 3.7(e)), une seule différence significative est mise en évidence entre les pionniers et les héliophiles telle que les pionniers apparaissent avec une anisotropie prononcée. Dans les nouveaux résultats, il y avait une différence significative entre toutes les paires de groupes, avec des pionniers plus instables suivis des héliophiles et des tolérants à l'ombre.



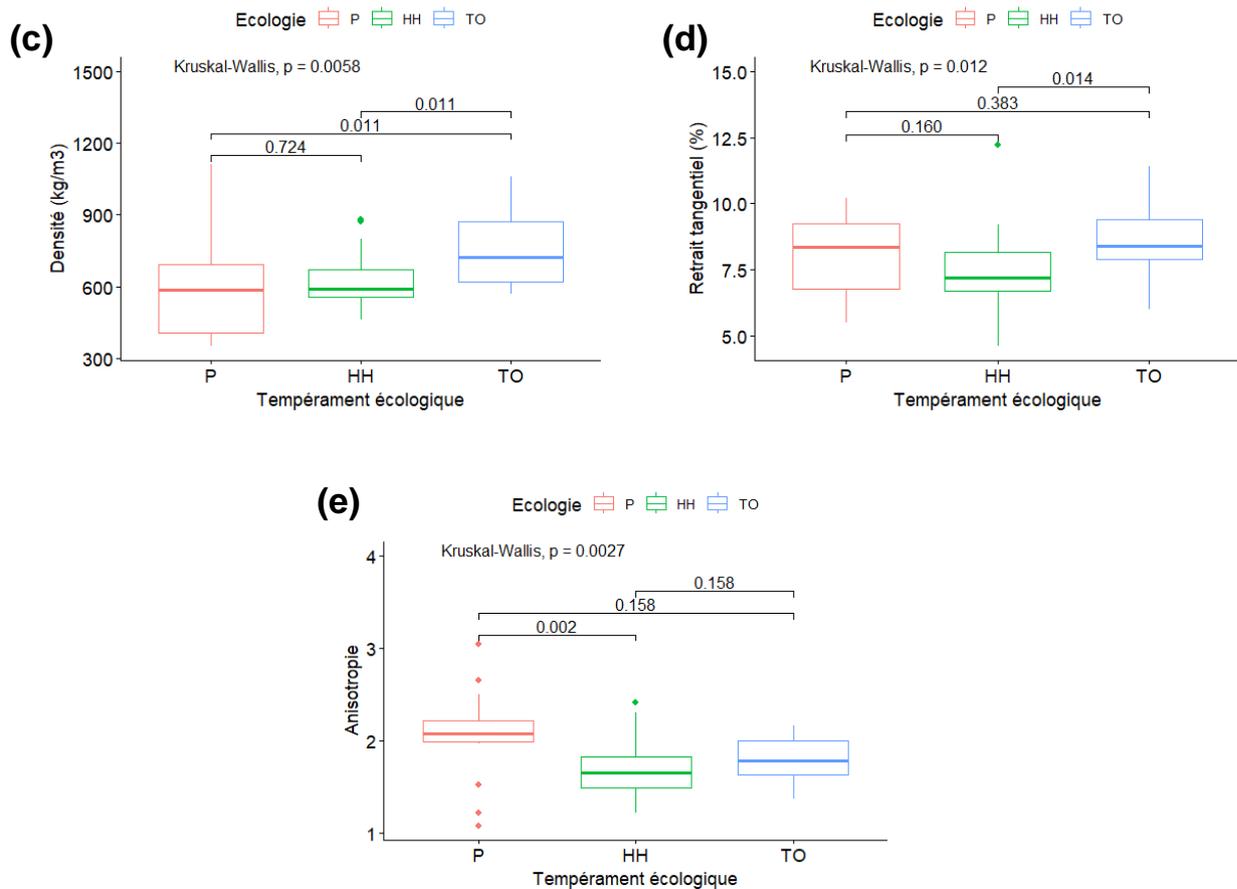


Figure 3.7 : Distribution des propriétés statistiquement significatives de la base de données du CIRAD pour les mêmes espèces que celles des nouveaux essais en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : héliophile ; TO : tolérant à l'ombre.

Les corrélations entre les propriétés (corrélogramme) ont également été comparées. On remarque qu'après réduction du nombre d'espèces dans la base de données, les corrélations entre les propriétés sont toujours les mêmes qu'avec le nombre initial d'espèces (§3.1). Ce qui est tout à fait logique et montre que les corrélations sont indépendantes de l'espèce. En comparant avec les corrélations obtenues après les nouveaux essais (§3.2), quelques différences ont pu être mises en évidence. C'est le cas de la compression et de la flexion dynamique qui sont corrélées significativement dans la base de données mais pas dans les nouveaux résultats. Un autre exemple est le PSF qui dans la base de données du CIRAD n'a aucune corrélation forte avec les autres propriétés, mais présente une unique corrélation significative avec l'anisotropie des retraits. Dans les nouveaux essais par contre, bien qu'aucune corrélation forte ne soit observée entre le PSF et les autres propriétés, celui-ci présente des corrélations significatives avec le module d'élasticité et le retrait radial en plus de l'anisotropie des retraits. On peut citer également la corrélation entre le retrait tangentiel et l'anisotropie. Dans la base de

Chapitre 3 : Résultats et analyses

données celle-ci est très faible et non significative tandis que dans les nouveaux essais cette corrélation est positive forte et significative.

Enfin, nous avons également comparé les résultats des analyses de covariance non paramétrique entre eux. Le test a été fait entre la densité du bois et toutes les propriétés avec lesquelles il y avait des corrélations significatives. Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas d'effet du tempérament écologique dans les relations entre la densité et la compression d'une part et la densité et le retrait radial d'autre part, ce qui n'était pas le cas dans l'analyse des nouveaux résultats (§3.2). L'effet du tempérament écologique dans la relation entre la densité du bois et le module d'élasticité a été confirmé, mais il reste difficile de justifier la rigidité élevée des espèces d'ombre par leur densité de bois élevée car le module d'élasticité entre les trois tempéraments n'était pas significativement différent (Tableau 3.7). Pour les nouveaux essais, il avait été possible d'expliquer cela par la densité des espèces d'ombre. Enfin, une influence du tempérament dans la relation entre la densité et le cisaillement a été mise en évidence. On a pu conclure que la forte résistance au cisaillement des espèces d'ombre est liée à leur densité de bois élevée.

Pour finir, retenons que malgré une comparaison rigoureuse des résultats physico-mécaniques de la base de données du CIRAD avec les nouveaux résultats physico-mécaniques de la thèse (mêmes espèces à une exception près et mêmes propriétés), des différences relatives à l'influence du tempérament écologique ont pu être mises en évidence. Cela traduit peut-être ici un potentiel effet du vieillissement sur les propriétés déterminées. Par ailleurs, cela peut être également lié au fait que les résultats de la base de données du CIRAD que nous analysons ici sont des moyennes par espèce et pas des résultats par échantillon. Cela pourrait enfin être lié à l'évolution des méthodes de mesures.

3.4 Caractéristiques anatomiques des espèces en fonction du tempérament écologique

Statistiques descriptives

Le Tableau A.3 (Annexe A) présente les statistiques descriptives des caractéristiques anatomiques par espèces. Pour le nombre des vaisseaux par millimètre carré et les différentes épaisseurs de paroi (épaisseur tangentielle en particulier), la dispersion est assez élevée (> 15%) pour les trois tempéraments en particulier pour les espèces *Croton oligandrus* (P), *Fillaeopsis discophora* (P), *Dacryodes normandii* (HH) et *Scyphocephalum mannii* (HH) pour le nombre

Chapitre 3 : Résultats et analyses

des vaisseaux et *Anthocleista nobilis* (P), *Croton oligandrus* (P), *Fillaeopsis discophora* (P), *Gossweilerodendron balsamiferum* (HH) et *Sacoglottis gabonensis* (HH) pour les épaisseurs de paroi. Pour ces espèces, aucune remarque particulière n'a été faite, pour certaines d'entre elles, les échantillons testés provenaient d'arbres différents et pour d'autres ils provenaient du même arbre comme c'était le cas pour toutes les autres espèces qui ne présentent pas de variations aussi élevées. Dans l'ensemble, ce sont les espèces tolérantes à l'ombre qui présentent les plus faibles variations de données. La longueur moyenne des fibres est comprise entre 1 et 2 mm quel que soit le tempérament écologique. Le nombre des vaisseaux est très variable d'une espèce à une autre. Le diamètre radial est en moyenne supérieur au diamètre tangentiel de l'ordre de 0,1 mm. Il est difficile de donner une tendance générale entre les variations des épaisseurs radiale et tangentielle. La plus faible épaisseur (radiale et tangentielle) est de l'ordre de 2 µm et les plus élevées sont de 8µm et 7µm respectivement épaisseur tangentielle et radiale de l'espèce *Desbordesia glaucescens* tolérante à l'ombre. Les espèces des trois tempéraments présentaient en général des vaisseaux solitaires et des vaisseaux groupés (Trouy, 2015). Les parois des fibres étaient de trois types à savoir très fine, fine à épaisse et très épaisse.

Tableau 3.8 : Statistiques descriptives des caractéristiques anatomiques en fonction du tempérament écologique. LF : longueur des fibres ; nb_vais/mm² : fréquence des vaisseaux ; diam_tang_moy_vais : diamètre tangentiel moyen des vaisseaux ; diam_rad_moy_vais : diamètre radial moyen des vaisseaux ; diam_moy_vais : moyenne des différents diamètres des vaisseaux ; epais_tang_moy_paroï : épaisseur tangentielle moyenne des parois des fibres ; epais_rad_moy_paroï : épaisseur radiale moyenne des parois des fibres ; epais_moy_paroï : moyenne des différentes épaisseurs des parois des fibres ; m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation.

Caractéristiques anatomiques	Tempérament écologique								
	Pionnier			Hémi-héliophile			Tolérant à l'ombre		
	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
LF (mm)	1.63	0.26	16	1.74	0.35	20	1.88	0.49	26
nb_vais/mm ²	2.17	1.64	76	5.44	2.81	52	4.59	1.66	36
diam_tang_moy_vais (mm)	0.22	0.053	24	0.16	0.031	19	0.2	0.037	19
diam_rad_moy_vais (mm)	0.3	0.073	24	0.21	0.038	18	0.27	0.051	19
diam_moy_vais (mm)	0.26	0.062	24	0.19	0.033	17	0.23	0.043	19
epais_tang_moy_paroï (µm)	2.94	1.42	48	3.25	1.36	42	5.2	2.08	40
epais_rad_moy_paroï (µm)	2.86	1.35	47	3.17	1.04	33	5.44	2.09	38
epais_moy_paroï (µm)	2.9	1.37	47	3.21	1.18	37	5.32	2.07	39

Le [Tableau 3.8](#) ci-dessus présente les statistiques descriptives des caractéristiques anatomiques des espèces par tempérament écologique. Les nombres d'espèces et d'échantillons par groupe étant égaux (n=30), les comparaisons peuvent être effectuées de façon rigoureuse. On observe tout d'abord de grandes dispersions de données (cv > 15%) pour chaque caractère anatomique

Chapitre 3 : Résultats et analyses

en particulier pour le nombre de vaisseaux par millimètre carré des pionniers ainsi que les différentes épaisseurs des parois des différents tempéraments. On observe également que le diamètre radial des vaisseaux est supérieur au diamètre tangentiel des vaisseaux quel que soit le tempérament écologique. Ce qui indique une forme plutôt ellipsoïdale des vaisseaux. Les forts coefficients de variation observés peuvent être expliqués par les structures anatomiques des espèces individuellement.

Corrélations entre les propriétés

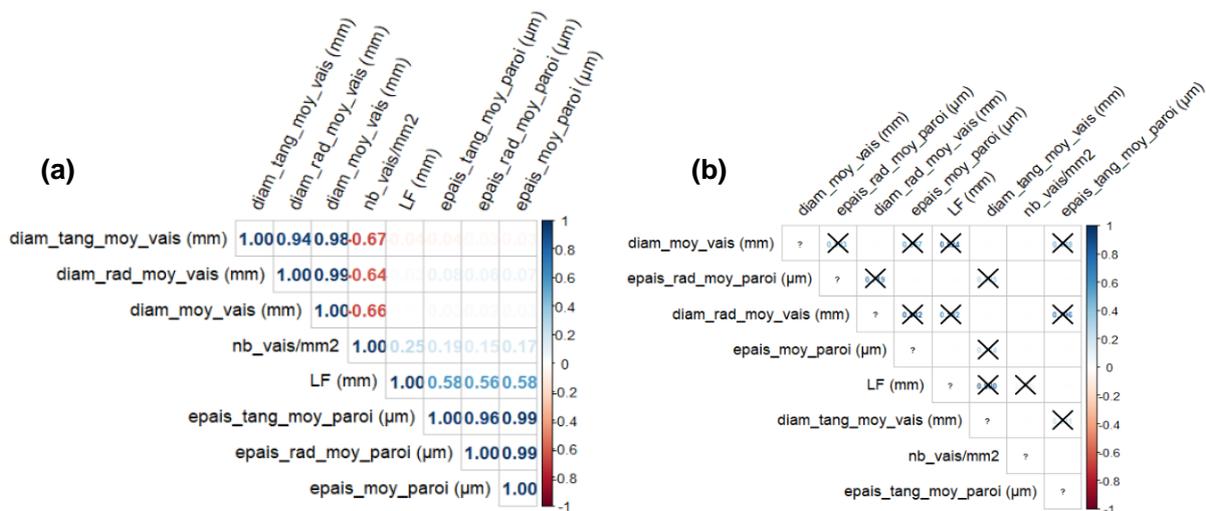


Figure 3.8 : Corrélogramme des caractéristiques anatomiques du bois. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq +0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p -values non significatives sont marquées par une croix. epais : épaisseur ; moy : moyen ou moyenne ; rad : radial(e) ; tang : tangentiel(le) ; LF : longueur des fibres ; diam : diamètre ; vais : vaisseau ; nb : nombre.

Les corrélogrammes ci-dessus présentent les corrélations (Figure 3.8(a)) et les significativités (Figure 3.8(b)) obtenus entre les différents caractères anatomiques mesurés. Les différentes épaisseurs des parois sont corrélées positivement et significativement entre eux de même que les différents diamètres des vaisseaux. Il n'existe aucune corrélation significative entre les diamètres des vaisseaux et les épaisseurs des parois des fibres. Le nombre des vaisseaux par millimètre carré ($\text{nb_vais}/\text{mm}^2$) est fortement corrélé négativement aux différents diamètres des vaisseaux ($\rho \leq -0,5$) et ces corrélations sont toutes significatives. En d'autres termes, lorsque le nombre de vaisseaux augmente, leurs diamètres diminuent et inversement. Le nombre des vaisseaux par millimètre carré est corrélé très faiblement aux longueurs des fibres (LF) et aux différentes épaisseurs des parois. La corrélation avec les longueurs des fibres n'est pas

significative tandis que celles avec les épaisseurs des parois le sont. Les longueurs des fibres sont corrélées significativement et positivement aux épaisseurs des parois. Cela signifie que lorsque les longueurs des fibres augmentent, les épaisseurs des parois augmentent également. Autrement, les espèces aux fibres longues auraient des parois plus épaisses et celles aux fibres courtes, des parois moins épaisses. Cela est vérifiable pour certaines espèces et pas pour d'autres (Tableau A.3). Cela devra également être vérifié en fonction du tempérament écologique par un test de Kruskal-Wallis.

Les régressions suivantes (Figure 3.9) présentent ces corrélations suivant le tempérament écologique.

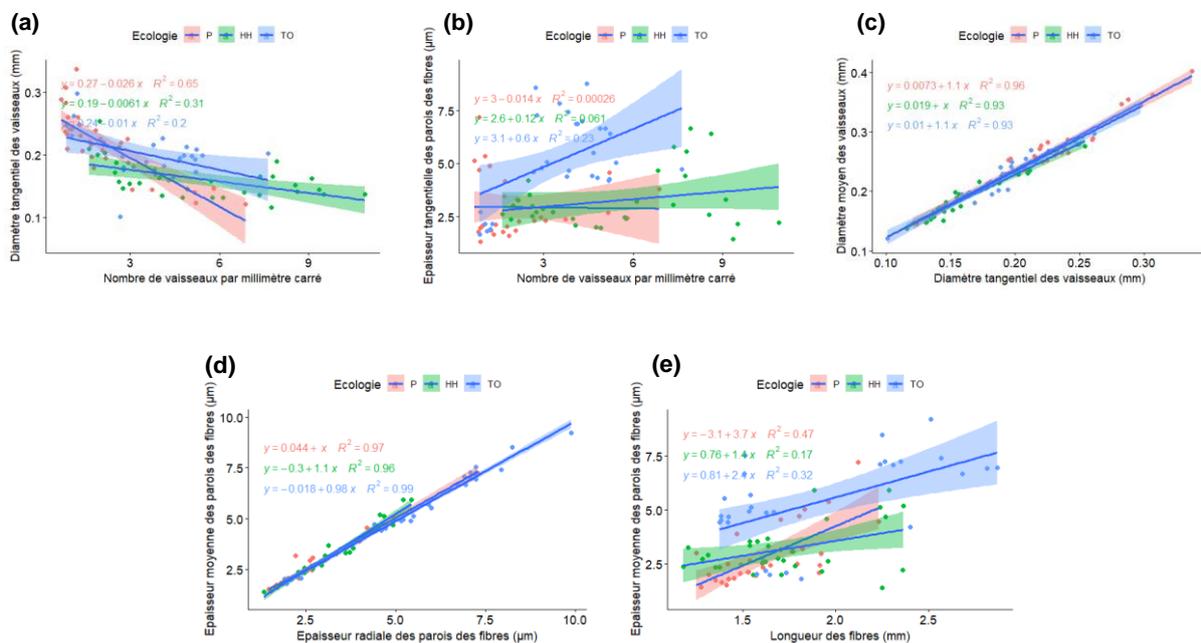


Figure 3.9 : Régressions linéaires entre les caractéristiques anatomiques en fonction du tempérament écologique.

Les régressions linéaires des diamètres des vaisseaux entre eux, des épaisseurs des parois entre elles, du nombre des vaisseaux avec les épaisseurs des fibres et les diamètres des vaisseaux et des longueurs des fibres avec les épaisseurs des fibres présentaient des évolutions similaires et les coefficients de détermination avaient les mêmes ordres de grandeurs. Pour cette raison, nous avons choisi de présenter uniquement un seul résultat de chaque mise en relation. La corrélation entre le nombre de vaisseaux et les différents diamètres est confirmée uniquement chez les pionniers (Figure 3.9(a)). Les corrélations observées entre les diamètres entre eux et les épaisseurs entre elles sont les mêmes quel que soit le tempérament écologique (Figure 3.9(c et d)). Les modèles de régressions entre les longueurs des fibres, le nombre de vaisseaux et les

Chapitre 3 : Résultats et analyses

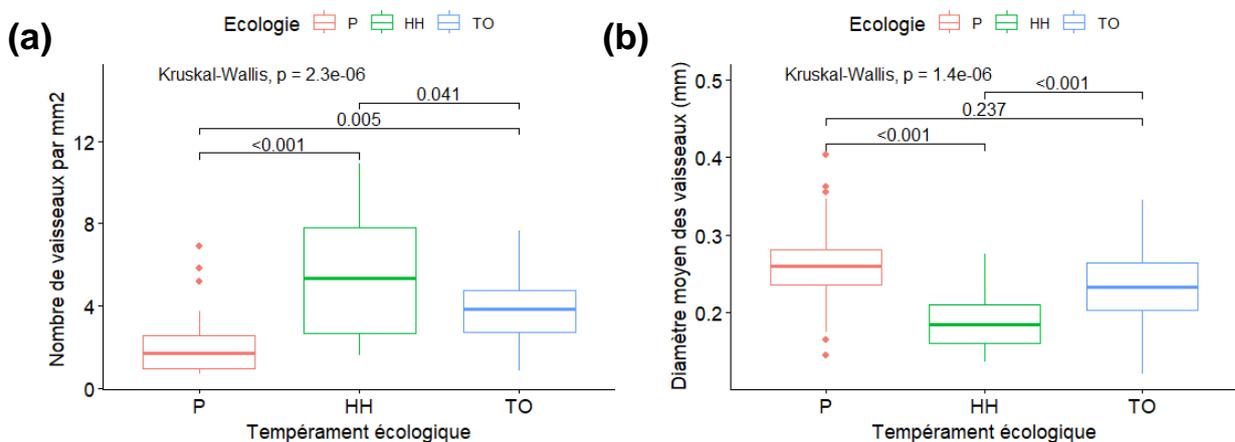
différentes épaisseurs de parois sont faibles peu importe le tempérament écologique (Figure 3.9(b et e)).

Tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn

Tableau 3.9 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les caractéristiques anatomiques du bois, montrant l'importance des différences dans les profils écologiques des arbres étudiés. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

Caractéristiques anatomiques	Test de Kruskal-Wallis	Test de Dunn		
	p -values	P-HH	HH-TO	TO-P
LF (mm)	1.69E-01 "ns"	ns	ns	ns
nb_vais/mm ²	2.35E-06 "****"	***	*	**
diam_tang_moy_vais (mm)	5.67E-06 "****"	***	***	ns
diam_rad_moy_vais (mm)	1.09E-06 "****"	***	***	ns
diam_moy_vais (mm)	1.41E-06 "****"	***	***	ns
epais_tang_moy_paroι (μm)	4.74E-05 "****"	ns	**	***
epais_rad_moy_paroι (μm)	3.47E-06 "****"	ns	**	***
epais_moy_paroι (μm)	1.35E-05 "****"	ns	**	***

Les résultats du test de Kruskal-Wallis (Tableau 3.9) démontrent une influence du tempérament écologique sur toutes les caractéristiques anatomiques à l'exception des longueurs des fibres (LF). Par conséquent, on ne saurait comparer les longueurs des fibres suivant les différents tempéraments. Les comparaisons multiples de Dunn (Tableau 3.9) montrent qu'il y a beaucoup plus de différences significatives entre le groupe des héliophiles et des tolérants à l'ombre (HH-TO) qu'entre les deux autres duos (P-HH et TO-P). La Figure 3.10 ci-dessous présente les résultats du test de Dunn de façon détaillée.



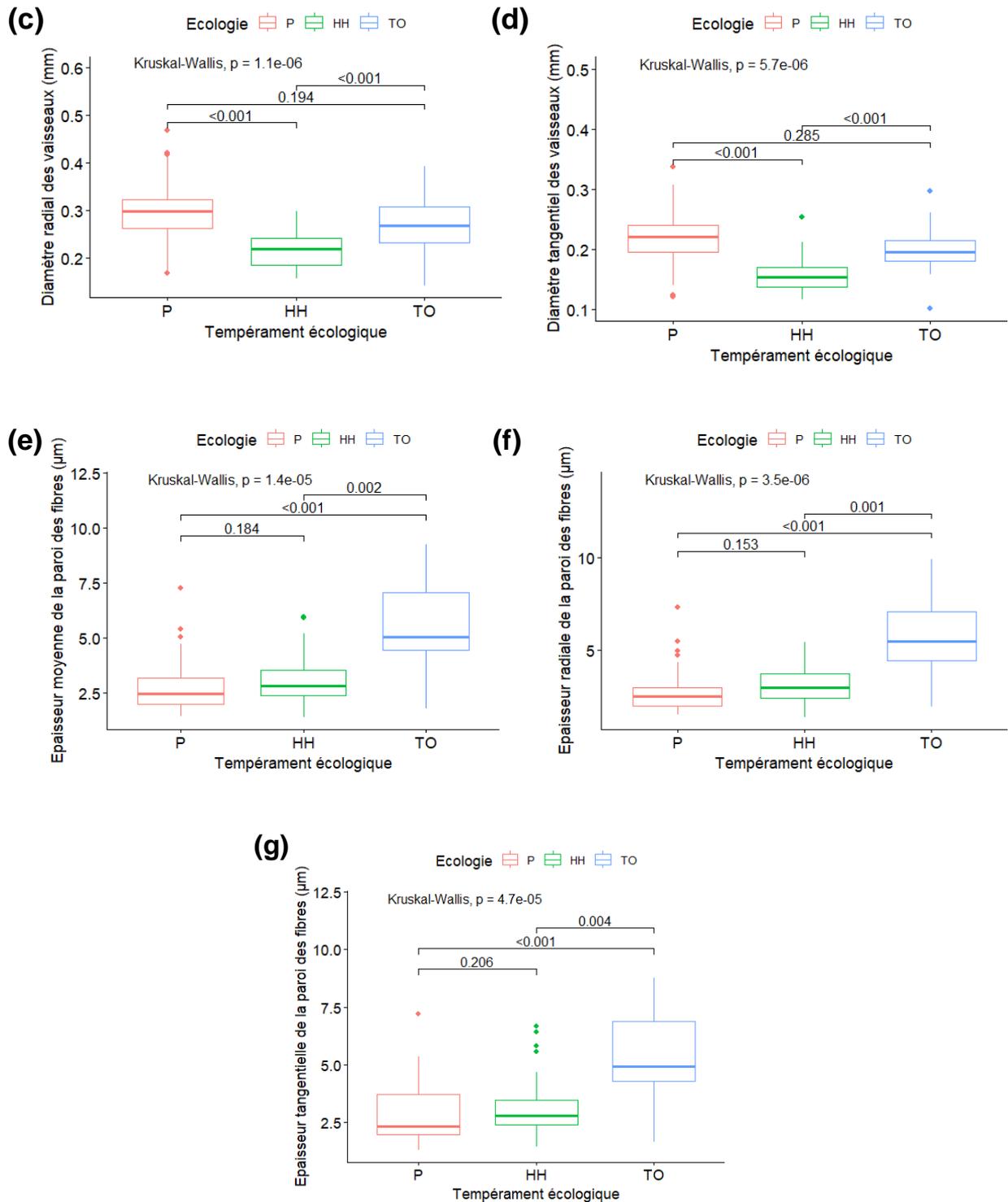


Figure 3.10 : Distribution des caractéristiques anatomiques statistiquement significatives en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre.

On observe notamment que le groupe des hémi-héliophiles a des vaisseaux plus nombreux que le groupe des tolérants à l'ombre et le groupe des pionniers (Figure 3.10(a)). Le groupe des tolérants à l'ombre a un nombre plus important de vaisseaux par rapport au groupe des

Chapitre 3 : Résultats et analyses

pionniers. La différence du nombre de vaisseaux entre les tolérants à l'ombre et les héliophiles était légèrement significative (p -value = 0,041). Le groupe des pionniers présente des vaisseaux plus larges (Figure 3.10(b, c et d)), mais il n'y avait pas de différence statistique significative entre ce groupe et le groupe des tolérants à l'ombre (p -value > 0,05). Les tolérants à l'ombre ont des tailles des vaisseaux supérieures aux tailles des vaisseaux des héliophiles (p -values < 0,05). De plus, les tolérants à l'ombre ont des parois des fibres plus épaisses que celles des héliophiles et beaucoup plus que celles des pionniers (Figure 3.10(e, f et g)). Il n'y avait aucune différence statistique significative entre les tailles des parois des héliophiles et des pionniers (p -values > 0,05).

3.5 Variation de la composition chimique en fonction du tempérament écologique

La Figure 3.11 présente les spectres d'absorbance des 368 échantillons testés (Figure 3.11(a)) et les spectres moyens en fonction du tempérament écologique des espèces (Figure 3.11(a')). On vérifie que les spectres obtenus ont l'allure caractéristique des spectres d'échantillons de bois (Brunner et al., 1996; Chi Leung et al., 2004; Tsuchikawa & Kobori, 2015) et l'absence d'échantillon aberrant dans le lot testé. Les figures b et b' montrent les spectres des dérivées secondes (obtenus suivant l'algorithme de Savitzky & Golay (1964)) des spectres d'absorbance des 368 échantillons d'une part et les spectres moyens des dérivées secondes en fonction du tempérament écologique. Les longueurs d'ondes les plus importantes associées aux pics 1, 2 et 3 des dérivées secondes sont 1423 nm, 1912 nm et 2269 nm. Ces pics correspondent à des concentrations en cellulose ou eau (pic 1), en eau (pic 2) et en cellulose ou hémicelluloses (pic 3) selon la littérature (Schwanninger et al., 2011 ; Sandak et al., 2016) pour les trois groupes.

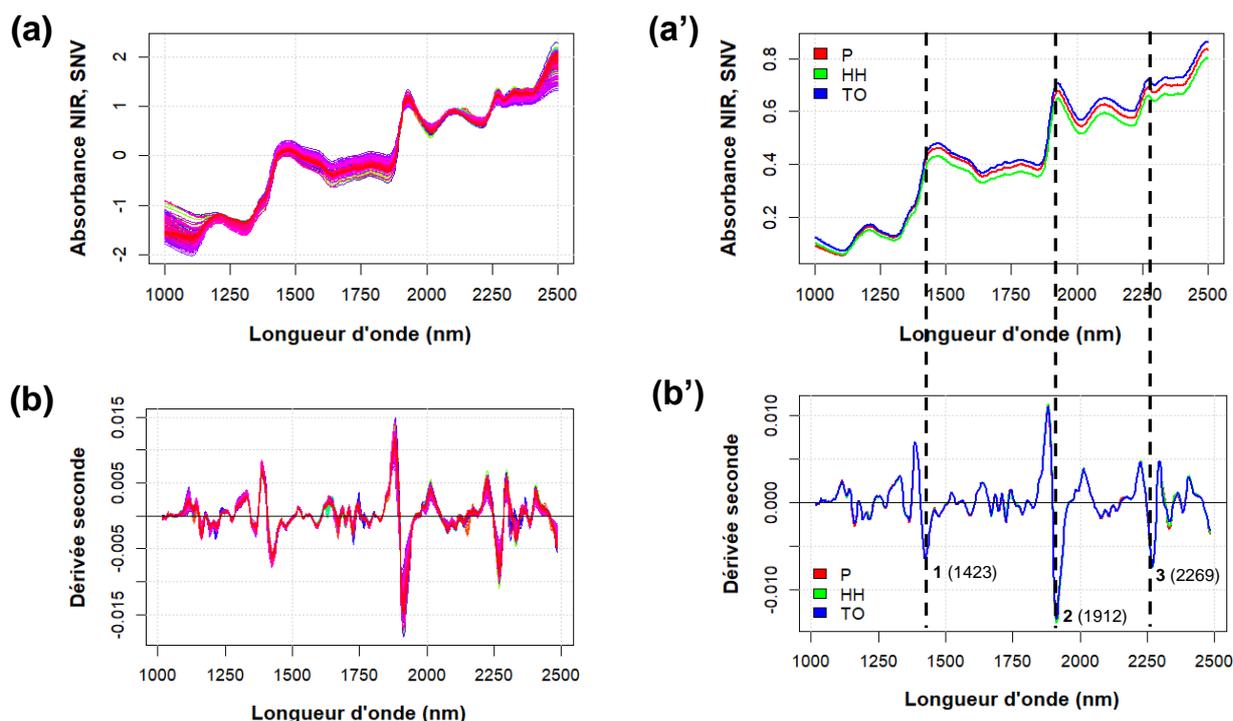


Figure 3.11 : Spectre d'absorption et dérivées secondes. (a) et (a') spectres d'absorption de tous les échantillons et spectres en fonction du tempérament écologique respectivement. (b) et (b') Dérivées secondes des spectres d'absorption de tous les échantillons et moyenne des spectres des dérivées secondes en fonction du tempérament écologique. P : espèce pionnière ; HH : espèce héliophile et TO : espèce tolérante à l'ombre.

Une analyse en composantes principales (ACP) a permis de mettre en évidence les différences entre les espèces en fonction des trois tempéraments. La Figure 3.12 présente ces différences suivant les deux premières dimensions (Dim 1 et Dim 2) de l'ACP qui expliquent 49,2% de la variabilité totale. La dimension 1 est portée par beaucoup plus de celluloses, suivi de lignines, d'hémicelluloses et de molécules d'eau en plus faibles proportions. La dimension 2 est portée quant à elle par des proportions relativement équivalentes de celluloses, d'hémicelluloses et de lignine. La dimension 2 semble bien discriminer le groupe des pionniers (P). En effet, les échantillons appartenant à ce groupe sont répartis le long de la dimension 1 et majoritairement vers la partie négative de la dimension 2. Les héliophiles (HH) ne peuvent être discriminés par les deux dimensions car leurs échantillons sont plutôt concentrés au niveau du centre de gravité de l'ACP. Enfin, les échantillons du groupe des tolérants à l'ombre (TO) apparaissent dispersés de part et d'autre des deux dimensions, ils ne peuvent donc pas être discriminés par celles-ci ni par la troisième dimension qui n'est pas représentée ici. La répartition des pionniers est très différente des répartitions des deux autres tempéraments.

Chapitre 3 : Résultats et analyses

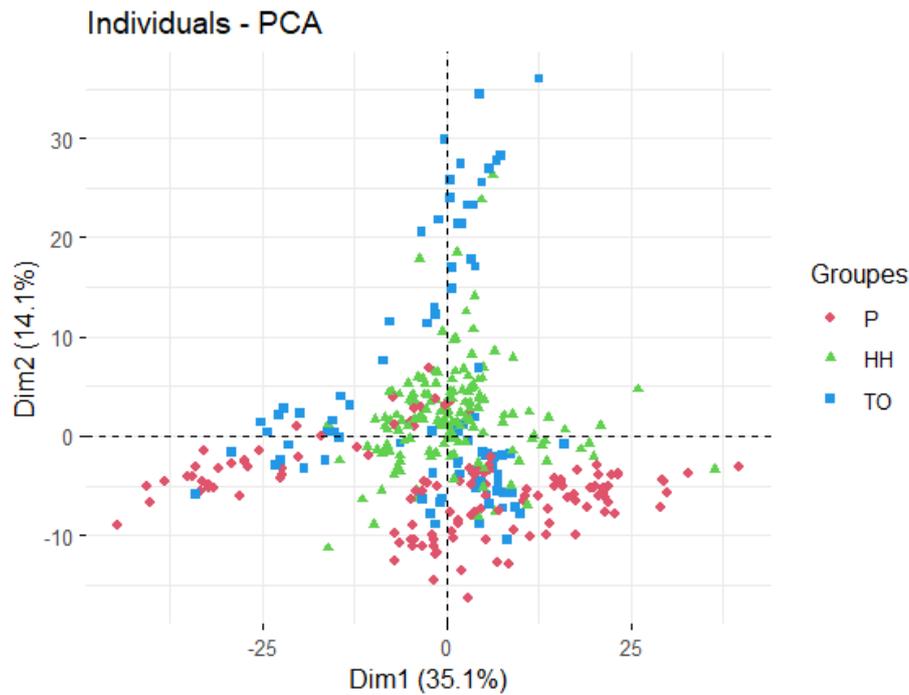


Figure 3.12 : Analyse en composantes principales (ACP). Dim1 : Dimension 1 ; Dim2 : Dimension 2. P : espèce pionnière ; HH : espèce hémi-héliophile et TO : espèce tolérante à l'ombre.

Afin de vérifier les hypothèses de notre étude et de comprendre comment sont les différences entre les groupes, une analyse discriminante par moindres carrés partiels (PLS-DA) a été réalisée (Figure 3.13). Le Tableau 3.10 indique les bandes d'absorption des spectres proche infrarouge (SPIR) normalement associées aux principaux composants chimiques dans les échantillons de bois. La Figure 3.13(a) présente les spectres moyens des différences des dérivées secondes entre tempéraments écologiques deux à deux. Le calcul des différences entre les spectres moyens est une méthode très efficace pour détecter des différences et changements entre deux spectres (Ozaki et al., 2001). La Figure 3.13(b) montre les coefficients de régressions de chaque tempérament écologique. Elle aide avec le Tableau 3.10 à établir un portrait chimique de chaque tempérament. On considère qu'un groupe d'échantillons "x" appartient à un tempérament "y" si ses coefficients de régression sont très différents de zéro. Alors, la longueur d'onde (et la liaison chimique) a une importance dans la discrimination. On note par ailleurs que le spectre des pionniers s'oppose aux spectres des hémi-héliophiles et tolérants à l'ombre. Ce qui confirme les différences observées précédemment à la Figure 3.12 en ce sens que le groupe des pionniers est très différent des deux autres groupes. En outre, les spectres sont caractérisés par des pics plus importants de cellulose et d'hémicelluloses que de lignine et d'extractibles (Tableau 3.10).

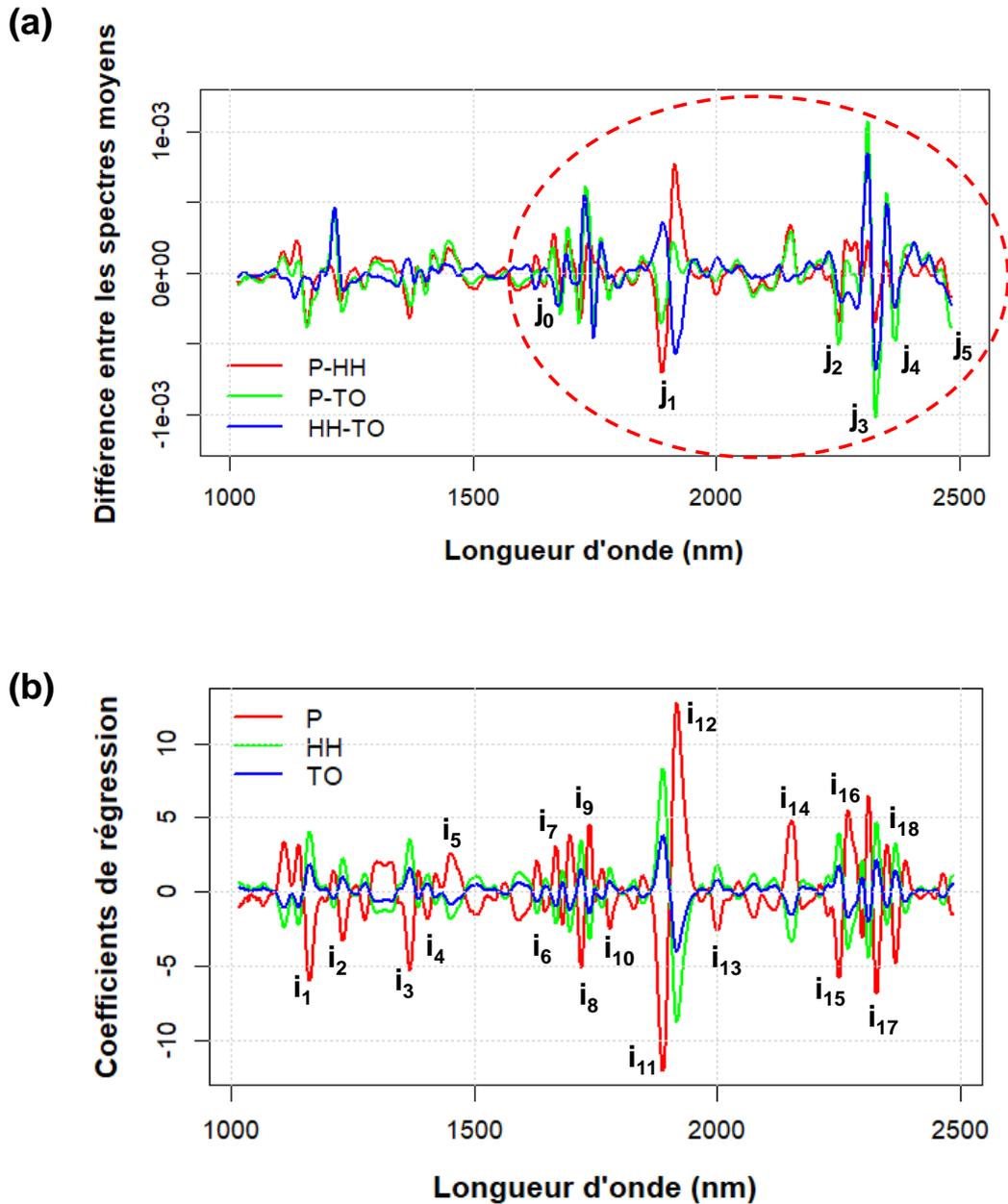


Figure 3.13 : (a) Spectres moyens des différences de dérivées secondes entre les tempéraments écologiques par paires. (b) Coefficients de régression de la 1ère composante des analyses PLS-DA des trois tempéraments P (pionnier), HH (hémi-héliophile) et TO (tolérant à l'ombre).

Chapitre 3 : Résultats et analyses

Tableau 3.10 : Gamme d'absorption SPIR associées aux principaux composants chimiques contenus dans les échantillons de bois. OT : harmonique, str : vibration d'étirement, def : vibration de déformation, asym : antisymétrique et tous : tous les composants.

<i>Index</i>	<i>Bandes de nombre d'ondes (nm)</i>	<i>Composants</i>	<i>Bonds de vibration</i>	<i>Références</i>
<i>i</i> ₁	1144-1195	Lignine	2 nd OT C-H str./2 nd OT C-H str. of CH ₃ /2 nd OT asym. str. C-H, HC=CH	(Kelley et al., 2004); (Heim et al., 2022); (Schwanninger et al., 2011)
<i>i</i> ₂	1200-1250	Cellulose	2 nd OT C-H str.	(Schwanninger et al., 2011); (Heim et al., 2022)
<i>i</i> ₃	1369	Hémicellulose/Tous Cellulose	1st OT C-H str. + C-H def.	(Schwanninger et al., 2011); (Sandak et al., 2016)
<i>i</i> ₄	1393-1417	Cellulose	1 st OT O-H str.	(Sandak et al., 2016); (Heim et al., 2022)
<i>i</i> ₅	1447-1450	Lignine/Extractibles	1 st OT O-H str.	(Schwanninger et al., 2011); (Heim et al., 2022)
<i>i</i> ₆	1621-1639	Cellulose	1 st OT O-H str.	(Schwanninger et al., 2011)
<i>i</i> ₇	1666	Hémicelluloses Lignine	1 st OT C-H str.	(Schwanninger et al., 2011); (Sandak et al., 2016)
<i>j</i> ₀	1669	<u>Extractibles</u>		(Schwanninger et al., 2011); (Sandak et al., 2016)
<i>i</i> ₈	1696	Lignine	1 st OT C-H str.	(Schwanninger et al., 2011)
<i>i</i> ₉	1711-1732	Lignine/Hémicelluloses/ (Cellulose)	1 st OT C-H str.	(Schwanninger et al., 2011); (Fujimoto et al., 2008); (Fujimoto et al., 2007)
<i>i</i> ₁₀	1738	Cellulose	1 st OT C-H str.	(Schwanninger et al., 2011); (Sandak et al., 2016)
<i>i</i> ₁₁ / <i>j</i> ₁	1891	Eau	2 nd OT C=O str.	(Sandak et al., 2016)
<i>i</i> ₁₂	1915	Eau	2 nd OT C=O str.	(Sandak et al., 2016); (Schwanninger et al., 2011)
<i>i</i> ₁₃	1999-2002	Eau	Combinaisons de OH	(Sandak et al., 2016)
<i>i</i> ₁₄	2152	Tous		(Sandak et al., 2016)
<i>i</i> ₁₅ / <i>j</i> ₂	2248-2251	Cellulose/Hémicelluloses	O-H str. + C-O str.	(Sandak et al., 2016); (Schwanninger et al., 2011)
<i>i</i> ₁₆	2269-2272	<u>Cellulose</u> Cellulose/Hémicelluloses	O-H str. + C-O str.	(Schwanninger et al., 2011); (Sandak et al., 2016)
<i>i</i> ₁₇ / <i>j</i> ₃	2317-2338	Cellulose/Hémicelluloses <u>Hémicelluloses</u>	C-H str. + C-H def.	(Sandak et al., 2016); (Schwanninger et al., 2011)
<i>i</i> ₁₈ / <i>j</i> ₄	2365-2368	Cellulose/Hémicelluloses Cellulose	C-H str. + C-H def.	(Sandak et al., 2016); (Schwanninger et al., 2011)
<i>j</i> ₅	2485	<u>Lignine</u> Cellulose/Hémicelluloses	C-H str. + C-C str.	(Schwanninger et al., 2011); (Sandak et al., 2016)

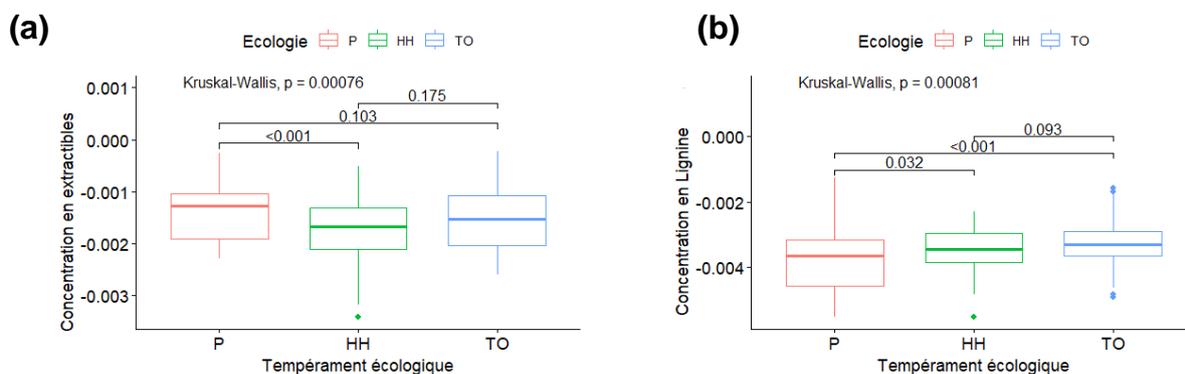
À l'aide de la Figure 3.13(a) et du [Tableau 3.10](#), on peut voir que les différences de composition chimique entre les trois tempéraments dépendent principalement des concentrations en *j*₁, *j*₂, *j*₃

Chapitre 3 : Résultats et analyses

et j₄. Il existe d'autres différences mais elles sont moins importantes en termes d'intensité. De façon globale, c'est la différence P-TO qui est la mieux discriminée suivie de HH-TO et P-HH. À l'aide de la [Figure 3.11\(b'\)](#), on parvient à comparer les concentrations en j₁, j₂, j₃, j₄ et j₅ et les autres différences de moindre importance des différents groupes car la hauteur des pics de la dérivée seconde est proportionnelle à la concentration. Compte tenu des ambiguïtés observées dans la bibliographie (Sandak et al., 2016; Schwanninger et al., 2011) en matière d'attribution des liaisons chimiques caractéristiques des molécules du bois à certaines longueurs d'onde, nous avons décidé de comparer les concentrations en cellulose, hémicelluloses, lignine et extractibles de nos trois tempéraments au niveau des pics j₀ pour les extractibles ([Tableau 3.10](#)), i₁₆ (j₂ et i₁₆ correspondant à la même molécule mais avec une plus forte concentration en i₁₆), j₃, j₄ et j₅. Nous ne comparons pas les concentrations en j₁ car il s'agit de la molécule d'eau et cela n'a aucun intérêt pour nos analyses. Nous considérons uniquement les attributions de Schwanninger et al., (2011). Les résultats des tests de Kruskal-Wallis et de Dunn sont donnés au [Tableau 3.11](#). Les résultats du test de Kruskal-Wallis montrent que seules les différences en hémicelluloses, lignine et extractibles sont significatives et pas les différences en quantité de cellulose.

Tableau 3.11 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur la composition chimique, montrant les différences de concentrations entre les tempéraments écologiques des arbres étudiés. ns : non significatif ; significativité des *p*-values : 0 '***' 0.001 '***' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

Propriétés chimiques	Test de Kruskal-Wallis	Test de Dunn		
	<i>p</i> -values	P-HH	HH-TO	TO-P
Extractibles	7.61E-04 "****"	***	ns	ns
Cellulose	3.58E-01 "ns"	ns	ns	ns
Hémicelluloses	1.09E-08 "****"	**	***	***
Lignine	8.07E-04 "****"	*	.	***



Chapitre 3 : Résultats et analyses

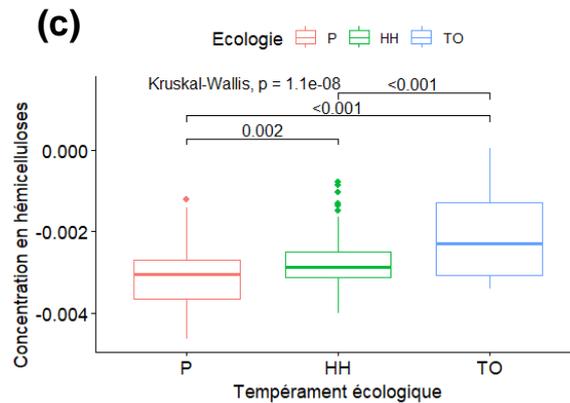


Figure 3.14 : Distribution des composés chimiques statistiquement significatifs en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : héliophile et TO : tolérant à l'ombre

La Figure 3.14 ci-dessus présente les différences observées grâce au test de Dunn. Il y a plus de composés extractibles chez les espèces pionnières par rapport aux héliophiles. Il n'y a toutefois pas de différence significative entre la teneur en extractibles des héliophiles, des pionniers avec les tolérants à l'ombre (Figure 3.14(a)). Les quantités de lignine des tolérants à l'ombre et des héliophiles sont plus importantes que la quantité de lignine des pionniers. Aucune différence significative n'a été observée entre les tolérants à l'ombre et les héliophiles pour les quantités de lignine (Figure 3.14(b)). Les quantités d'hémicelluloses sont plus importantes chez les espèces d'ombre, suivi des héliophiles et des pionniers (Figure 3.14(c)).

Corrélations entre les composés chimiques



Figure 3.15 : Corrélogramme des relations entre les composés chimiques du bois (corrélations rho de Spearman). Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en

rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq +0.5$ et $\rho \leq -0.5$. Ext : extractibles ; Cell : cellulose ; Hem : hémicelluloses et Lig : lignine.

Nous pouvons observer que tous les composés chimiques du bois sont fortement corrélés entre eux (Figure 3.15) et ces corrélations sont toutes significatives (p -values < 0,05). Les corrélations avec les matières extractibles sont négatives.

Les régressions suivantes (Figure 3.16) permettent d’observer ces corrélations en fonction du tempérament écologique.

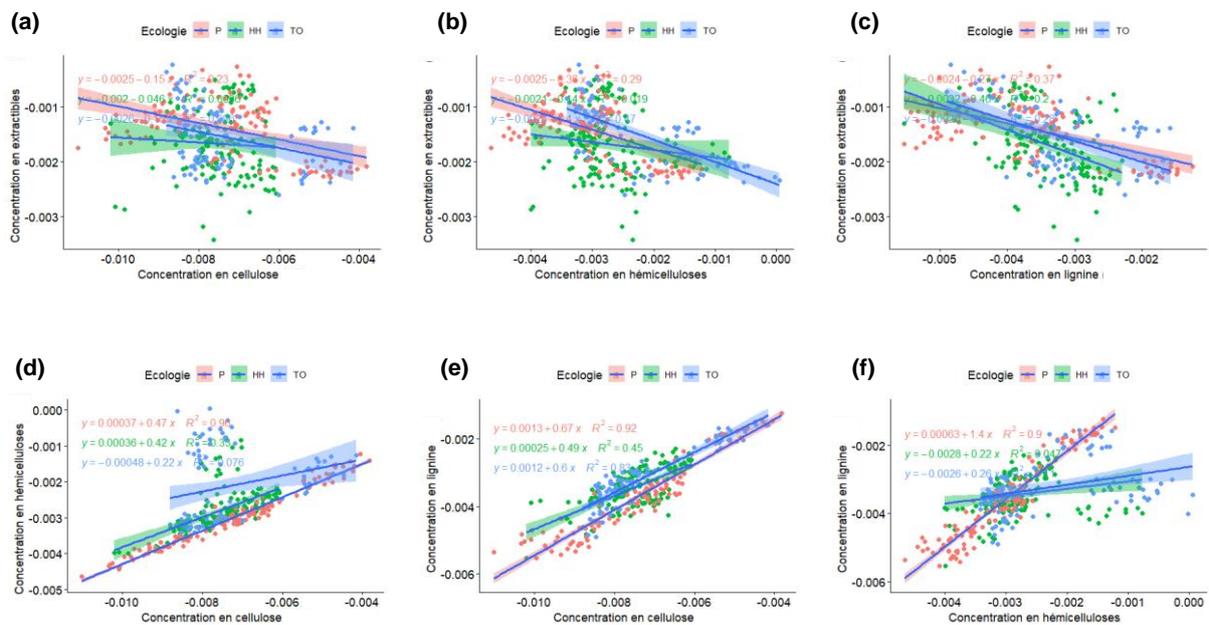


Figure 3.16 : Régressions linéaires entre les composés chimiques en fonction du tempérament écologique.

On peut clairement constater que les régressions linéaires entre les matières extractibles et les autres polymères du bois sont faibles ($R^2 < 0,5$) quel que soit l’écologie de l’espèce (Figure 3.16(a, b et c)). Par contre, pour les espèces pionnières uniquement, le modèle présente des coefficients de détermination très élevés ($R^2 = 0,9$) entre la cellulose et les hémicelluloses d’une part (Figure 3.16(d)) et les hémicelluloses et la lignine d’autre part (Figure 3.16(f)). Pour finir, la concentration en cellulose augmente avec la concentration en lignine chez les espèces pionnières et les espèces d’ombre (Figure 3.16(e)).

Chapitre 3 : Résultats et analyses

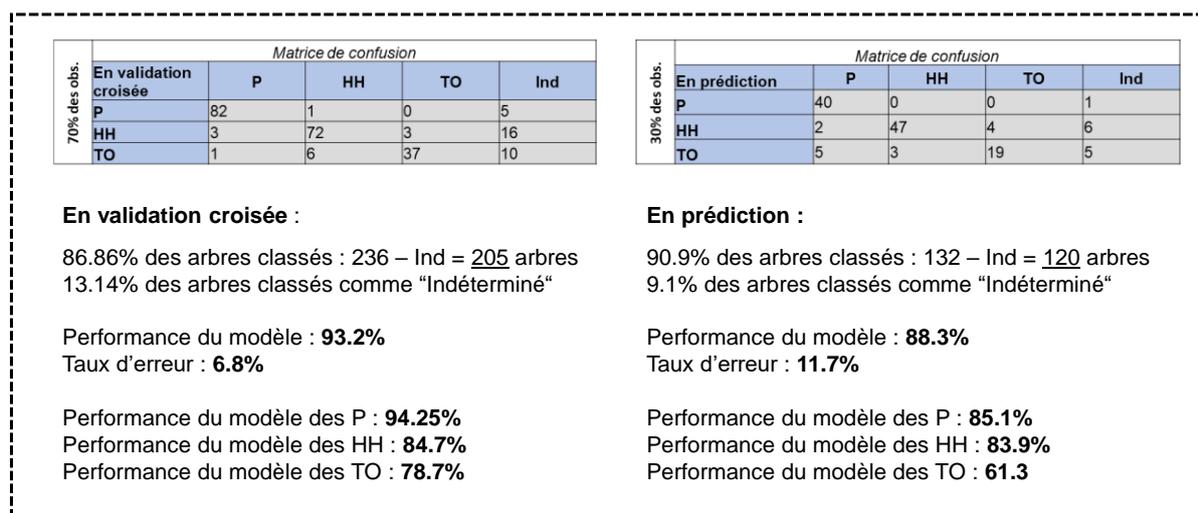


Figure 3.17 : Résultats de la PLS-DA avec 10 composantes principales. Ind : indéterminé et obs. : observations. P : espèce pionnière ; HH : espèce héliophile et TO : espèce tolérante à l'ombre.

Comme présenté à la Figure 3.17, le modèle de prédiction présente des performances (Équation 13) élevées en validation et en prédiction. De plus, le pourcentage de classifications correctes pour les P, HH et TO (Équations 14 à 16) est élevé surtout chez les P et les HH avec respectivement 94,3% et 84,7% en validation croisée et respectivement 85,1% et 83,9% en prédiction. On note un taux d'erreur (Équation 17) de moins de 12% (6,8% en validation croisée et 11,7% en prédiction). De plus, seulement moins de 15% des espèces n'ont pas été classées (Équation 18), ce qui est acceptable dans l'ensemble. Les résultats obtenus grâce au modèle PLS-DA ont montré qu'il existait des différences de compositions chimiques et de concentrations entre les tempéraments pionniers, héliophiles et tolérants à l'ombre. Ces différences de composition étaient suffisantes pour distinguer les espèces en fonction du tempérament écologique. On retrouve ce que laissait entrevoir l'ACP.

$$PM = \frac{\text{Total des arbres bien classés } P, HH \text{ et } TO}{\text{Nombre total d'arbres classés}} \times 100 \quad (13)$$

$$PM(P) = \frac{\text{Nombre total d'arbres } P \text{ bien classés}}{\text{Nombre total d'arbres } P} \times 100 \quad (14)$$

$$PM(HH) = \frac{\text{Nombre total d'arbres } HH \text{ bien classés}}{\text{Nombre total d'arbres } HH} \times 100 \quad (15)$$

$$PM(TO) = \frac{\text{Nombre total d'arbres } TO \text{ bien classés}}{\text{Nombre total d'arbres } TO} \times 100 \quad (16)$$

$$E_r = \frac{\text{Total des arbres mal classés } P, HH \text{ et } TO}{\text{Nombre total d'arbres classés}} \times 100 \quad (17)$$

$$Ind = \frac{\text{Nombre total d'arbres non déterminé}}{\text{Nombre total d'arbres}} \quad (18)$$

Avec PM la performance du modèle et E_r le taux d'erreur.

3.6 Propriétés physico-mécaniques en relation avec les caractéristiques anatomiques des espèces

L'objectif de cette partie est de vérifier un éventuel effet de l'anatomie du bois sur les propriétés physico-mécaniques des espèces en fonction du tempérament écologique. Compte tenu du nombre réduit des données anatomiques, nous avons travaillé sur un échantillon plus petit ($n=90$). Nous avons donc refait les tests de Kruskal-Wallis et de Dunn afin de vérifier si oui ou non le tempérament écologique impactait toujours les mêmes propriétés et de quelle manière.

Tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn

Les résultats du test de Kruskal-Wallis (Tableau 3.12) ci-dessous montrent que pour des propriétés telles que le cisaillement τ , le point de saturation des fibres PSF et le retrait radial R_R , la réduction du nombre d'éprouvettes et aussi d'espèces modifie l'effet du tempérament écologique. Pour deux de ces propriétés (cisaillement et retrait radial), l'effet du tempérament écologique s'est révélé cette fois-ci significative, quand pour le point de saturation des fibres il s'est révélé non significatif.

Tableau 3.12 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les propriétés physico-mécaniques et l'anatomie du bois sur des données réduites ($n=90$). ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1. 'P' pionnier ; 'HH' hémi-héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

Propriétés	Test de Kruskal-Wallis	Test de Dunn		
	p -values	P-HH	HH-TO	TO-P
W	3.88E-01 "ns"	ns	ns	ns
PSF	6.10E-01 "ns"	ns	ns	ns
LF	1.69E-01 "ns"	ns	ns	ns
ρ	9.15E-08 "****"	**	**	***
E_L	1.82E-05 "****"	ns	***	***
σ'	1.67E-04 "****"	ns	*	***
τ	3.30E-05 "****"	**	ns	***
AMF	5.49E-04 "****"	**	**	ns
E_L/ρ	9.79E-05 "****"	***	**	ns

Chapitre 3 : Résultats et analyses

R_R	7.00E-06 "****"	*	**	***
R_T	1.75E-02 "*"	.	ns	*
R_T/R_R	3.20E-08 "****"	**	**	***
$nb_vais/mm2$	2.35E-06 "****"	***	*	**
$diam_tang_moy_vais$	5.67E-06 "****"	***	***	ns
$diam_rad_moy_vais$	1.09E-06 "****"	***	***	ns
$diam_moy_vais$	1.41E-06 "****"	***	***	ns
$epais_tang_moy_paroi$	4.74E-05 "****"	ns	**	***
$epais_rad_moy_paroi$	3.47E-06 "****"	ns	**	***
$epais_moy_paroi$	1.35E-05 "****"	ns	**	***

Ci-dessous les résultats du test de Dunn pour le cisaillement et le retrait radial afin de mieux observer les différences entre les différents groupes écologiques. En effet ces deux propriétés se sont révélées significatives lorsque le nombre d'échantillons a été réduit ($n=90$), ce qui n'était pas le cas précédemment ($n=368$) (cf. §3.2).

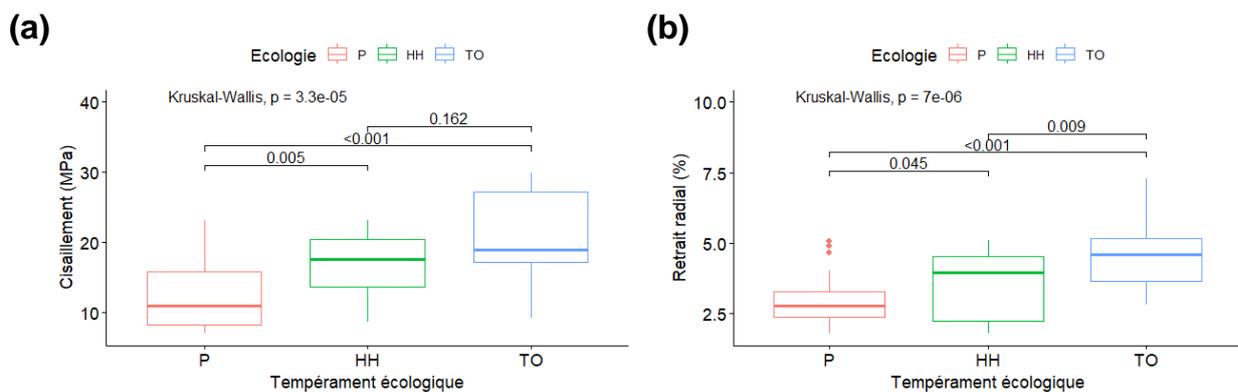


Figure 3.18 : Distribution du cisaillement longitudinal et du retrait radial en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre.

Pour le cisaillement (Figure 3.18(a)), on observe que les hémi-héliophiles et les tolérants à l'ombre ont une plus grande résistance par rapport aux pionniers. Cette résistance est beaucoup plus élevée pour les espèces d'ombre, ce qui était déjà le cas dans l'analyse de la base de données du CIRAD. Il n'y avait toutefois pas de différence significative entre les résistances au cisaillement des hémi-héliophiles et des tolérants à l'ombre. Pour le retrait radial (Figure 3.18(b)), ce sont les espèces d'ombre qui présentent la plus grande sensibilité suivie des hémi-héliophiles. Les espèces de lumière (P) sont les moins sensibles. La différence était plus significative entre les tolérants à l'ombre et les pionniers (p -value $< 0,001$) qu'entre les tolérants à l'ombre et les hémi-héliophiles (p -value = 0,009). Les hémi-héliophiles étaient légèrement plus sensibles au retrait radial que les pionniers (p -value = 0,045).

Corrélations entre les propriétés

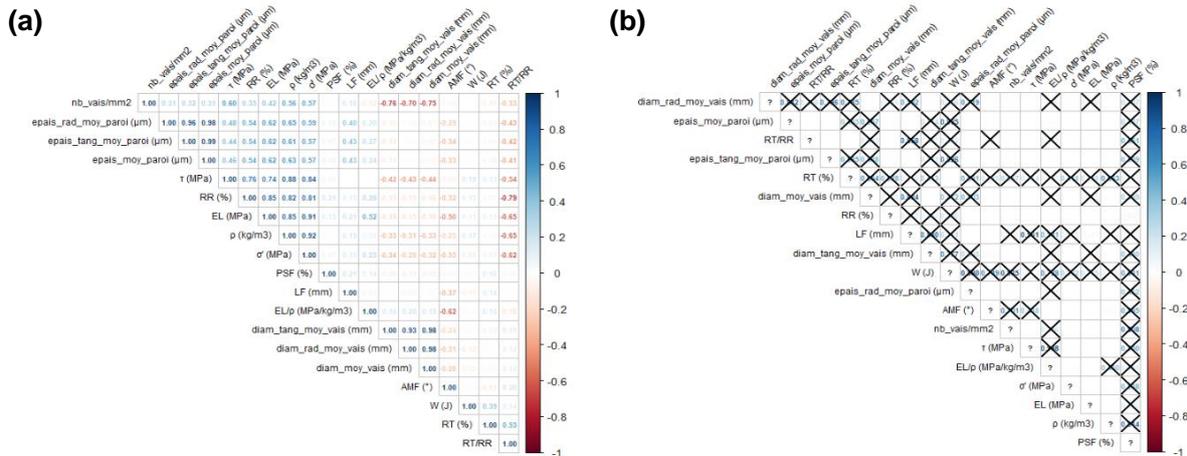


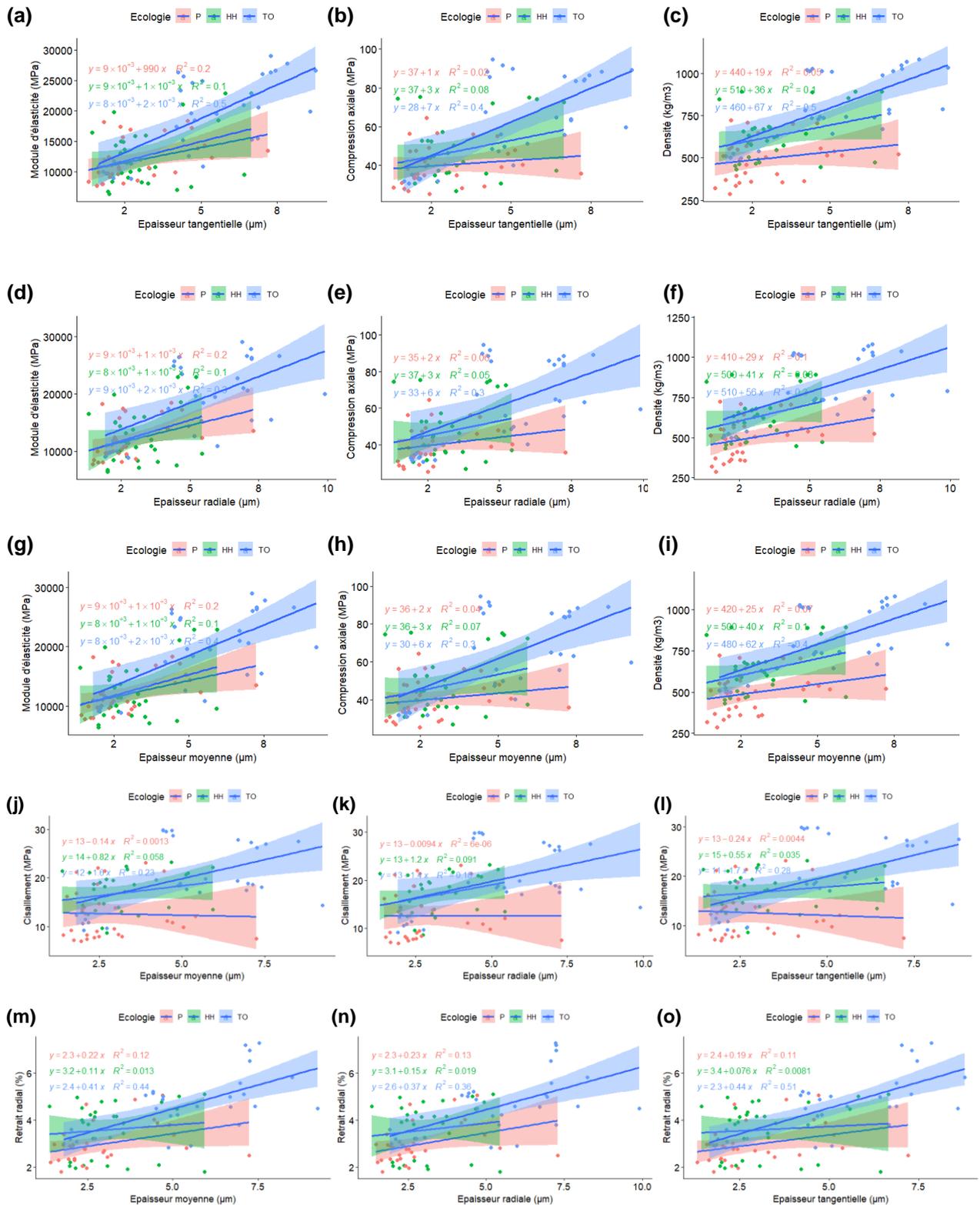
Figure 3.19 : Corrélogrammes des relations entre l'anatomie et les propriétés physico-mécaniques. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq +0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix.

Les corrélations et leurs significativités présentées sur les corrélogrammes ci-dessus (Figure 3.19) montrent des corrélations positives et significatives entre les épaisseurs radiale, tangentielle, moyenne et le cisaillement (τ), le module d'élasticité longitudinal (E), la résistance à la compression axiale (σ'), la densité (ρ) et le retrait radial (R_R). Ces corrélations signifient que lorsque les parois des fibres deviennent plus épaisses, les propriétés physico-mécaniques citées précédemment augmentent. Lorsqu'elles deviennent plus fines, ces propriétés diminuent. Les corrélations avec le cisaillement τ sont faibles ($\rho < 0,5$). On note également des corrélations positives et significatives entre le nombre de vaisseaux par millimètre carré (nb_vais/mm^2) et le cisaillement, la densité et la résistance à la compression. Il n'y avait aucune corrélation forte (positive et négative) entre les propriétés physico-mécaniques, les longueurs des fibres (LF) et les différents diamètres des vaisseaux. Toutefois, les faibles corrélations entre les longueurs des fibres et l'AMF et le module d'élasticité étaient significatives. De plus, les faibles corrélations entre les différents diamètres et l'AMF, le cisaillement, la compression et la densité étaient significatives. Malgré les corrélations significatives existantes entre les longueurs des fibres et l'AMF et le module d'élasticité, seules les épaisseurs des parois, les différents diamètres des vaisseaux et le nombre de vaisseaux par millimètre carré peuvent permettre d'expliquer les différences physico-mécaniques observées entre les trois tempéraments écologiques. À titre de rappel, il n'y avait pas d'effet positif du tempérament écologique sur les longueurs des fibres. Pour ce faire, l'influence du tempérament écologique a

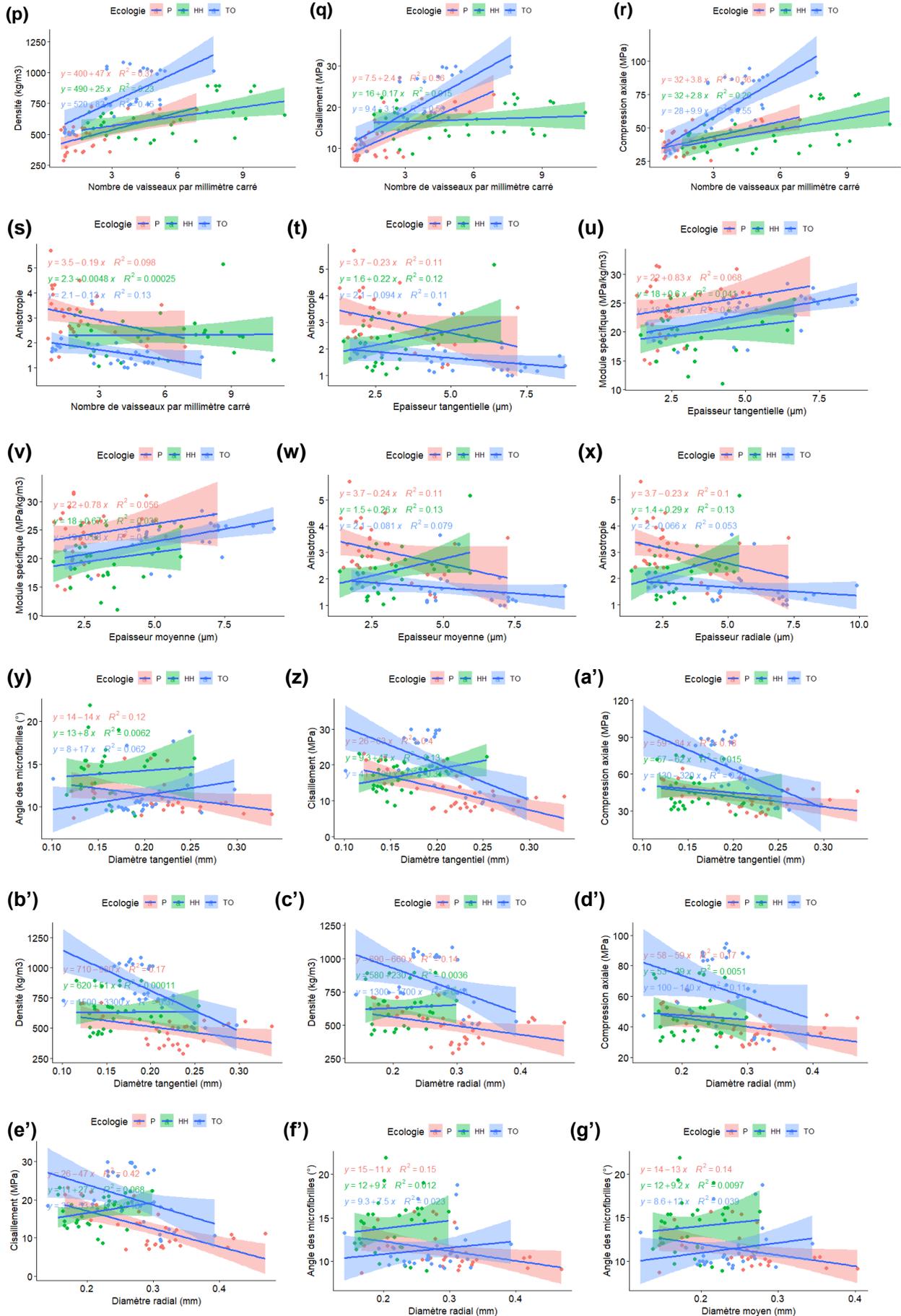
Chapitre 3 : Résultats et analyses

été vérifié dans les différentes corrélations significatives grâce à une analyse de covariance non paramétrique.

Analyse de covariance non paramétrique



Chapitre 3 : Résultats et analyses



Chapitre 3 : Résultats et analyses

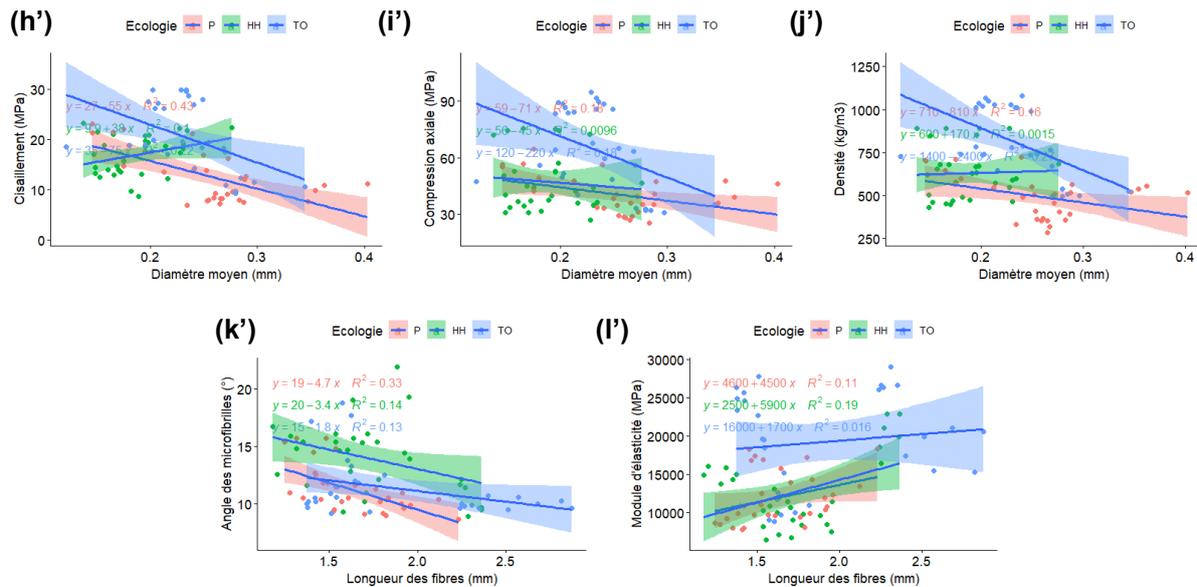


Figure 3.20 : Effet du tempérage écologique sur les relations entre les caractéristiques anatomiques et les propriétés physico-mécaniques du bois.

Un effet significatif du tempérage écologique a été mis en évidence dans toutes les relations entre les propriétés physico-mécaniques et l'anatomie du bois (Tableau 3.13 et Figure 3.20 de (a) à (l')) à l'exception des relations entre les épaisseurs des parois et la contrainte de résistance en compression axiale σ' (Tableau 3.13 et Figure 3.20(b, e et h)). En d'autres termes, au moins l'une des droites de régression est différente des autres. L'influence du tempérage écologique est la plus importante dans les relations entre le nombre des vaisseaux et la densité du bois et les différents diamètres et la densité du bois (Tableau 3.13). Par ailleurs, la force des relations linéaires était relativement bonne ($R^2 = 0,5$) entre le module d'élasticité, la densité et le retrait radial avec l'épaisseur tangentielle des parois d'une part et le nombre des vaisseaux avec le cisaillement et la compression d'autre part chez les espèces d'ombre (Figure 3.20(a, c, o, q et r)). Il y avait également une relation linéaire forte entre le nombre de vaisseaux et le cisaillement chez les espèces pionnières (Figure 3.20(q)). Les relations entre les longueurs des fibres, l'AMF et le module d'élasticité étaient faibles (Figure 3.20(k' et l')) quel que soit l'écologie des espèces. En somme, les propriétés physico-mécaniques élevées d'une part (densité, module d'élasticité, résistances en compression et cisaillement) et l'anisotropie et le module spécifique faibles d'autre part des espèces d'ombre par rapport aux espèces pionnières s'expliquent par leurs parois très épaisses, leurs vaisseaux plus nombreux et des diamètres de vaisseaux en moyenne plus petits que ceux des pionniers mais pas significativement différents. Elles s'expliquent exclusivement par les parois plus épaisses des espèces d'ombre par rapport aux hémi-héliophiles. La sensibilité au retrait radial des espèces d'ombre s'explique par leurs parois

Chapitre 3 : Résultats et analyses

épaisses en particulier les épaisseurs radiales qui sont en moyennes plus élevées que les épaisseurs tangentielles. Les différences de retrait tangentiel et de PSF observées entre les tempéraments écologiques n'ont pas pu être expliquées par les caractéristiques anatomiques car il n'a pas été trouvé de corrélation significative.

Tableau 3.13 : Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les propriétés physico-mécaniques et l'anatomie du bois. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1.

Relation entre propriétés physico-mécaniques et anatomie du bois	ANCOVA non paramétrique	
	p -values et significativité	
	Tempérament écologique	
	Coefficient directeur	Constante
E_L - epais_tang_moy_pari	0.0139 "**"	0.0153 "**"
σ' - epais_tang_moy_pari	0.0608 "."	0.0800 "."
ρ - epais_tang_moy_pari	1.95E-05 "****"	3.92E-05 "****"
E_L - epais_rad_moy_pari	0.0447 "**"	0.0464 "**"
σ' - epais_rad_moy_pari	0.1796 "ns"	0.2 "ns"
ρ - epais_rad_moy_pari	0.000229 "****"	0.000312 "****"
E_L - epais_moy_pari	0.0263 "**"	0.0277 "**"
σ' - epais_moy_pari	0.0995 "."	0.119 "ns"
ρ - epais_moy_pari	6.51E-05 "****"	0.000105 "****"
R_R - epais_tang_moy_pari	0.00274 "****"	0.00288 "****"
τ - epais_tang_moy_pari	0.00121 "****"	0.00193 "****"
R_R - epais_rad_moy_pari	0.00875 "****"	0.00838 "****"
τ - epais_rad_moy_pari	0.00423 "****"	0.0052 "****"
R_R - epais_moy_pari	0.00504 "****"	0.00495 "****"
τ - epais_moy_pari	0.00225 "****"	0.00306 "****"
τ - nb_vais/mm ²	7.55E-05 "****"	0.000474 "****"
ρ - nb_vais/mm ²	1.34E-09 "****"	2.63E-09 "****"
σ' - nb_vais/mm ²	1.03E-06 "****"	3.32E-06 "****"
R_T/R_R - nb_vais/mm ²	0.4851 "ns"	1.31E-08 "****"
R_T/R_R - epais_tang_moy_pari	0.0727 "ns"	6.21E-07 "****"
R_T/R_R - epais_rad_moy_pari	0.072 "ns"	1.34E-06 "****"
R_T/R_R - epais_moy_pari	0.0528 "ns"	7.39E-07 "****"
E_L/ρ - epais_tang_moy_pari	0.6501 "ns"	2.41E-06 "****"
E_L/ρ - epais_moy_pari	0.1089 "ns"	3.45E-06 "****"
AMF - diam_tang_moy_vais	0.0578 "ns"	0.0041 "****"
AMF - diam_rad_moy_vais	0.1124 "ns"	0.0149 "**"
AMF - diam_moy_vais	0.0735 "ns"	0.0091 "****"
τ - diam_tang_moy_vais	5.79E-06 "****"	1.13E-05 "****"
τ - diam_rad_moy_vais	0.0002 "****"	1.30E-05 "****"
τ - diam_moy_vais	3.39E-05 "****"	8.72E-06 "****"
σ' - diam_tang_moy_vais	0.0333 "**"	3.07E-06 "****"
σ' - diam_rad_moy_vais	0.2276 "ns"	9.7E-06 "****"
σ' - diam_moy_vais	0.1076 "ns"	3.74E-06 "****"

Chapitre 3 : Résultats et analyses

ρ - diam_tang_moy_vais	0.0020 "***"	2.32E-10 "****"
ρ - diam_rad_moy_vais	0.0165 "**"	5.68E-10 "****"
ρ - diam_moy_vais	0.0066 "***"	2.49E-10 "****"
AMF - LF	0.312 "ns"	2.74E-05 "****"
E_L - LF	0.5233 "ns"	1.39E-05 "****"

3.7 Propriétés physico-mécaniques en relation avec la composition chimique des espèces

L'objectif de cette partie est de vérifier un éventuel effet de la composition chimique du bois sur les propriétés physico-mécaniques des espèces en fonction du tempérament écologique.

Tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn

Les tests de Kruskal-Wallis et de Dunn ont été refait afin de vérifier que l'effet du tempérament écologique était le même que celui observé aux paragraphes 3.2 et 3.5. On peut remarquer que contrairement à précédemment, il y a maintenant une influence du tempérament écologique sur le retrait radial du bois (Tableau 3.14 : test de Kruskal-Wallis). Toutefois, les différences entre les groupes (Tableau 3.14 : test de Dunn) ne sont pas significatives.

Tableau 3.14 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les propriétés physico-mécaniques et la composition chimique du bois. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

Propriétés	Test de Kruskal-Wallis	Test de Dunn		
	p -values	P-HH	HH-TO	TO-P
τ (MPa)	1.54E-01 "ns"	ns	ns	ns
W (J)	9.39E-01 "ns"	ns	ns	ns
Cellulose	3.58E-01 "ns"	ns	ns	ns
ρ (kg/m ³)	5.73E-06 "****"	ns	***	***
E (MPa)	3.18E-03 "****"	ns	**	*
σ' (MPa)	1.48E-02 "**"	ns	*	*
AMF (°)	7.59E-05 "****"	***	ns	**
E/ρ (MPa/kg/m ³)	7.79E-07 "****"	***	ns	**
RR (%)	2.90E-02 "**"	.	ns	.
RT (%)	5.30E-08 "****"	**	**	***
RT/RR	1.88E-06 "****"	**	*	***
PSF (%)	4.42E-03 "****"	ns	**	.
Extractibles	7.61E-04 "****"	***	ns	ns
Hémicelluloses	1.10E-08 "****"	**	***	***
Lignine	8.07E-04 "****"	*	.	***

Corrélations entre les propriétés

Les corrélogrammes ci-dessous (Figure 3.21) présentent les corrélations entre les propriétés physico-mécaniques et la composition chimique du bois (Figure 3.21(a)) des espèces étudiées ainsi que le niveau de significativité (Figure 3.21(b)) de ces corrélations. Il existe une seule corrélation négative forte entre la densité du bois ρ et la teneur en extractibles ($\rho = -0,52$) et cette corrélation est significative. Les autres corrélations avec la teneur en extractibles sont faibles. Toutefois, les corrélations faibles entre la teneur en extractibles et le retrait radial, le retrait tangentiel, l'anisotropie, l'AMF, le cisaillement, la compression axiale et le module d'élasticité sont toutes significatives (Figure 3.21(b)). On note également une autre corrélation négative forte et significative entre l'anisotropie des retraits R_T/R_R et la concentration de lignine ($\rho = -0,61$). Autrement dit, il semblerait que plus un bois est dense moins il a d'extractibles. Cependant, les coefficients de détermination des droites de régression de tous les tempéraments écologiques ne sont pas significatifs (Figure 3.22(g)). Une corrélation positive forte et significative est enregistrée entre le retrait radial et la concentration en lignine. En outre, plus la concentration en lignine est élevée, plus le bois semble être stable (anisotropie faible). Par ailleurs, on observe des corrélations positives fortes et significatives ($\rho \geq 0,5$) entre le cisaillement τ , le module d'élasticité E , la densité et la résistance en compression axiale avec les concentrations en cellulose et lignine. En d'autres termes, lorsque les teneurs en cellulose et lignine augmentent, les propriétés physico-mécaniques (densité, cisaillement, module d'élasticité et résistance à la compression) augmentent également. Les corrélations les plus élevées sont celles en relation avec le taux de lignine. Enfin, il n'existe aucune corrélation forte entre la concentration en hémicelluloses et les propriétés physico-mécaniques. Toutefois, les corrélations avec l'anisotropie, le retrait radial, le PSF, la densité, le cisaillement, la compression et le module d'élasticité sont significatives. La concentration en cellulose est corrélée faiblement et significativement au retrait radial, au PSF, à l'anisotropie, à l'AMF et au module spécifique et ces corrélations sont significatives. La concentration en lignine est corrélée faiblement et significativement à l'AMF et au module spécifique et ces corrélations sont significatives. Seule la corrélation avec le PSF n'est pas significative. Nous n'avons trouvé aucune corrélation significative entre les concentrations en cellulose et lignine et le retrait tangentiel R_T et l'énergie de rupture en flexion dynamique W .

Chapitre 3 : Résultats et analyses

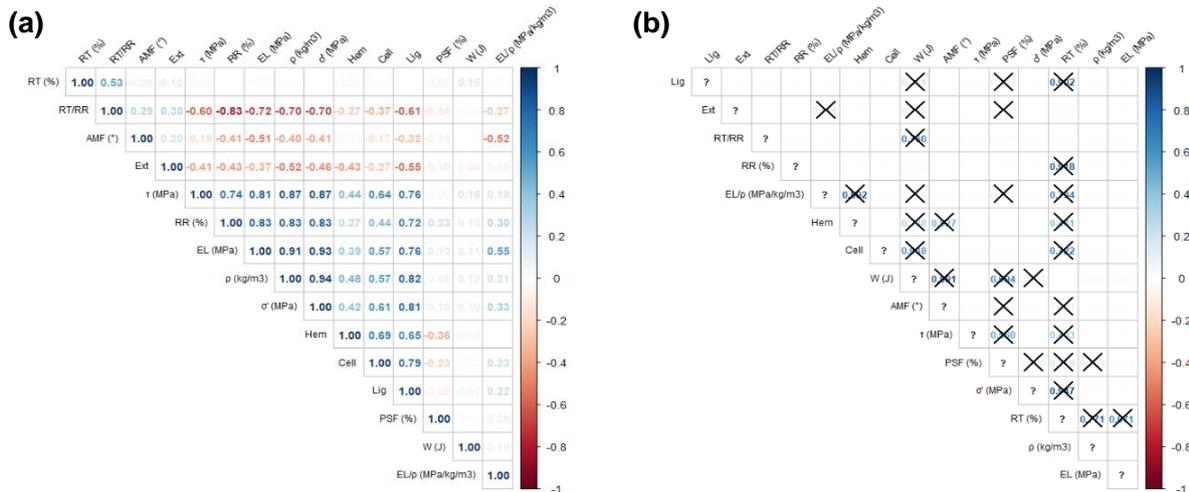
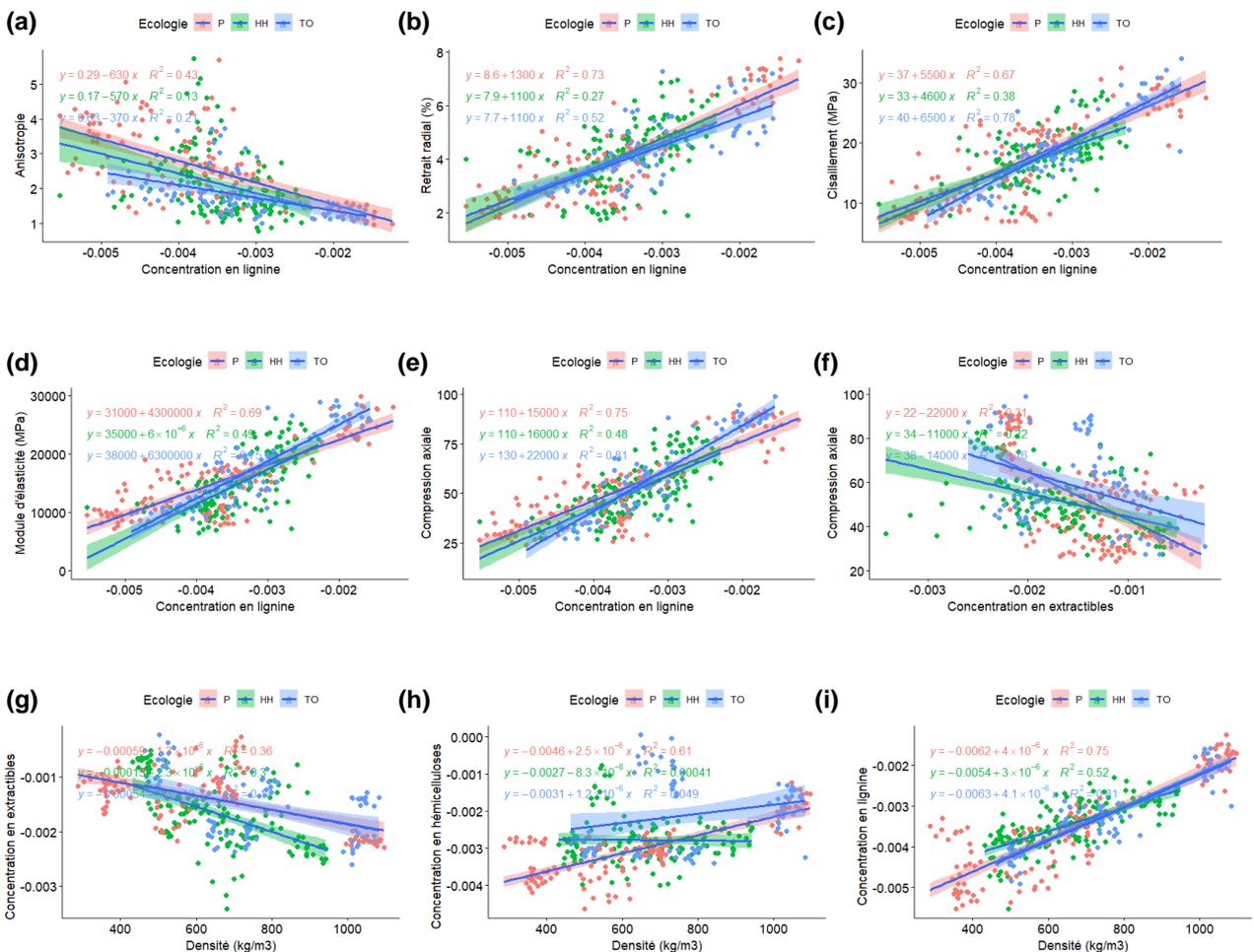
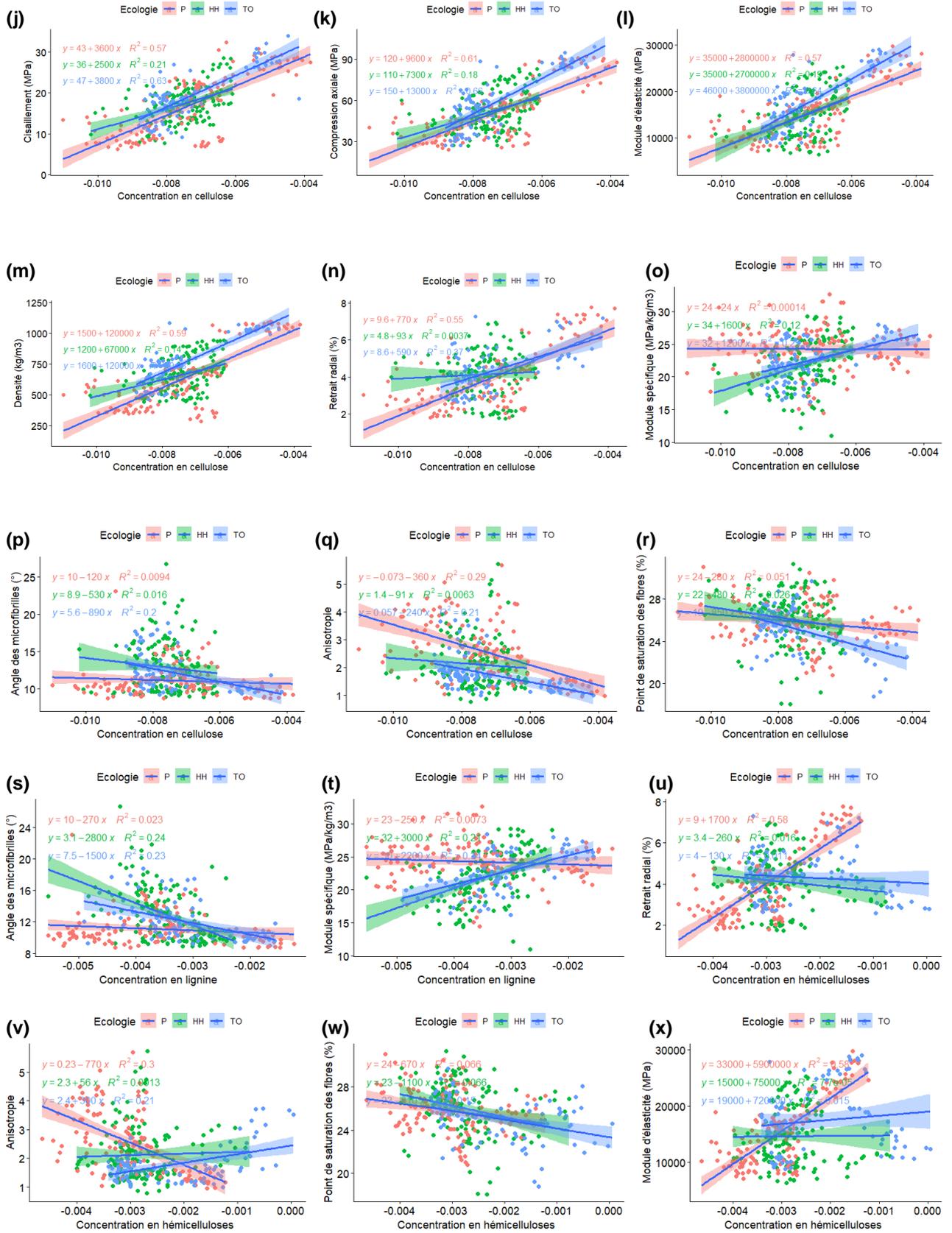


Figure 3.21 : Corrélogramme des relations entre la composition chimique et les propriétés physico-mécaniques. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq +0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p -values non significatives sont marquées par une croix.

Analyse de covariance non paramétrique



Chapitre 3 : Résultats et analyses



Chapitre 3 : Résultats et analyses

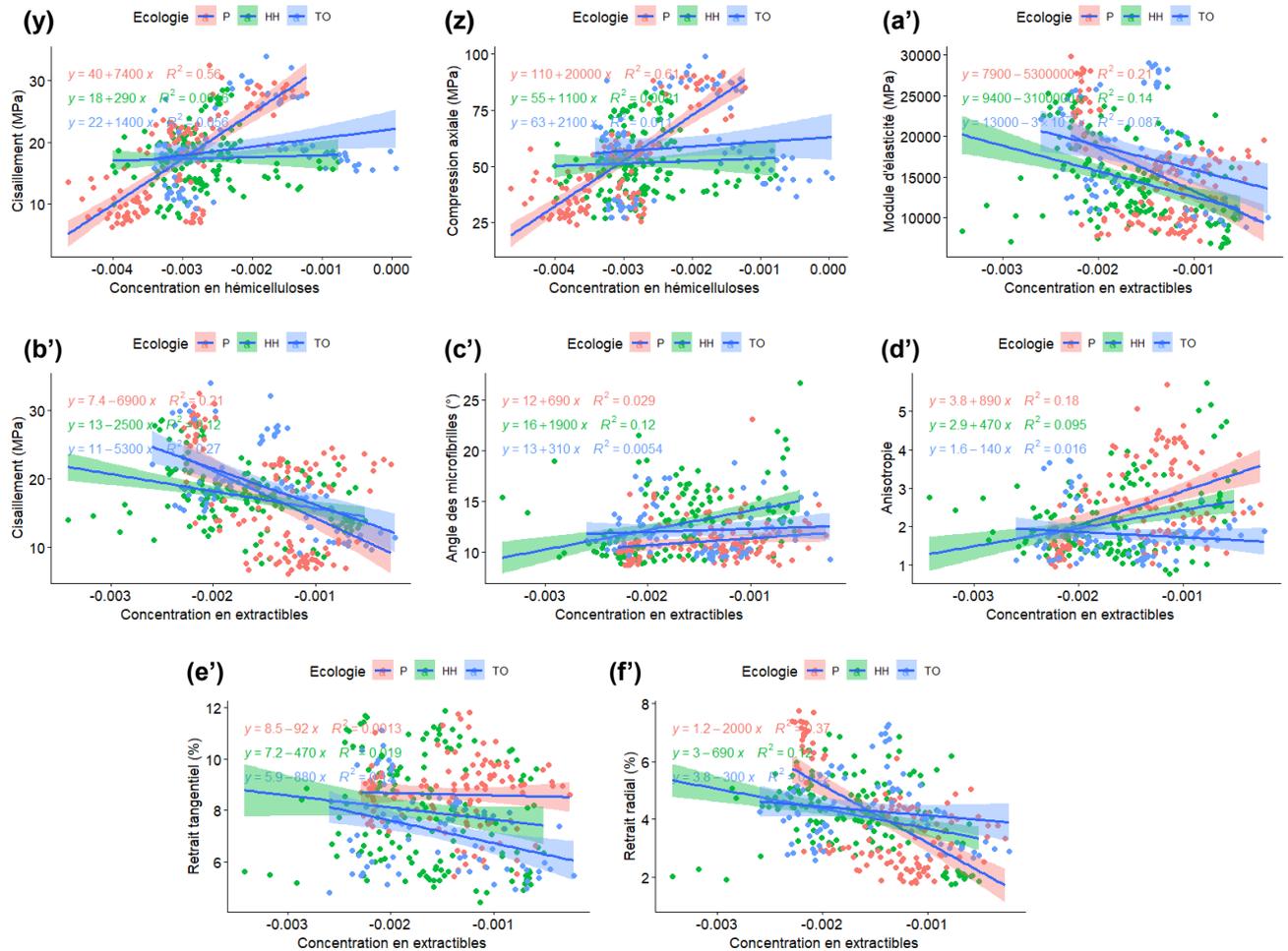


Figure 3.22 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre la composition chimique et les propriétés physico-mécaniques du bois.

La Figure 3.22 présente les relations entre la composition chimique du bois et les propriétés physico-mécaniques. Il s'agit uniquement des propriétés entre lesquelles des corrélations significatives ont été observées précédemment. Les résultats de l'analyse de covariance non paramétrique (Tableau 3.15) indiquent une influence du tempérament écologique sur la plupart des relations sauf pour les relations entre le retrait radial, le cisaillement et la résistance en compression axiale avec la concentration en lignine (Tableau 3.15). De façon générale, il n'y avait pas de relation linéaire entre la composition chimique et les propriétés physico-mécaniques des espèces héli-héliophiles ($R^2 < 0,5$) sauf entre la densité du bois et la concentration en lignine avec $R^2 = 0,52$ (Figure 3.22 (i)). Il y avait des relations linéaires fortes entre la chimie et les propriétés physico-mécaniques des pionniers et des tolérants à l'ombre ($R^2 > 0,5$). Les relations entre la concentration en lignine et l'anisotropie, l'AMF et le module spécifique (Figure 3.22(a, s et t)), la concentration en extractibles et la densité, le module d'élasticité, le cisaillement, l'AMF, l'anisotropie, le retrait tangentiel et le retrait radial (Figure

3.22(g, a', b', c', d', e' et f')), la concentration en cellulose et le module spécifique, l'AMF, l'anisotropie et le PSF (Figure 3.22(o, p, q et r)) et enfin la concentration en hémicelluloses et l'anisotropie et le PSF (Figure 3.22(v et w)) n'étaient pas prédites par des régressions linéaires quel que soit le tempérament écologique ($R^2 < 0,5$). Les résultats obtenus permettent de déduire que la densité élevée des espèces d'ombre est liée à leur quantité importante d'hémicelluloses et de lignine par rapport aux espèces pionnières et uniquement à leur quantité d'hémicelluloses par rapport aux hémi-héliophiles. Les espèces d'ombre sont plus rigides (module d'élasticité élevé) que les espèces pionnières car elles ont une quantité plus importante de lignine. Nous n'avons pas pu conclure par rapport aux hémi-héliophiles car la différence entre les deux groupes n'est pas significative. La résistance à la compression axiale des espèces tolérantes à l'ombre est liée à leurs quantités élevées de lignine et d'hémicelluloses. L'anisotropie élevée des espèces pionnières peut être expliquée par des quantités de lignine et d'hémicelluloses faibles par rapport aux espèces d'ombre. Par rapport aux espèces hémi-héliophiles, il semble qu'elle soit liée aux quantités de lignine et d'hémicelluloses faibles et à une quantité d'extractibles plus importante. Bien que nous ayons trouvé un effet significatif du tempérament écologique dans les relations entre la cellulose et les propriétés physico-mécaniques, nous ne pouvons rien déduire sur l'impact de la cellulose dans les différences observées, car il n'y avait aucun effet du tempérament sur la cellulose seule (Tableau 3.14). De plus, les régressions linéaires étaient faibles ($R^2 < 0,5$) sauf pour quelques cas chez les espèces pionnières et tolérantes à l'ombre (Figure 3.22(j, k, l, m et n)).

Tableau 3.15 : Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les propriétés physico-mécaniques et la composition chimique du bois. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1.

Relation entre propriétés physico-mécaniques et composition chimique du bois	ANCOVA non paramétrique	
	p -values et significativité	
	Tempérament écologique	
	Coefficient directeur	Constante
R_T/R_R - Lignine	0.0012 **	0.00122 **
ρ - Extractibles	1.97E-07 "****"	2.63E-07 "****"
σ' - Extractibles	0.00338 "****"	0.00341 "****"
R_R - Cellulose	0.000906 "****"	0.00139 "****"
R_R - Lignine	0.522 "ns"	0.524 "ns"
τ - Cellulose	0.000735 "****"	0.000954 "****"
τ - Lignine	0.06388 "."	0.0699 "."
E - Cellulose	2.9E-06 "****"	3E-06 "****"
E - Lignine	0.000225 "****"	0.000237 "****"
ρ - Cellulose	3.14E-12 "****"	5.77E-12 "****"
ρ - Lignine	0.000135 "****"	0.000134 "****"

Chapitre 3 : Résultats et analyses

ρ - Hémicelluloses	0.0206 "**"	0.0329 "**"
σ' - Cellulose	7.06E-06 "****"	8.9E-06 "****"
σ' - Lignine	0.0560 "."	0.0583 "."
AMF - Lignine	6.11E-07 "****"	2.48E-08 "****"
E_L/ρ - Lignine	9.18E-14 "****"	1.26E-09 "****"
E_L/ρ - Cellulose	2.07E-06 "****"	6.82E-07 "****"
AMF - Cellulose	0.0018 "**"	9.89E-05 "****"
R_T/R_R - Cellulose	0.0084 "**"	3.03E-09 "****"
PSF - Cellulose	0.1966 "ns"	0.0014 "**"
R_R - Hémicelluloses	2.12E-13 "****"	0.344 "ns"
R_T/R_R - Hémicelluloses	1.14E-09 "****"	0.0005 "****"
PSF - Hémicelluloses	0.2207 "ns"	0.0176 "**"
E_L - Hémicelluloses	1.01E-5 "****"	0.0645 "."
τ - Hémicelluloses	2.6E-10 "****"	0.477 "ns"
σ' - Hémicelluloses	2.84E-08 "****"	0.597 "ns"
E_L - Extractibles	0.6454 "ns"	0.0002 "****"
τ - Extractibles	0.0409 "**"	0.0578 "."
AMF - Extractibles	0.0015 "**"	4.51E-07 "****"
R_T/R_R - Extractibles	7.35E-06 "****"	1.24E-05 "****"
R_T - Extractibles	0.1194 "ns"	2.26E-09 "****"
R_R - Extractibles	3.55E-05 "****"	0.249 "ns"

3.8 Relation entre composition chimique et caractéristiques anatomiques

Le but de cette partie est de vérifier un potentiel effet du tempérament écologique dans les relations entre la composition chimique et l'anatomie du bois afin si possible de pouvoir expliquer l'une par l'autre.

Tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn

Les résultats des tests de Kruskal-Wallis et de Dunn (Tableau 3.16) ci-dessous montrent que malgré une réduction du nombre d'échantillons du jeu de données (n=90), on a toujours les mêmes propriétés significatives et non significatives qu'avec un jeu de données de n=368 échantillons pour la composition chimique.

Tableau 3.16 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur la composition chimique et les caractéristiques anatomiques (n=90). ns : non significatif ; significativité des p-values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1. 'P' pionnier ; 'HH' hémihéliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

Propriétés	Test de Kruskal-Wallis	Test de Dunn		
	p-values	P-HH	HH-TO	TO-P
LF (mm)	1.69E-01 "ns"	ns	ns	ns
Cellulose	4.07E-01 "ns"	ns	ns	ns
nb_vais/mm2	2.35E-06 "****"	***	*	**
diam_tang_moy_vais (mm)	5.67E-06 "****"	***	***	ns
diam_rad_moy_vais (mm)	1.09E-06 "****"	***	***	ns
diam_moy_vais (mm)	1.41E-06 "****"	***	***	ns
epais_tang_moy_pari (μm)	4.74E-05 "****"	ns	**	***
epais_rad_moy_pari (μm)	3.47E-06 "****"	ns	**	***
epais_moy_pari (μm)	1.35E-05 "****"	ns	**	***
Extractibles	2.87E-02 "**"	*	ns	.
Hémicelluloses	1.39E-04 "****"	.	*	***
Lignine	7.66E-05 "****"	*	.	***

Corrélations entre les propriétés

La Figure 3.23 présente les corrélations entre la composition chimique et l'anatomie du bois et la significativité de ces corrélations.

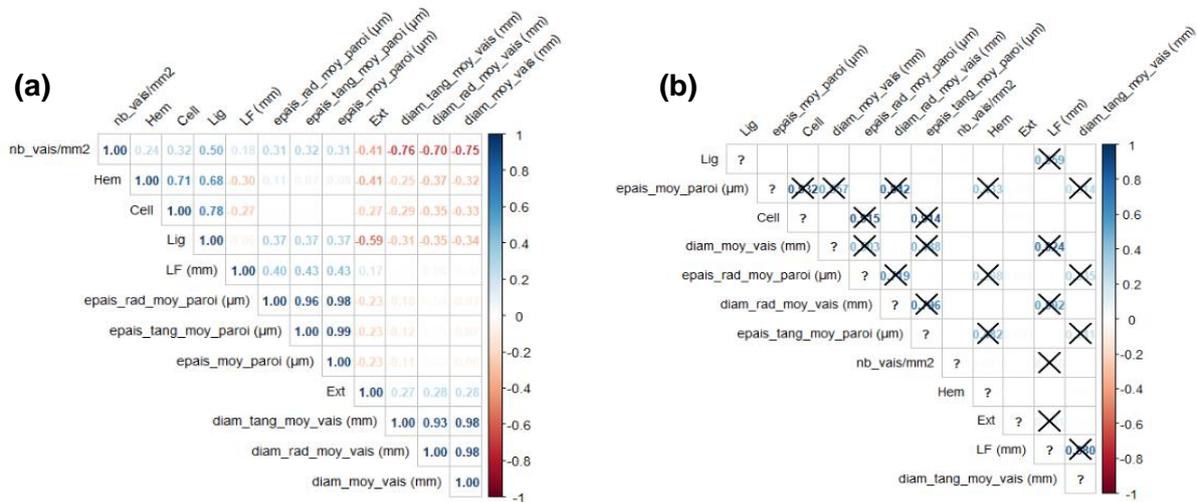


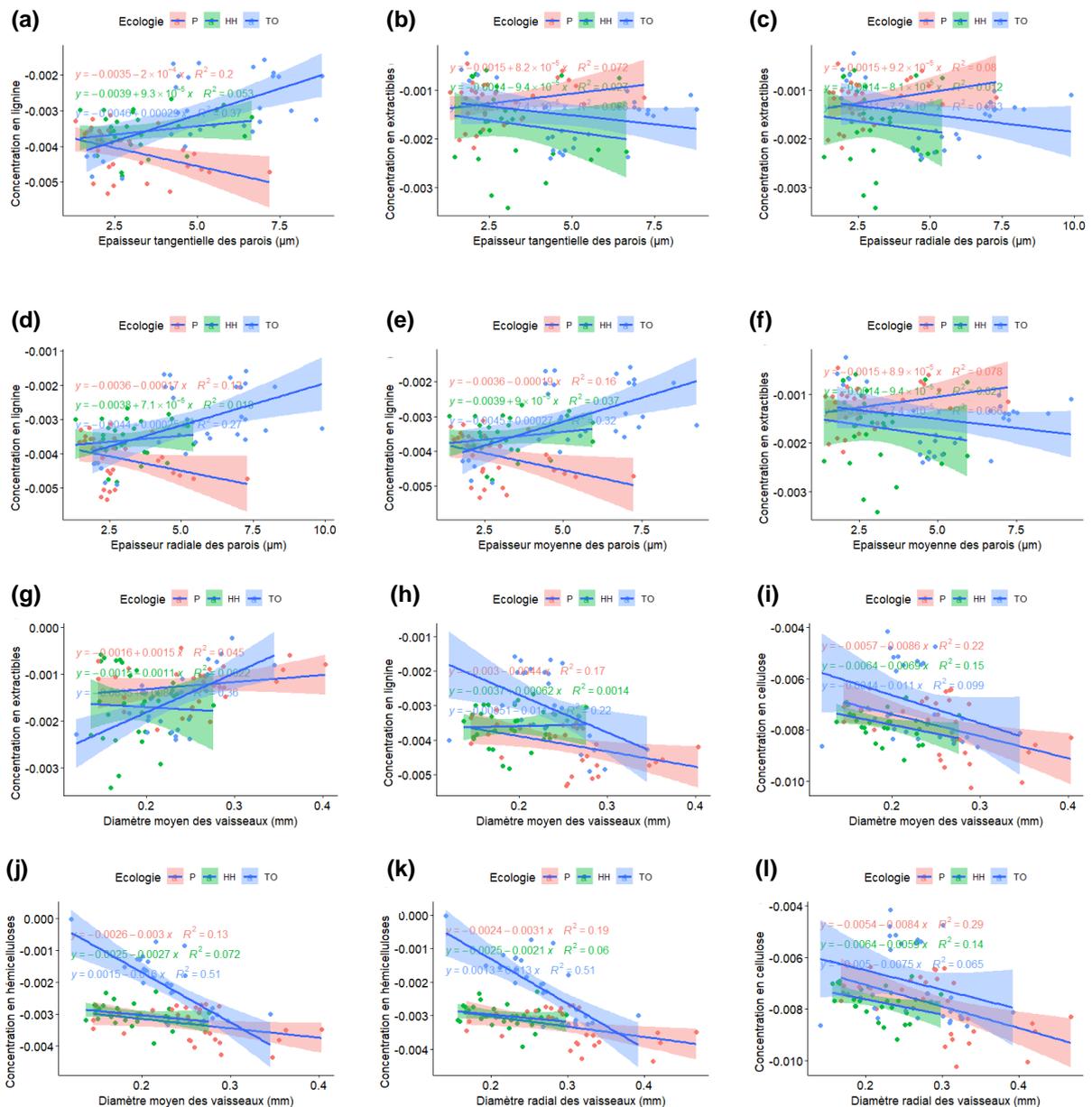
Figure 3.23 : Corrélogrammes des propriétés entre la composition chimique et l'anatomie du bois. (a) : Corrélations rho de Spearman. Les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge. Les corrélations fortes correspondent à $\rho \geq +0.5$ et $\rho \leq -0.5$. (b) : Significativité des corrélations rho de Spearman avec pour seuil de significativité 0.05. Les p-values non significatives sont marquées par une croix.

Les résultats de la Figure 3.23(a) indiquent des corrélations négatives faibles entre la quantité d'extractibles et le nombre de vaisseaux, la quantité d'extractibles et les différentes épaisseurs

Chapitre 3 : Résultats et analyses

des parois, entre les différents diamètres des vaisseaux et les quantités de lignine, cellulose et hémicelluloses et enfin entre les quantités d'hémicelluloses et de cellulose et les longueurs des fibres. Des corrélations positives faibles sont observées entre la quantité d'extractibles et les différents diamètres des vaisseaux, entre les quantités de lignine et d'hémicelluloses et les épaisseurs de paroi, entre le nombre des vaisseaux et les quantités de cellulose et d'hémicelluloses (Figure 3.23(a)). L'unique corrélation positive forte est observée entre le nombre des vaisseaux et la quantité de lignine. D'après la Figure 3.23(b), toutes ces corrélations sont significatives à l'exception des corrélations positives faibles entre la quantité d'hémicelluloses et les différentes épaisseurs des parois.

Analyse de covariance non paramétrique



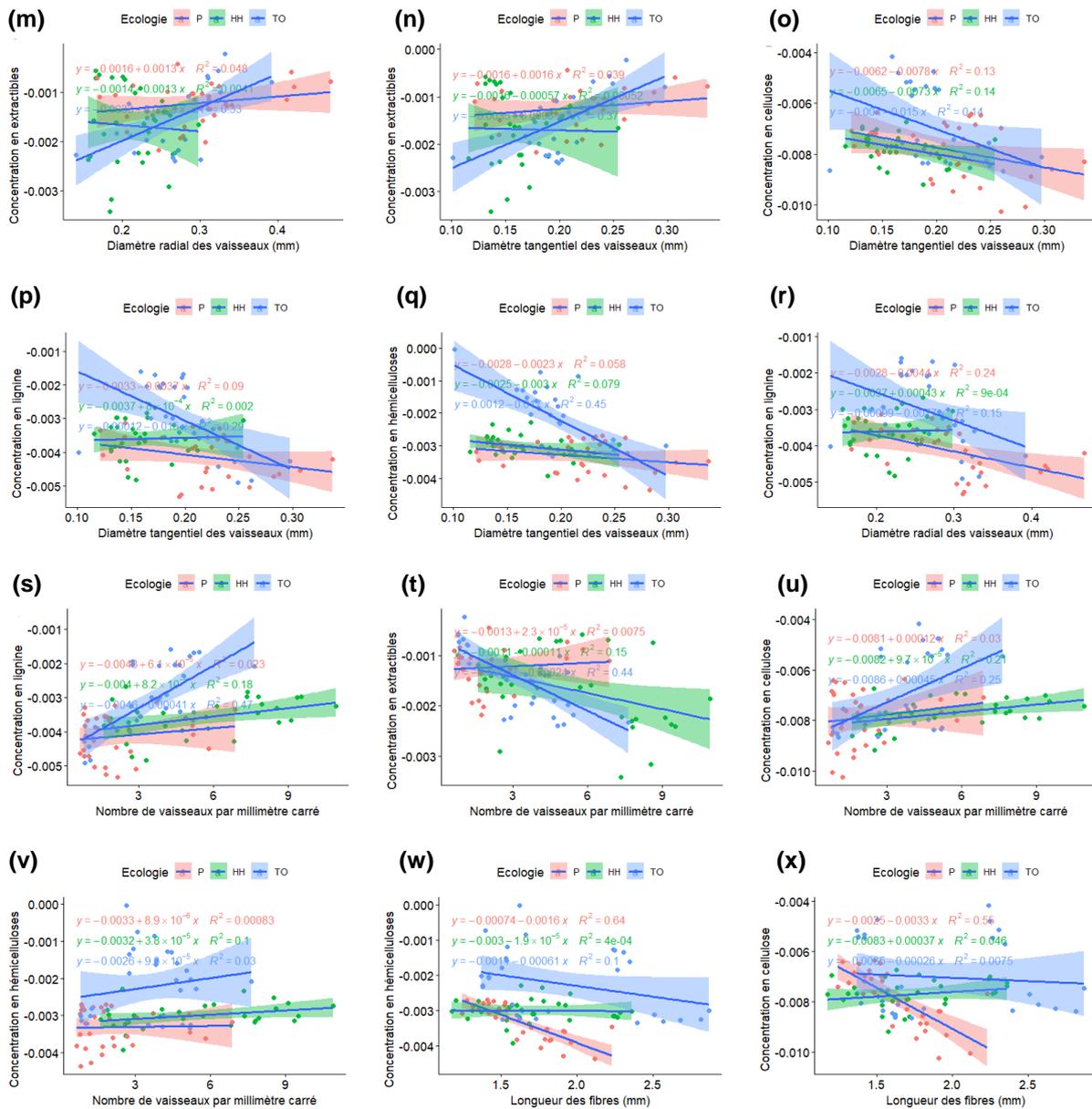


Figure 3.24 : Effet du tempérament écologique sur les relations entre la composition chimique et les caractéristiques anatomiques du bois.

Les résultats de l'analyse de covariance (Tableau 3.17) indiquent une influence positive du tempérament écologique dans les relations entre les caractéristiques anatomique et la composition chimique du bois de façon globale à l'exception des relations entre la concentration en cellulose, le nombre de vaisseaux et le diamètre tangentiel des vaisseaux (Tableau 3.17). Par ailleurs, la plupart des régressions sont faibles ($R^2 < 0,5$) quel que soit le tempérament écologique. Seules les relations entre les diamètres radial et moyen et la concentration en hémicelluloses des espèces tolérantes à l'ombre (Figure 3.24(j et k)) sont fortes ($R^2 > 0,5$) d'une part. En d'autres termes, des diamètres radial et moyen plus grands sont synonyme d'une quantité d'hémicelluloses plus faible chez les espèces d'ombre et inversement. D'autre part, les

Chapitre 3 : Résultats et analyses

relations linéaires entre les longueurs des fibres et les quantités d'hémicelluloses et de cellulose des pionnières sont également fortes ($R^2 > 0,5$). Des fibres plus courtes traduisent des quantités importantes de cellulose et d'hémicelluloses chez les espèces pionnières. Cependant, il n'a pas été possible de déterminer si les arbres de lumière avaient des fibres plus longues ou plus courtes par rapport aux espèces des autres groupes. Il en est de même pour la quantité de cellulose.

Tableau 3.17 : Résultats de l'analyse de covariance non paramétrique entre les caractéristiques anatomiques et la composition chimique du bois. ns : non significatif ; significativité des p -values : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

Relation entre les caractéristiques anatomiques et la composition chimique du bois	ANCOVA non paramétrique	
	p -values et significativité	
	Tempérament écologique	
	Coefficient directeur	Constante
<i>epais_tang_moy_pari</i> - Lignine	1.57E-07 "****"	0.0026 "****"
<i>epais_rad_moy_pari</i> - Lignine	6.19E-06 "****"	0.0045 "****"
<i>epais_moy_pari</i> - Lignine	7.72E-07 "****"	0.0032 "****"
<i>diam_tang_moy_vais</i> - Lignine	0.0264 "****"	3.51E-05 "****"
<i>diam_rad_moy_vais</i> - Lignine	0.1400 "ns"	3.03E-05 "****"
<i>diam_moy_vais</i> - Lignine	0.0582 "."	2.67E-05 "****"
<i>nb_vais/mm²</i> - Lignine	0.0015 "****"	0.0006 "****"
<i>epais_tang_moy_pari</i> - Extractibles	0.0197 "****"	0.0662 "."
<i>epais_rad_moy_pari</i> - Extractibles	0.0191 "****"	0.0712 "."
<i>epais_moy_pari</i> - Extractibles	0.0209 "****"	0.0683 "."
<i>diam_tang_moy_vais</i> - Extractibles	0.0064 "****"	0.1648 "ns"
<i>diam_rad_moy_vais</i> - Extractibles	0.0089 "****"	0.2088 "ns"
<i>diam_moy_vais</i> - Extractibles	0.0049 "****"	0.1967 "ns"
<i>nb_vais/mm²</i> - Extractibles	0.0122 "****"	0.683 "ns"
<i>diam_tang_moy_vais</i> - Cellulose	0.7124 "ns"	0.0679 "."
<i>diam_rad_moy_vais</i> - Cellulose	0.5557 "ns"	0.0205 "****"
<i>diam_moy_vais</i> - Cellulose	0.9371 "ns"	0.0278 "****"
<i>nb_vais/mm²</i> - Cellulose	0.1824 "ns"	0.1486 "ns"
<i>LF</i> - Cellulose	1.96E-05 "****"	0.1634 "ns"
<i>diam_tang_moy_vais</i> - Hémicelluloses	0.0181 "****"	2.22E-05 "****"
<i>diam_rad_moy_vais</i> - Hémicelluloses	0.0698 "."	2.57E-06 "****"
<i>diam_moy_vais</i> - Hémicelluloses	0.0277 "****"	7.09E-06 "****"
<i>nb_vais/mm²</i> - Hémicelluloses	0.2148 "ns"	0.0003 "****"
<i>LF</i> - Hémicelluloses	0.0004 "****"	4.11E-07 "****"

3.9 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons pu mettre en évidence les différents liens existants entre les propriétés physique, mécanique, anatomique et chimique du bois et le tempérament écologique des espèces. Les principaux résultats résumés à la [Figure 3.25](#) ci-dessous indiquent des corrélations significatives dans l'ensemble entre les propriétés mais pas toujours quel que soit

Chapitre 3 : Résultats et analyses

le tempérament écologique. Sur le plan anatomique, les espèces d'ombre présentent des parois des fibres plus épaisses que celles des pionniers et des hémi-héliophiles. Les vaisseaux des pionniers et des tolérants à l'ombre sont plus larges que ceux des hémi-héliophiles. Les hémi-héliophiles ont des vaisseaux plus nombreux que les pionniers et les espèces d'ombre et les espèces d'ombre ont des vaisseaux plus nombreux que les pionniers. D'un point de vue chimique, les concentrations en hémicelluloses, lignine et matières extractibles diffèrent en fonction du tempérament écologique. Les pionniers ont des quantités d'extractibles plus importante que les hémi-héliophiles et il n'y a pas de différence avec les quantités des tolérants à l'ombre. Les quantités de lignine et d'hémicelluloses sont plus importantes chez les espèces d'ombre. Les trois groupes de tempéraments ont statistiquement les mêmes quantités de cellulose. Sur les plans physique et mécanique, des différences de résistances mécaniques, de densité, de rigidité et de stabilité dimensionnelle ont été mises en évidence entre les groupes écologiques. Les valeurs les plus élevées ont été observées chez les espèces tolérantes à l'ombre. Les performances physique et mécanique sont expliquées par les caractéristiques anatomiques et à la composition chimique du bois. Tous ces résultats seront discutés dans le chapitre suivant.

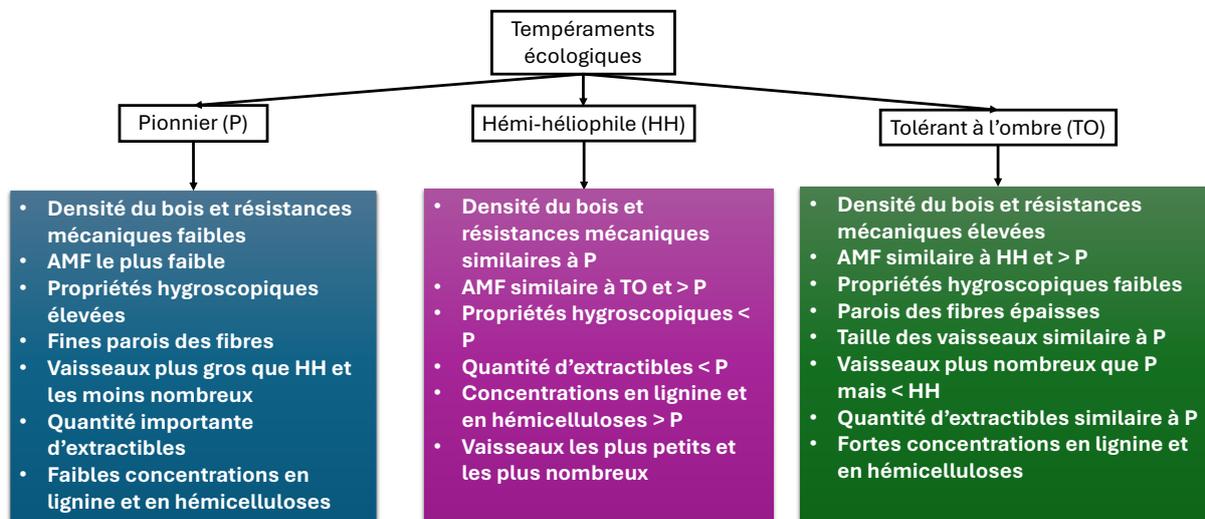


Figure 3.25 : Principaux résultats des espèces en fonction du tempérament écologique. P : pionnier, HH : hémi-héliophile et TO : tolérant à l'ombre.

Chapitre 4

4 Discussion

4.1 Statistiques descriptives et Corrélations entre les propriétés

De façon globale, les coefficients de variation en fonction du tempérament écologiques sont élevés (> 15%) en particulier pour certaines propriétés ou caractéristiques telles que la dureté du bois, l'énergie libérée en flexion dynamique, le nombre de vaisseaux par unité de surface et les épaisseurs de parois. Les dispersions étaient moins importantes par espèce. Des dispersions élevées ont déjà été rapportées dans la littérature en particulier pour les propriétés mécaniques mais pas nécessairement en fonction du tempérament écologique. Par le passé, Wood (1960) avait déjà observé des coefficients de variation élevés allant de 24 à 39% pour la compression perpendiculaire et de 14 à 24% pour les autres propriétés mécaniques. Les coefficients de variation élevés de la compression s'expliquaient par la proportionnalité existante entre les propriétés de résistances mécaniques et une gravité spécifique supérieure à 1 pour laquelle les variations étaient aussi élevées. Une autre raison était l'effet de l'angle des cernes de croissance par rapport à la direction d'application de la force pendant l'essai. Selon Wood (1960), ce paramètre est un facteur important pour cette propriété mais pas pour les autres propriétés de résistances. Dans notre cas, nous avons déterminé la compression parallèle, mais les coefficients de variation étaient tout aussi élevés. Chez certaines éprouvettes on pouvait parfois observer une variation de l'orientation des cernes de croissance. Dans une autre étude de Christoforo et al., (2013), les coefficients de variations des propriétés mécaniques étudiées étaient supérieurs à 10% allant jusqu'à 38%. Une observation similaire a été faite par Wolenski et al., (2020) pour des propriétés de résistances à la compression, à la traction et au cisaillement. Les coefficients de variation de ces dernières étaient supérieurs à 15% dans l'ensemble. Dans une étude de Duan et al., (2016), les coefficients de variation de dix caractères phénotypiques dont la hauteur de l'arbre, le volume du bois, la longueur et le diamètre des trachéides entre autres pour 700 sapins chinois greffés avaient tous dépassés 10%. L'étude de Yin et al., (2017) a révélé des coefficients de variation compris entre 9% et 35% pour des paramètres tels que la longueur et la largeur des fibres, les teneurs en composés chimiques et les caractéristiques de croissance. Les coefficients de variation des longueur et largeur des fibres étaient respectivement de 27% et 21%, ce qui était plus élevé (longueur des fibres) que les résultats de notre étude pour les pionniers et les hémi-héliophiles dont les variations étaient de 16% et 20%. Par contre, pour les tolérants à l'ombre (TO), la variation était assez similaire soit de 26%. Des résultats moins élevés que ceux de Yin et al., (2017) avaient également été observés par Wu et al., (2011), ce qui corrobore nos résultats en ce qui concerne les variations des longueurs des

Chapitre 4 : Discussion

fibres. Yin et al., (2017) a expliqué la différence entre ses résultats et ceux de Wu et al., (2011) par les différentes espèces étudiées, ce qui pourrait également justifier nos différents résultats. Les coefficients de variation des largeurs et des nombres des cernes de croissance chez des espèces boréales du Québec étaient très élevés (entre 40 et 50%) dans une étude de Giroud et al., (2017). D'après Arriaga et al., (2023), la durée de la charge pendant l'essai est un paramètre qui influence les propriétés mécaniques du bois. D'après Kollmann & Côté (1968), les valeurs élevées des coefficients de variation peuvent être expliquées par le mode de rupture du matériau pendant la charge ainsi que par la structure anatomique intrinsèque du bois des espèces dont l'angle du fil et la densité. En effet, pendant nos expérimentations nous avons remarqué que certaines ruptures étaient franches, d'autres esquilleuses et pour d'autres il n'y avait pas de rupture, uniquement des fissures. L'influence de la structure intrinsèque du bois sur la dispersion des propriétés est également soutenue par Trouy (2015). Les valeurs élevées de coefficients de variation obtenus peuvent également être dues à la variabilité intra espèce ainsi qu'au nombre d'arbre différent par tempérament écologique. De plus, la position de l'échantillon dans l'arbre, les conditions de croissances et les paramètres environnementaux des espèces peuvent être à l'origine de cette variabilité et peuvent avoir eu un impact plus prononcé sur certaines propriétés en particulier. Par ailleurs, les coefficients de variation élevés des différents diamètres des vaisseaux (24% pour les P, entre 31% et 38% pour les HH et 19% pour les TO) peuvent être justifiés par le fait que pour certaines éprouvettes, un nombre de vaisseaux plus petits (< 30 vaisseaux) avait été mesuré compte tenu de la surface de la coupe obtenue.

Nous avons observé des corrélations positives fortes et significatives entre la densité du bois et les propriétés mécaniques ainsi qu'entre les propriétés mécaniques de façon générale, ce qui est conforme à la littérature (Fernandes et al., 2017; Takahashi et al., 2023). La seule corrélation avec la densité du bois qui n'était pas forte était celle avec l'énergie libérée en flexion dynamique dans les nouveaux essais. Ces corrélations positives fortes l'étaient également quel que soit le tempérament écologique sauf une fois de plus entre la densité et l'énergie W. Dans d'autres études (Hernandez, 2007; Miyoshi et al., 2018; Özcan & Korkmaz, 2019; J. L. Yang & Evans, 2003), cet effet positif de la densité sur la résistance au cisaillement du bois et sur les propriétés mécaniques de façon générale a également été observé. Ruiz-Aquino et al., (2018) avait observé des corrélations positives entre les propriétés mécaniques du bois à l'état sec et vert et la densité du bois. C'est encore le cas de l'observation faite par Duarte et al., (2020). En fait, les bois les plus denses ont montré les résistances les plus élevées dans cette étude. Lors de nos analyses, nous avons obtenus une forte corrélation négative et significative entre

l'anisotropie et le retrait radial et une corrélation positive et significative entre le retrait radial et la densité ce qui a été confirmé lors des nouveaux essais. La force de la corrélation entre l'anisotropie et le retrait tangentiel, le retrait radial et le retrait tangentiel, l'anisotropie et la densité et le retrait tangentiel et la densité et/ou leur significativité a changé entre la base de données du CIRAD et les nouveaux essais, laissant entrevoir un potentiel effet des espèces étudiées. Cependant, lorsque le nombre d'espèce a été réduit en ne gardant que les espèces identiques à celles étudiées dans les nouveaux essais à une espèce près, les corrélations sont restées les mêmes, remettant ainsi en cause l'effet espèce. Nous ne saurons expliquer ces différences que par la variabilité des propriétés du bois dans l'arbre ainsi que les conditions de croissance des espèces. Les corrélations positives entre la densité et les retraits radial et tangentiel de la base de données du CIRAD sont confirmés par Masserann & Mariaux (1985), Kord et al., (2010), Farsi & Kiaei (2014), Todaro et al., (2018), Ghorbanian Far et al., (2024) et Masoumi & Bond (2024) mais pas par Jankowska et al., (2017). Ces corrélations étaient particulièrement fortes chez les pionniers (retrait radial) et les tolérants à l'ombre (retrait tangentiel) dans la base de données du CIRAD bien qu'il n'y ait pas eu d'influence du tempérament écologique sur la densité et les différents retraits. La corrélation avec le retrait radial était forte quel que soit le groupe écologique lors des nouveaux essais et plus particulièrement chez les pionniers. Cependant, le retrait radial ne différait toujours pas suivant l'écologie. Les corrélations entre la densité et les deux retraits du bois peuvent se justifier par les liens positifs observés entre les retraits et les épaisseurs des parois des fibres, en particulier l'épaisseur radiale (p -value < 0,05). D'après Trouy, (2015), les épaisseurs des parois des fibres sont responsables de la densité du bois. Une corrélation positive a en effet été observée entre la densité et les épaisseurs des parois des fibres. Plusieurs auteurs s'accordent par ailleurs sur le fait que le retrait du bois est affecté par plusieurs traits anatomiques tels que la largeur des rayons, le diamètre des vaisseaux et l'épaisseur des parois des fibres par exemple (Moya et al., 2012; Simpson, 1991; Todaro et al., 2018; Toong et al., 2014). La forte corrélation négative entre l'anisotropie et le retrait radial est confirmée par Masserann & Mariaux (1985) et Messaoudène et al., (2008). Cette corrélation est logique puisque l'anisotropie est définie comme le rapport du retrait tangentiel sur le retrait radial. La forte corrélation positive et significative mise en évidence entre le retrait tangentiel et l'anisotropie lors des nouveaux essais mais pas lors de l'analyse de la base de données du CIRAD est corroborée par Messaoudène et al., (2008). Dans son étude, l'auteur a trouvé des liens entre le retrait tangentiel, l'âge des arbres et la largeur du cerne de croissance d'une part et le retrait radial et la largeur du cerne de croissance d'autre part. La relation positive forte et significative entre les retraits radial et

Chapitre 4 : Discussion

tangentiel de la base de données est soutenue par Masserann & Mariaux (1985). Enfin, la corrélation négative entre la densité et l'anisotropie dans la base de données (p -value $> 0,05$) et les nouveaux essais (p -value $< 0,05$) a également été observée chez Masserann & Mariaux (1985). Elle est liée à l'épaisseur radiale de la paroi car la densité et l'anisotropie sont toutes les deux corrélées à cette dernière (corrélations positive et négative respectivement). Cette corrélation négative était particulièrement forte chez les pionniers dans les nouveaux essais. En d'autres termes, une diminution de la densité chez ces espèces est synonyme d'une instabilité dimensionnelle (forte anisotropie). En effet, les pionniers avaient une faible densité du bois et une forte anisotropie. Étant donné l'importance du PSF comme paramètre lié à la stabilité dimensionnelle et aux performances mécaniques du bois, nous discutons également ces corrélations. Nous avons observé de faibles corrélations (négative et positive) non significatives entre la densité du bois et le PSF. Cette observation est soutenue par Almeida et al., (2020) car la densité est un paramètre constant dépendant uniquement des caractéristiques anatomiques du bois. De plus, nous n'avons observé aucun lien fort entre le PSF et toutes les autres propriétés physico-mécaniques (base de données et nouveaux essais). Les seuls liens significatifs étaient ceux avec le retrait radial, l'anisotropie et le module d'élasticité. La corrélation avec le retrait est appuyée par l'étude de Sekhar & Rajput (1967) dans laquelle l'auteur remarquait que le retrait augmentait linéairement avec le PSF. Dans notre cas, la corrélation était positive mais très faible (inférieure à 0,1). Nos résultats sont en phase avec ceux de Ruiz-Aquino et al., (2018) concernant la significativité de la corrélation avec le module d'élasticité. En fait, l'auteur a trouvé des corrélations positives entre le PSF et les propriétés mécaniques du bois aux états vert et sec. La corrélation négative très faible entre le PSF et l'anisotropie du bois obtenue dans le cadre de ce travail de thèse laissant entendre qu'une augmentation du PSF serait accompagnée d'une diminution de l'anisotropie et donc augmenterait la stabilité dimensionnelle d'un bois n'a pas pu être confirmé de façon claire par la littérature. De plus, ce résultat est aussi en contradiction avec un autre résultat que nous avons obtenu, à savoir que les espèces d'ombre qui avait un PSF plus faible avaient une anisotropie moins élevée et donc étaient plus stables.

L'importance de l'AMF sur les propriétés mécaniques du bois a été souligné dans la bibliographie. Selon Trouy (2015), l'orientation des microfibrilles dans la couche S2 de la paroi cellulaire est responsable de la résistance en tension. Cette orientation (angle des microfibrilles) détermine aussi l'élasticité longitudinale des fibres. D'autres études ont également mis en évidence l'importance de l'AMF sur les propriétés mécaniques du bois (Bossu et al., 2016; De Borst et al., 2012; Donaldson, 2008; Lichtenegger et al., 1999; Read et al., 2011; Ruelle, 2006;

Senft & Bendtsen, 1985). Une étude de Kennedy (1995) a montré qu'une faible densité du bois était associée à des grands AMF dans le bois juvénile et que cela réduisait la résistance et la rigidité. Xu et al., (2011) a soutenu cette observation en remarquant que des AMF élevés étaient liés à une rigidité et une résistance à la traction faibles. Dans l'étude de Gherardi Hein & Tarcísio Lima (2012), des corrélations négatives ont été mises en évidence entre l'AMF, la rigidité du bois et la résistance à la compression dans du bois juvénile d'Eucalyptus. Toutes ces études confirment les corrélations négatives et significatives observées dans cette thèse entre l'AMF, la densité, la rigidité, la compression parallèle et le cisaillement. D'autre part, les faibles valeurs des coefficients de détermination n'ont pas permis d'observer de façon claire l'effet significatif (p -value < 0,05) du tempérament écologique dans la relation entre l'AMF et la rigidité. Par contre, dans une étude de Read et al., (2011), l'auteur a pu mettre en évidence une influence de la croissance sur le lien entre la rigidité et l'AMF. D'après Read et al., (2011), les grands arbres élancés avaient atteint une rigidité élevée en partie grâce à un faible AMF. En d'autres termes, une diminution de l'angle des microfibrilles a entraîné une augmentation de la rigidité chez les espèces à croissance rapide. D'après la bibliographie (Coomes & Grubb, 1998; King, 1991; Morel et al., 2018; Pavlin et al., 2024; Schmitt et al., 2022; Veneklaas & Poorter, 1998), les espèces exigeantes en lumière ou pionnières sont connues pour atteindre les plus grandes hauteurs. D'autre part, la corrélation négative et significative entre l'AMF et le module spécifique n'est pas surprenante. En effet, le module spécifique détermine la rigidité des tissus de la paroi cellulaire du bois et une rigidité élevée est associée à un AMF faible comme l'attestent les études précitées ainsi que nos résultats.

Nous avons par ailleurs observé des corrélations entre les caractéristiques anatomiques des fibres et des vaisseaux des espèces étudiées. Le nombre de vaisseaux par unité de surface était corrélé significativement aux épaisseurs radiale, tangentielle et moyenne des parois des fibres ainsi qu'aux diamètres radial, tangentiel et moyen des vaisseaux. Mais les corrélations étaient fortes uniquement avec les diamètres des vaisseaux. Plus le nombre de vaisseaux augmente et plus leur diamètre devient petit et inversement en particulier chez les espèces pionnières (coefficient de détermination élevé). Ce résultat est corroboré par l'étude de Fichtler & Worbes (2012). Cela semble également logique au regard des résultats de certaines études qui ont montré que les espèces d'ombre ont des vaisseaux plus petits et plus nombreux tandis que les vaisseaux sont moins nombreux et plus gros chez les espèces de lumière (Fan et al., 2012; Ferdous et al., 2023; González-Melo, 2022; Islam et al., 2019; Markesteijn et al., 2011; Poorter et al., 2010). D'autre part, les différents diamètres de vaisseaux et les épaisseurs des parois des

Chapitre 4 : Discussion

fibres étaient corrélés positivement et significativement entre eux et ces corrélations étaient très fortes quel que soit l'écologie. La corrélation entre les épaisseurs des parois a été confirmée par l'étude de Masserann & Mariaux (1985). Dans cette étude, les parois des fibres des espèces étudiées étaient conjointement fines et épaisses. De fortes corrélations positives entre les diamètres radial et tangentiel des vaisseaux avaient aussi été observées par Islam et al., (2018). Nous n'avons pas observé de corrélation significative entre les diamètres des vaisseaux et les épaisseurs des parois des fibres. Enfin, les épaisseurs des parois augmentaient avec les longueurs des fibres, mais ces liaisons n'étaient pas fortes en fonction du tempérament écologique dans nos analyses.

Les composés chimiques du bois étaient tous fortement corrélés entre eux et de façon significative. Lorsque la concentration de matières extractibles augmente, celles en cellulose, hémicelluloses et lignine diminuent indépendamment du tempérament écologique de l'espèce. De plus, lorsque la concentration en hémicelluloses des espèces pionnières (P) augmente, leurs concentrations en lignine et en cellulose augmentent elles aussi. Enfin, pour les espèces pionnières (P) et tolérantes à l'ombre (TO) lorsque la concentration en cellulose augmente, celle en lignine augmente aussi. Ces résultats sont confortés par Ona et al., (1997) qui a observé qu'un taux de lignine élevé était associé à une augmentation d'hémicellulose de type xylane. De plus, Huang et al., (2015) a observé chez des feuillus et des résineux une forte corrélation positive entre la lignine et les hémicelluloses.

Pour finir, nous discutons des corrélations entre les caractéristiques anatomiques du bois et ses composés chimiques. Les études sur ces relations demeurent rares en particulier en fonction de l'écologie. Ces corrélations étaient de manière générale très faibles comme l'avait déjà remarqué Mosedale et al., (1998) entre les extractibles et les caractéristiques anatomiques. Seul le nombre de vaisseaux par unité de surface et la concentration en lignine avaient une liaison significative. Ce lien avait déjà été observé par Luostarinen & Hakkarainen (2019) pour des arbres poussant sur des sites riches en minéraux. C'était l'inverse pour les arbres poussant sur des sites plutôt pauvres en nutriments. Malgré les faibles corrélations observées dans cette thèse, la lignine avait des liaisons significatives avec toutes les caractéristiques anatomiques sauf la longueur des fibres. Dans l'étude de Luostarinen & Hakkarainen (2019), une augmentation des parois des fibres entraînait une diminution de la lignine et des extractibles. Ceci était vrai pour les extractibles mais pas pour la lignine dans notre cas. Les liaisons entre les diamètres radial, tangentiel et moyen des vaisseaux et tous les composés chimiques et les

longueurs des fibres et la cellulose et les hémicelluloses étaient également significatives. La corrélation entre les longueurs des fibres et la cellulose était très faible de manière générale mais le coefficient de détermination était fort uniquement chez les pionniers. Pour ces espèces, une diminution de la concentration en cellulose serait liée à des fibres plus longues. Nous n'avons pas trouvé d'explication à cette observation dans la bibliographie. Par ailleurs, une diminution de la taille des différents diamètres des vaisseaux est assimilée à des augmentations de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine tandis que les extractibles diminuent. Ceci était vrai uniquement pour la lignine chez Luostarinen & Hakkarainen (2019). Par contre, en ce qui concerne les extractibles, nos résultats sont opposés. Sur les sites pauvres en nutriments, il n'y avait pas de corrélation significative entre le diamètre des vaisseaux et la chimie (Luostarinen & Hakkarainen, 2019). Les résultats de Luostarinen & Hakkarainen (2019) montrent que les relations entre la chimie et les caractéristiques anatomiques du bois dépendent du sol. Les corrélations obtenues dans le cadre de ce travail de thèse ont pu être influencées par les caractéristiques des sols sur lesquels les espèces étudiées ont poussé.

4.2 Anatomie du bois en lien avec le tempérament écologique des arbres

Les caractéristiques anatomiques (fibres et vaisseaux) de 25 espèces tropicales matures ont été déterminées et comparées entre tempéraments écologiques différents. Les résultats de cette thèse suggèrent que les espèces tolérantes à l'ombre ont des parois des fibres très épaisses comparées aux pionnières et aux héliophiles. Elles ont également des vaisseaux plus nombreux que les pionnières mais ce sont les héliophiles qui ont montré la plus grande quantité de vaisseaux par unité de surface. Les diamètres radial, tangentiel et moyen des vaisseaux des héliophiles sont plus petits que ceux des pionniers et des espèces d'ombre. Il n'y avait pas de différence significative entre les tailles des diamètres des vaisseaux des espèces exigeantes en lumière (P) et les espèces d'ombre (TO). Comme cela a déjà été mentionné, les études comparant les caractéristiques anatomiques du bois d'espèces tropicales appartenant à des groupes écologiques différents, sont rares. Toutefois, nous avons pu corroborer nos résultats avec ceux d'une étude récente de González-Melo (2022), dans laquelle il a été démontré que les espèces d'ombre ont des parois très épaisses qui favorisent la défense contre les pathogènes et les herbivores comparées aux espèces exigeantes en lumière qui ont des parois plus fines favorisant la croissance. En effet, dans l'étude de Gianoli et al., (2023), les dégâts causés par l'herbivorie étaient plus importants chez les espèces exigeantes en lumière car celles-ci présentent des mécanismes de défense plus faibles. Les espèces exigeantes en lumière avaient en outre des vaisseaux plus larges que ceux des espèces d'ombre chez

Chapitre 4 : Discussion

González-Melo (2022) et cela est soutenu par d'autres auteurs dans la bibliographie. En effet, des vaisseaux plus larges ont été positivement liés aux taux de croissance (Fan et al., 2012; Poorter et al., 2010; Russo et al., 2010) et des taux de croissance élevés ont été associés aux espèces exigeantes en lumière (Ferdous et al., 2023; Pavlin et al., 2024; Petrovska et al., 2022; Schmitt et al., 2022; Veneklaas & Poorter, 1998). De plus, d'après Pittermann & Sperry (2006) et Charra-Vaskou et al., (2016), les espèces demandeuses de lumière sont plus sensibles à l'embolie en raison de leurs larges vaisseaux. Plus les vaisseaux sont gros et plus la conductivité hydraulique est efficace mais les risques de défaillance hydraulique sont élevés (Ferdous et al., 2023; Hacke et al., 2006; Sperry et al., 2006; Tyree & Zimmermann, 2013). La vulnérabilité aux défaillances hydrauliques induites par la cavitation des espèces exigeantes en lumière a été démontré (Fan et al., 2012; Ferdous et al., 2023; González-Melo, 2022; Jucker et al., 2014; Pratt et al., 2007; Searson et al., 2004) et s'explique entre autres par la hauteur plus élevée de leurs arbres (Ferdous et al., 2023). En effet, d'après Carrer et al., (2015), Kotowska et al., (2015) et Olson et al., (2014), (2018) la conductivité hydraulique diminue le long de la hauteur de l'arbre. Les résultats relatifs à la taille des vaisseaux entre les tempéraments écologiques des études précitées sont en phase avec nos résultats dans une moindre mesure. En effet, les espèces hémi-héliophiles c'est-à-dire moins exigeantes en lumière et pouvant tolérer l'ombre pendant un certain temps, ont montré des vaisseaux de taille plus petite que les espèces exigeantes en lumière (P). Toutefois, bien que n'ayant pas trouvé de référence dans la bibliographie, il est surprenant que les vaisseaux des espèces tolérantes à l'ombre aient été plus larges que ceux des hémi-héliophiles traduisant ainsi une conductivité hydraulique plus efficace mais une sécurité plus faible d'une part et qu'ils ne soient pas statistiquement différents de ceux des espèces exigeantes en lumière (P) d'autre part. Ces résultats relativement contrastés peuvent être dus aux variations radiale et longitudinale de la taille des vaisseaux à l'intérieur de l'arbre rapportées par Zach et al., (2010), Rosell et al., (2017) et Olson et al., (2018). En effet, compte tenu de la difficulté d'obtention des coupes anatomiques, certains arbres comptaient un nombre d'échantillons réduit et ne présentaient pas nécessairement de variabilité radiale représentative de l'arbre. D'autre part, le nombre plus important de vaisseaux chez les espèces d'ombre (TO) par rapport aux espèces exigeantes en lumière (P) observé dans notre travail a également été signalé par plusieurs auteurs (de Lima Vieira et al., 2021; Ferdous et al., 2023; Islam et al., 2019; Markesteijn et al., 2011; Poorter et al., 2010). D'après Fan et al., (2012), la sécurité contre l'embolie est assurée par des vaisseaux plus étroits et plus nombreux et les espèces tolérantes à l'ombre ont à plusieurs reprises été associées à une résistance élevée à la sécheresse (Adler et al., 2014; Guillemot et al., 2022; Jucker et al., 2014; Rüger et al., 2020). Par ailleurs, les espèces

hémi-héliophiles de notre étude se caractérisent également par des nombreux vaisseaux et plus nombreux que ceux des espèces tolérantes à l'ombre. Ainsi, les diamètres des vaisseaux plus étroits et plus nombreux observés dans cette thèse chez les hémi-héliophiles confèrent à ces dernières une sécurité plus grande contre l'embolie par rapport aux espèces tolérantes à l'ombre. Il est nécessaire que d'autres études puissent confirmer ce résultat avant de l'admettre de façon définitive. Il est par ailleurs intéressant de souligner que contrairement à González-Melo (2022), la plupart des caractéristiques anatomiques des bois (adultes) mesurés à l'exception des longueurs des fibres dans cette thèse diffèrent de manière significative entre les tempéraments écologiques.

4.3 Composition chimique du bois en fonction du tempérament écologique des arbres

Les caractéristiques issues de la spectroscopie proche infrarouge de 25 espèces tropicales du Gabon appartenant à trois tempéraments écologiques (pionnier, hémi-héliophile et tolérant à l'ombre) ont pu être déterminées. Les résultats obtenus montrent qu'il existe des différences chimiques entre les trois profils écologiques uniquement pour la lignine, les hémicelluloses et les extractibles. La quantité de cellulose est statistiquement la même entre les trois groupes. Les espèces tolérantes à l'ombre et hémi-héliophiles ont des concentrations en lignine plus importantes que les espèces pionnières. La quantité d'hémicelluloses est la plus importante chez les espèces d'ombre. Les études de Novaes et al., (2010) et Liu et al., (2019) corroborent ces observations. Dans la première étude, la lignine a été réduite de 10% chez les arbres à croissance rapide par rapport aux arbres à croissance lente. Dans la plupart des études, la croissance rapide a toujours été associée aux espèces pionnières (King, 1991; Morel et al., 2018; Schmitt et al., 2022). La corrélation négative entre la croissance et la teneur en lignine observée par Novaes et al., (2010) a été considérée comme une compétition pour l'allocation de carbone à la lignine par rapport à l'allocation de carbone aux composés cellulosiques (cellulose et hémicellulose). Dans la deuxième étude, la variété tolérante à l'ombre de la plante de soja avait une teneur en lignine plus élevée que les autres variétés moins tolérantes. D'après Ranade et al., (2022), la lumière stimule la synthèse de la lignine tandis que l'ombre entraîne sa diminution chez la plupart des angiospermes. En revanche, celui-ci a observé que le pin sylvestre une espèce tolérante à l'ombre présente une augmentation de la synthèse de la lignine. Le fait que les espèces d'ombre soient les plus exposées aux risques d'attaques des pathogènes pourraient favoriser chez elles une augmentation de la synthèse de la lignine. Ce qui justifierait les résultats observés dans ces précédentes études ainsi que dans la nôtre. Dans une étude de Hussain et al.,

Chapitre 4 : Discussion

(2019), celui-ci a montré que des arbres soumis à un stress d'ombrage voient leurs teneurs en lignine et en cellulose réduites. En fait, selon Hussain et al., (2019) la faible exposition à la lumière de certains arbres peut entraîner une réduction de sucres qui pourrait affecter des substrats responsables de la synthèse de la lignine. Cela est liée à la diminution de la photosynthèse lors d'une faible exposition lumineuse (Hussain et al., 2019). L'étude de Cuzzuol et al., (2022) a en outre mis en évidence que le déficit de pression et de température (0,4 KPa et 19,8°C par exemple) diminue les concentrations en cellulose et lignine d'arbre tolérant à l'ombre et augmente les concentrations en hémicelluloses d'arbre demandeur de lumière. Pour Cuzzuol et al., (2022), les conditions environnementales (pression et température) ont plus d'influence sur les arbres tolérants à l'ombre et sur leurs hémicelluloses en particulier. Par ailleurs, des études de Niinemets & Kull (1998) et Cuzzuol et al., (2020) rapportent qu'une exposition aux rayons ultra-violet B (UV-B) augmente le taux de lignine au détriment du taux d'hémicelluloses chez les arbres de lumière. Toutefois, ces UV-B n'auraient aucun effet sur le taux de cellulose de ces mêmes arbres et sur les composés chimiques des arbres d'ombre. Les résultats de ces différents travaux sont en désaccord apparent avec nos résultats. Il semble en effet au regard des résultats des études précitées qu'il y aurait un effet des conditions de croissance ou environnementales (exposition aux UV, stress d'ombrage, température et pression par exemple) sur l'augmentation ou la réduction des polymères du bois en particulier chez les espèces d'ombre. Cependant, les espèces dans notre étude n'ont été soumises à aucune contrainte environnementale durant les essais, ce qui rend la comparaison avec ces travaux difficile. La quantité plus élevée de lignine confèrent aux espèces d'ombre et hémi-héliophiles de notre étude une rigidité élevée de leurs parois cellulaires ainsi qu'une résistance accrue contre les attaques biologiques en particulier celle des microorganismes (Trouy, 2015). D'autre part, les espèces pionnières apparaissent avec des quantités d'extractibles plus importantes que les espèces hémi-héliophiles mais pas différente de celle des espèces d'ombre. Ces résultats sont un peu surprenants, surtout la différence non-significative entre les extractibles des pionniers et des tolérants à l'ombre. Les extractibles influencent avec la lignine (Aloui et al., 2020) la couleur et l'odeur du bois (Imamura, 1989; Stevanovic & Perrin, 2009). Nous avons observé que les échantillons des espèces d'ombre (TO) étaient plus foncés que ceux des pionniers (P). Le résultat auquel nous nous attendions était plutôt une plus faible quantité d'extraits chez les espèces pionnières. L'étude d'Aloui et al., (2020) a d'ailleurs mis en évidence que les bois les plus affectés par le rayonnement solaire (produit par quatre lampes) avaient une quantité d'extraits faible. Les espèces pionnières sont familières des environnements très lumineux. De plus, Gianoli et al., (2023) a remarqué que les dégâts causés

par les attaques des herbivores étaient plus importants chez les espèces de lumière. En d'autres termes, les espèces exigeantes en lumière ou pionnières présentent des mécanismes de défense plus faibles. Cependant, les teneurs en extractibles sont dépendant de plusieurs facteurs tels que la position dans l'arbre, la vitesse de croissance de l'arbre, l'origine géographique, l'humidité, la température, la lumière, la génétique et la saison (Aloui et al., 2020; Ouaar et al., 2022; Stevanovic & Perrin, 2009). Leur variabilité en fonction du tempérament écologique n'est donc pas aussi évidente. Le rôle des extractibles dans la protection du bois à la fois dans l'arbre vivant et dans les produits du bois contre les attaques des champignons, des insectes et des pourritures est d'une grande importance (Hillis, 1971; Imamura, 1989). En considérant uniquement les résultats des matières extractibles, on peut déduire que les espèces pionnières (P) et tolérantes à l'ombre (TO) de notre étude présentent de meilleures défenses contre les diverses attaques de leur bois. Bien que ce soit moins utile pour ce travail de thèse, nous discutons de la présence d'eau en proportion non négligeable dans les spectres obtenus. Dans la bibliographie, plusieurs études (Tsuchikawa & Tsutsumi, 1998; Ozaki et al., 2001; Workman & Weyer, 2008; Schwanninger et al., 2011; Yang et al., 2014) ont mis en évidence la présence d'eau dans les spectres. D'après Schwanninger et al., (2011) par exemple, l'eau libre et l'eau adsorbée contribuent fréquemment aux spectres du bois et peut difficilement être évité. Tsuchikawa & Tsutsumi (1998) ont pour leur part mis en évidence la présence d'eau adsorbée et d'eau condensée par capillarité dans les spectres analysés. Pour ces auteurs, la présence d'eau condensée serait liée à la distribution de la taille des pores dans la paroi cellulaire. Selon eux, cette eau peut exister dans les pores de diamètre $\approx 3,5$ nm. Quel que soit le tempérament écologique des espèces étudiées dans cette thèse, celles-ci ont présentées des diamètres des vaisseaux de très loin supérieurs à 3,5 nm (de l'ordre de 160 à 300 μm). Les échantillons ont par ailleurs été stabilisés dans une chambre climatique à une humidité théorique de 12% (HR = 65% et T = 20°C) pendant 2 à 8 semaines. Toutefois, l'expérience a montré et cela a été confirmé par la bibliographie (Asseko Ella et al., 2024), qu'à cette humidité théorique de stabilisation, chaque espèce présente une humidité de stabilisation réelle qui lui est propre, ce qui explique en grande partie la présence du pic de l'eau dans les spectres.

4.4 Propriétés physico-mécaniques et relations avec l'anatomie et la composition chimique du bois en fonction du tempérament écologique

Nos résultats d'analyses ont montré que les espèces d'ombre (TO) ont de meilleures résistances mécaniques (module d'élasticité et cisaillement en particulier), une densité de bois plus élevée, une bonne stabilité dimensionnelle (retrait, anisotropie et PSF faibles), un module spécifique

Chapitre 4 : Discussion

moins élevé mais un AMF légèrement supérieur à celui des espèces exigeantes en lumière (P). Les propriétés mécaniques des espèces tolérantes à l'ombre étaient de façon générale plus élevées que celles des pionnières. Il y avait peu de différence entre les propriétés des hémihéliophiles et des tolérantes à l'ombre et les propriétés des hémihéliophiles et des pionnières. Les études en accord avec les résultats de cette thèse concernant une densité de bois plus élevée chez les espèces d'ombre par rapport aux espèces exigeantes en lumière sont nombreuses (González-Melo, 2022; Hoerber et al., 2014; Lawton, 1984; Lehnebach et al., 2019; Muller-Landau, 2004; Osunkoya et al., 2007; Poorter et al., 2012; Rüger et al., 2012; Rungwattana & Hietz, 2018). D'après González-Melo (2022), la limitation en CO₂ du sous-étage ombragé des forêts favorise des tissus de tiges plus denses qui permettent de réduire le risque de dommages physiques (par exemple des chablis) ou d'attaques de pathogènes et d'herbivores auxquels les arbres de ce milieu sont régulièrement confrontés. Toutefois, des auteurs ont souligné le fait que certaines espèces exigeantes en lumière (P) peuvent également avoir des densités de bois élevées. D'après Van Gelder et al., (2006), les arbres pionniers de grande taille auraient une durée de vie plus longue et seraient contraints d'investir dans un bois plus dense et plus rigide pour pouvoir persister dans la canopée qui se referme. Cette hypothèse est soutenue par Hietz et al., (2013), qui a observé qu'à des diamètres de tiges plus importants, les espèces demandeuses de lumière avaient tendance à avoir un bois plus dense. En outre, les grands arbres des espèces d'ombre ont produit du bois plus léger probablement parce que leur croissance en hauteur avait augmenté (Hietz et al., 2013; Woodcock & Shier, 2002). Les résultats de ces études expliquent les résultats de la base de données du CIRAD. En effet, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre la densité du bois des pionniers et des tolérants à l'ombre. De plus, en termes de moyennes, celles-ci étaient relativement élevées. D'autre part, nous avons remarqué que certaines espèces pionnières individuellement (base de données du CIRAD et nouveaux essais) avaient des densités de bois plus élevées que d'autres espèces d'ombre. Par ailleurs, la densité du bois est principalement liée aux caractéristiques des fibres et des vaisseaux comme le rapportent plusieurs auteurs (Fujiwara, 1992; González-Melo, 2022; Kollmann & Côté, 1968; Migneault et al., 2008; Toong et al., 2014; Trouy, 2015). Les corrélations obtenues dans cette thèse sont en accord avec ces derniers. En effet, nous avons pu observer de fortes corrélations positives et significatives entre la densité, le nombre de vaisseaux par unité de surface et les différentes épaisseurs des parois d'une part et de faibles corrélations négatives et significatives entre la densité et les diamètres des vaisseaux d'autre part. Il n'y avait pas de corrélation avec les longueurs des fibres. Toutefois, une densité plus faible a été associée à une teneur en lignine réduite chez Kennedy (1995) et cela est en accord

avec la très forte corrélation positive et significative que nous avons observé entre ces deux variables quel que soit le tempérament. L'absence de corrélation avec les longueurs des fibres a déjà été prouvé dans la bibliographie (Le Baillif & Oksman, 2006; Yam et al., 1990). Les plus fortes corrélations ont été enregistrées entre la densité et les épaisseurs des parois. Nos résultats sont par ailleurs corroborés par l'étude de Cooley et al., (2004) qui a travaillé sur 14 espèces de monocotylédones appartenant à six familles botaniques différentes. Dans cette étude, les espèces avec un module d'élasticité et un module de rupture élevés indiquant une plus grande résistance par unité de surface à la flexion et à la rupture avaient tendance à être tolérantes à l'ombre. Dans une autre étude, Alvarez-clare (2005) a observé que les troncs des espèces d'ombre (TO) étaient plus résistants que ceux des espèces exigeantes en lumière à travers des valeurs plus élevées du module d'élasticité et de la résistance à la rupture. Selon Alvarez-clare (2005), les résistances mécaniques observées étaient corrélées au pourcentage de cellulose mais pas de lignine. Ce qui est partiellement cohérent avec nos observations. Dans notre cas, de fortes corrélations positives et significatives ont été mises en évidence entre les propriétés mécaniques et les concentrations en cellulose et en lignine, mais les liens les plus forts ont été enregistrés avec la lignine, ce qui confirme que la lignine joue un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques. De plus, la concentration en lignine était significativement différente entre les tempéraments écologiques. Par contre, pour la cellulose, il n'a pas été possible de déterminer de quelle manière celle-ci était répartit suivant les différents tempéraments. Le lien entre la lignine et les propriétés mécaniques a été confirmé par certains auteurs (De Borst et al., 2012; Fournier et al., 2013; Trouy, 2015; Voelker et al., 2011). Dans l'étude de Voelker et al., (2011) par exemple, des réductions de lignine ont entraîné des pertes en termes de résistance et de rigidité du bois chez le peuplier. L'étude de Van Gelder et al., (2006) confirme également nos résultats mécaniques en ce sens que dans cette dernière, la résistance à la compression et le module de rupture (MOR) étaient plus élevés chez les espèces d'ombre comparer aux espèces pionnières. De plus, elles (TO) avaient une densité de bois plus élevée. Dans cette étude, les différentes propriétés ont été reliées à des traits morphologiques et pas anatomiques tel que la stature adulte de l'arbre par exemple. Dans une autre étude de Alvarez-Clare & Kitajima (2007), les espèces tolérantes à l'ombre avaient des tiges avec un module d'élasticité, une ténacité et une densité des tissus plus élevés que des espèces moins tolérantes à l'ombre. Une étude plus récente (Zue Ondo et al., 2021) a évalué les propriétés (densité, retraits, AMF et PSF) de deux espèces tropicales du Gabon à savoir *Guibourtia tessmannii* (hémi-tolérante) et *Aucoumea klaineana* (pionnière). Dans cette étude, l'espèce pionnière avait une densité de bois significativement plus faible que l'espèce hémi tolérante, ce qui était également le cas dans

Chapitre 4 : Discussion

notre travail pour ces deux espèces en particulier. Cependant, les résultats par tempérament écologique de cette thèse n'ont montré aucune différence significative entre la densité des hémihéliophiles (HH) et des pionnières (P). Par ailleurs, l'AMF, le retrait tangentiel et le PSF de l'espèce pionnière étaient supérieurs à ceux de l'espèce hémihéliophile (Zue Ondo et al., 2021). Concernant l'AMF, nous n'avons pas pu dans notre travail (analyse de la base de données du CIRAD) directement mesurer cette propriété pour ces deux espèces mais uniquement lors de la nouvelle campagne d'essais pour d'autres espèces. Toutefois, le module spécifique (E/ρ) a pu être utilisé comme indicateur de l'AMF tel qu'indiqué dans la bibliographie (Thibaut & Gril, 2021). D'après les résultats obtenus dans la base de données du CIRAD, les modules spécifiques de ces deux espèces sont relativement égaux. Les résultats de l'AMF par tempérament diffèrent de ceux obtenus dans l'étude de Zue Ondo et al., (2021). Dans notre cas, l'AMF des espèces hémihéliophiles était légèrement supérieur à l'AMF des pionniers. S'agissant du retrait tangentiel, dans cette même étude, l'espèce pionnière présentait un retrait plus élevé ce qui est en accord avec les résultats par tempérament que nous avons obtenus, mais pas avec les résultats individuels pour ces deux espèces. La différence entre le résultat (retrait tangentiel) obtenu par Zue Ondo et al., (2021) et nos résultats pour ces espèces en particulier peut s'expliquer par les caractéristiques du sol des différentes zones géographiques où elles ont été prélevées ainsi que les conditions de croissance dans lesquelles elles se sont développées (Donaldson, 2008; Trouy, 2015). De plus, le nombre d'arbres par espèce entre 4 pour *Aucoumea klaineana* et 5 pour *Guibourtia tessmannii* dans Zue Ondo et al., (2021) contre 13 pour *Aucoumea klaineana* et 2 pour *Guibourtia tessmannii* dans la base de données du CIRAD ainsi que la position radiale de chaque échantillon dans l'arbre peuvent permettre d'expliquer les différences observées. Enfin, le PSF de l'espèce pionnière était plus élevé que celui de l'espèce hémihéliophile. L'observation a été la même individuellement mais pas par tempérament écologique de façon générale. Il n'a été trouvé aucune différence significative entre les PSF des espèces pionnières et hémihéliophiles dans notre travail. Toutes les différences observées entre les résultats par espèce et par tempérament écologique (densité, AMF et retrait tangentiel) dans cette thèse et avec le travail de Zue Ondo et al., (2021), peuvent être justifiées par le nombre différent d'espèce par tempérament, par un nombre différent d'échantillons par espèce, par la position radiale des échantillons dans le plateau originel ainsi que par les conditions environnementales. Nous n'avons trouvé aucune étude comparant l'anisotropie et le module spécifique d'espèces appartenant à des groupes écologiques différents dans la littérature ou du moins celles-ci sont rares. Par ailleurs, nous avons pu observer dans cette thèse que l'AMF des espèces hémihéliophiles et des tolérants à l'ombre était légèrement supérieur à l'AMF des

pionniers. Par contre, leur module spécifique était inférieur à celui des espèces pionnières. Ces deux observations sont cohérentes car le module spécifique détermine la rigidité de la paroi cellulaire et un AMF élevé correspond à une rigidité plus faible. Cela est en plus confirmé par la forte corrélation négative observée entre les deux propriétés (§4.1). Outre les concentrations en cellulose et en lignine, les variations des propriétés mécaniques observées entre les tempéraments écologiques étaient liées aux concentrations en hémicelluloses et en matières extractibles ainsi qu'aux caractéristiques des fibres et des vaisseaux des espèces étudiées. En effet, une corrélation très faible mais significative a été observée entre les longueurs des fibres et le module d'élasticité, mais celle-ci était faible quel que soit le tempérament écologique. Ce résultat semble à première vue être en désaccord avec certains travaux qui n'ont rapporté aucune augmentation significative des propriétés mécaniques avec l'augmentation de la taille des fibres (Le Baillif & Oksman, 2006; Yam et al., 1990), mais ce n'est pas le cas. Le fait que la corrélation positive que nous avons observée soit très faible de manière générale et quel que soit le groupe écologique remet en cause l'impact des longueurs des fibres sur la rigidité. De plus, il est connu que la rigidité est principalement influencée par l'AMF (Trouy, 2015). Des corrélations positives et significatives ont par ailleurs été observées entre le nombre de vaisseaux par unité de surface et les épaisseurs des parois des fibres avec le module d'élasticité et les résistances au cisaillement et à la compression parallèle dans cette thèse. Ce résultat confirme celui de Toong et al., (2014). Le lien entre l'épaisseur tangentielle des parois des fibres et le module d'élasticité d'une part et le nombre des vaisseaux et la résistance à la compression parallèle d'autre part étaient forts chez les espèces d'ombre (TO). Ce qui est corroboré par Voelker et al., (2011), De Borst et al., (2012) et Fournier et al., (2013) qui ont remarqué que les résistances mécaniques élevées des espèces tolérantes à l'ombre (TO) étaient influencées par les caractéristiques de leurs fibres et de leurs vaisseaux. Entre outre, c'est chez les pionniers (P) et les tolérants à l'ombre (TO) que le lien entre le cisaillement et le nombre des vaisseaux a été le plus fort. Il y avait de très faibles corrélations négatives mais significatives entre les diamètres des vaisseaux et la résistance au cisaillement. Ceux-ci n'étaient pas significatifs en fonction de l'écologie, mais étaient plus importants chez les pionniers. Le module d'élasticité et la résistance à la compression parallèle étaient négativement et significativement lié à l'AMF dans cette thèse comme dans l'étude de Gherardi Hein & Tarcísio Lima (2012) dans du bois juvénile d'Eucalyptus. La corrélation avec le module d'élasticité était forte tandis que celle avec la compression était faible, ce qui confirme le rôle important de l'AMF sur la rigidité du bois (Read et al., 2011; Trouy, 2015; Xu et al., 2011). Tous ces résultats sont en accord avec le fait que les caractéristiques anatomiques des fibres et des vaisseaux chez les feuillus sont liées à

Chapitre 4 : Discussion

leurs propriétés mécaniques comme l'ont souligné plusieurs auteurs (Jeong, 2013; Leclercq, 1980; Toong et al., 2014; Uetimane & Ali, 2011). Par ailleurs, l'influence des matières extractibles et des hémicelluloses sur la qualité du bois a également été étudiée dans la bibliographie. Bien que les extractibles soient des composés en quantités faibles par rapport aux autres polymères du bois, ceux-ci impactent ses propriétés mécaniques d'après Zhao et al., (2020). Dans cette étude, une réduction des extractibles a entraîné une modification des propriétés mécaniques en les réduisant chez le pin et en les augmentant chez le peuplier, en particulier la résistance à l'impact du bois. Les résultats opposés entre le pin et le peuplier sont liés à leur densité du bois. Chez le peuplier la densité a augmenté après extraction à l'inverse du pin (Zhao et al., 2020). Le résultat observé chez le peuplier confirme la forte corrélation négative que nous avons observé entre la concentration en extractibles et la densité du bois dans cette thèse. La densité du bois étant positivement corrélée aux propriétés mécaniques (§4.1), leur modification est liée aux modifications des différentes densités après extraction. Selon Zhao et al., (2020), la réduction de la densité chez le pin est liée au fait que pendant le processus d'extraction, les matières extractibles et les hémicelluloses sont partiellement dissoutes, ce qui entraîne l'augmentation des pores dans la paroi cellulaire. L'augmentation de la densité du peuplier est liée au fait que la rétractabilité volumétrique après extraction avait réduit les pores de sa paroi cellulaire (Zhao et al., 2020). Cependant, les observations faites sur le peuplier sont en contradiction avec les résultats de Durmaz et al., (2019). D'autres auteurs ont déjà souligné l'impact positif des matières extractibles sur les propriétés mécaniques par le passé (Fengel & Wegener, 1989; Imamura, 1989). Cela ne semble pas à première vue être le cas dans cette thèse, puisque des corrélations négatives ont été observées entre les matières extractibles et les propriétés mécaniques. Bien que ces liaisons étaient significatives, elles n'étaient pas fortes ($> -0,5$). De plus, il n'y avait pas de corrélation avec l'énergie W . Certaines études semblent corroborer ces observations, mais elles concernent des composites de farine de bois et pas du bois massif (Saputra et al., 2004; Sheshmani et al., 2012). Dans ces études, l'augmentation des propriétés de résistances lorsque les extractibles ont été éliminés serait peut-être due à la présence de plus d'extraits à la surface du bois. La plupart des autres études (Grabner et al., 2005) indique une relation linéaire positive entre les extractibles du bois et les propriétés mécaniques. Nous avons observé cela en quelque sorte car les espèces tolérantes à l'ombre qui avaient les meilleures propriétés mécaniques avaient également une quantité d'extractibles statistiquement identique à celle des pionnières qui avaient la concentration en extraits la plus élevée. En y regardant de plus près, on se rend compte que les corrélations négatives observées entre les extraits et les propriétés mécaniques et la densité du bois concernent en réalité

uniquement les espèces pionnières (P). En effet, les ajustements linéaires obtenus ont révélé des R^2 plus importants chez ces espèces. De plus, ce sont elles (P) qui avaient avec les espèces d'ombre (TO) la plus forte concentration en extraits mais des résistances mécaniques et une densité faibles (pour les pionnières uniquement). Ce groupe présentait également des espèces avec un nombre d'échantillons très important. Nos résultats et ceux des auteurs précédents concernant les extractibles du bois montrent que leur impact sur les propriétés physico-mécaniques dépend de l'espèce considérée. En effet, la quantité et la qualité des extractibles diffèrent selon l'espèce (Trouy, 2015). Concernant les hémicelluloses, nous avons observé des corrélations positives et significatives avec les propriétés mécaniques du bois sauf W, mais celles-ci étaient faibles. Les régressions linéaires étaient particulièrement fortes chez les pionnières (P). En effet, celles-ci n'ont pas montré de bonnes résistances et avaient la plus faible concentration en hémicelluloses, ce qui soutient la corrélation observée. L'étude de Wang et al., (2019) corrobore ce résultat. Pour Wang et al., (2019), la teneur élevée en hémicelluloses d'un matériau cellulosique issu d'une pâte (chimico thermomécanique) préparée en laboratoire en utilisant un procédé permettant la séparation de l'hémicellulose du peuplier a entraîné une plus grande résistance à la traction, ce qui est soutenu par Duarte et al., (2020). La comparaison reste tout de même difficile car il est question de fibres dans cette étude et pas de bois massif une fois de plus. Au final, sur le plan chimique, la cellulose et la lignine sont les polymères du bois qui influencent principalement la densité et les propriétés mécaniques du bois. D'autre part, la composition chimique et les caractéristiques anatomiques du bois peuvent aussi avoir une influence sur la stabilité dimensionnelle et l'AMF. De faibles corrélations négatives mais significatives ont par exemple été observées entre la quantité d'extraits et les différents retraits (R_T et R_R) et cela est soutenu par Mantanis et al., (1994), Adamopoulos & Voulgaridis (2012), Bossu et al., (2016) et Todorova et al., (2023). D'autres corrélations ont été observées entre les retraits et les quantités de lignine, de cellulose et d'hémicelluloses. Ces corrélations étaient positives et significatives uniquement avec le retrait radial, il n'y avait pas de lien significatif avec le retrait tangentiel. La corrélation avec la lignine était la plus forte. Ce résultat est en opposition avec Todorova et al., (2023) qui soutient l'hypothèse selon laquelle les hémicelluloses influencent plus fortement le retrait car elles contiennent le plus grand nombre de sites de sorption actifs dans leurs macromolécules. Dans l'étude de Bárcenas-Pazos et al., (2000), il avait été observé une diminution du retrait tangentiel lorsque la teneur en lignine avait augmenté. D'autre part, l'anisotropie du retrait et l'AMF étaient significativement corrélés à la chimie. La plus forte corrélation était négative et a été observée entre la lignine et l'anisotropie. L'anisotropie était corrélée positivement avec les extractibles ce qui est en accord avec Todaro

Chapitre 4 : Discussion

et al., (2018). Dans l'étude de Jankowska et al., (2017), une teneur plus élevée en matières extractibles était associée à un PSF faible. En effet, les tolérants à l'ombre qui avaient une concentration en extraits élevée avaient aussi les plus faibles PSF. Sheng-zuo et al., (2004) a mis en évidence une forte corrélation négative entre la teneur en cellulose et l'AMF et cela a également été le cas dans cette thèse, mais la corrélation était très faible. L'AMF était également corrélé négativement (-0,59) à la longueur des fibres, ce qui était aussi le cas pour nous, mais la corrélation était très faible. Les corrélations positives et significatives entre le retrait radial et les différentes épaisseurs sont confirmées par Todaro et al., (2018) qui indiquait que la réduction du retrait pouvait être attribuée à une paroi plus fine. Il en était de même chez Toong et al., (2014). Cette observation est opposée aux résultats de Todorova et al., (2023) qui n'a souligné aucune corrélation entre les retraits et l'anatomie. L'anisotropie était négativement corrélée aux épaisseurs de paroi dans notre travail mais pas dans celui de Fournier et al., (2013). En accord avec la bibliographie (Adler et al., 2014; De Borst et al., 2012; Fournier et al., 2013; Román-Dañobeytia et al., 2021; Trouy, 2015; Voelker et al., 2011), nous pouvons conclure que les espèces tolérantes à l'ombre présentent un meilleur soutien mécanique et une survie plus élevée comparativement aux héliophiles et aux pionnières.

Conclusion Générale

Cette thèse a traité de l'influence de la stratégie de croissance liée au tempérament écologique des arbres sur les propriétés technologiques de 25 feuillus tropicaux du Gabon. L'étude des stratégies écologiques est nécessaire pour mieux comprendre la biodiversité et les mécanismes ontogéniques associés, mais également pour comprendre la variabilité des propriétés du bois produit pour ses différents usages par les populations humaines. Les différents objectifs de cette dernière étaient la compréhension des stratégies de croissance des arbres, les caractérisations chimique, anatomique, physique et mécanique en fonction du tempérament écologique et en lien avec les fonctions de l'arbre, et enfin la détermination des liens existants entre les propriétés étudiées. Pour ce faire, une étude bibliographique portant sur les traits fonctionnels du bois et le degré de tolérance à l'ombre des arbres a été réalisée dans un premier chapitre. Celle-ci a permis de choisir et de définir les groupes écologiques de cette étude, de comprendre comment interagissent les arbres entre eux et face aux contraintes environnementales et de dresser un premier portrait des espèces sur les plans mécanique, chimique et anatomique en fonction de leur tolérance à l'ombre. Il en ressort que les espèces exigeantes en lumière se caractérisent principalement par des taux de croissance élevés, un tronc élancé, une conductivité hydraulique efficace grâce à de plus gros vaisseaux peu nombreux. Elles semblent cependant présenter des risques élevés de casse sous l'effet de vents violents ainsi qu'une vulnérabilité hydraulique dans des conditions climatiques extrêmes. Les espèces d'ombre ont quant à elles une croissance plus lente, des troncs plus épais et un enracinement profond qui leur permet de résister aux vents violents. Elles ont en plus des taux de survie et de défense face aux bio agresseurs élevés ainsi qu'un soutien mécanique performant. Elles ont une conductivité hydraulique moins efficace liée à leurs vaisseaux plus petits. Toutefois, ces vaisseaux plus petits et plus nombreux leur confèrent une sécurité face à la cavitation du xylème.

Dans le deuxième chapitre, l'ensemble des méthodes et techniques expérimentales ainsi que les tests statistiques utilisés pour la détermination des différentes propriétés du bois a été présenté. Ces méthodes incluent des essais rapides et non destructifs utilisés pour déterminer la composition chimique des espèces ainsi que leur rigidité. Les autres essais physico-mécaniques ont été réalisés suivant les normes NF-B51 sur de petites éprouvettes de bois sans défauts. Les traits anatomiques ont été déterminés suivant des protocoles spécifiques. En somme, neuf essais

Conclusion Générale

expérimentaux (5 mécaniques, 1 physique, 1 chimique et 2 anatomiques) ont été réalisés et une vingtaine de propriétés intrinsèques au bois déterminées. Il s'agit de onze propriétés physico-mécaniques, les trois principaux polymères du bois en plus des extractibles et huit traits anatomiques relatifs aux vaisseaux et aux fibres. Dans l'ensemble 368 échantillons ont été testés à l'exception des essais anatomiques pour lesquels le nombre a été réduit à 90 spécimens.

Les résultats obtenus ont été analysés dans un dernier chapitre. D'un point de vue mécanique, les corrélations positives entre la densité du bois et les propriétés mécaniques ont été confirmées suivant le tempérament écologique. Des corrélations négatives ont été observées entre l'AMF et les propriétés mécaniques, mais les ajustements linéaires en fonction du tempérament écologique présentaient des coefficients de détermination faibles. Il y avait des différences dans les propriétés physico-mécaniques en fonction de la tolérance à l'ombre des espèces. Les espèces tolérantes à l'ombre (TO) avaient de meilleures propriétés mécaniques, une densité de bois élevée, une faible anisotropie des retraits et un point de saturation des fibres moins élevé par rapport aux espèces hémi-héliophiles (HH) et exigeantes en lumière (P). Les propriétés des hémi-héliophiles et des pionnières étaient rarement différentes d'un point de vue statistique. Les tolérantes à l'ombre et les hémi-héliophiles avaient la même rigidité. Les propriétés physiques et mécaniques telles que la densité, le retrait radial, la rigidité et les résistances au cisaillement longitudinal et la compression axiale principalement, étaient liées aux caractéristiques anatomiques du bois ainsi qu'à sa composition chimique. Par ailleurs, la composition chimique des espèces différait suivant le tempérament écologique. Les espèces d'ombre avaient de plus fortes concentrations d'hémicelluloses et de lignine tandis que les espèces exigeantes en lumière présentaient la plus forte concentration en matières extractibles. Il n'y avait pas de différence de concentration en cellulose entre les groupes écologiques. Sur le plan anatomique, les espèces tolérantes à l'ombre avaient des parois de fibres très épaisses comparées aux espèces pionnières et hémi-héliophiles. Les vaisseaux des espèces pionnières étaient plus larges que ceux des hémi-héliophiles. Les hémi-héliophiles avaient le plus grand nombre de vaisseaux par unité de surface. Les longueurs des fibres n'étaient pas statistiquement différentes entre les tempéraments écologiques. Il y avait des corrélations positives et négatives entre les longueurs des fibres, les épaisseurs des parois, les diamètres des vaisseaux et le nombre de vaisseaux par unité de surface. Un épaissement des parois de fibres était lié à des fibres plus longues et des vaisseaux plus nombreux, mais ces liens étaient faibles quel que soit le tempérament écologique. Plus les vaisseaux devenaient larges et plus leur nombre était réduit en particulier chez les espèces pionnières. Des corrélations positives et négatives entre la composition chimique du bois et ses caractéristiques anatomiques ont également été observées.

Des concentrations en lignine, cellulose et hémicellulose élevées étaient liées à des vaisseaux plus nombreux avec des diamètres plus petits, surtout chez les espèces d'ombre. C'était l'inverse pour la concentration en matières extractibles. Une concentration plus élevée de lignine était liée à des parois de fibres plus épaisses. Enfin, lorsque les concentrations en hémicelluloses et cellulose augmentaient, les fibres devenaient plus courtes en particulier chez les espèces de lumière. De façon générale, il y avait un effet positif du tempérament écologique dans les différentes relations linéaires entre les propriétés étudiées bien que les coefficients de détermination de celles-ci étaient pour la plupart faibles quel que soit l'écologie. Tous ces résultats ont été comparés aux données bibliographiques et le plus souvent des correspondances ont été trouvées. Les résultats de cette thèse présentent une avancée significative dans la connaissance scientifique et la caractérisation de feuillus tropicaux du Gabon pour la plupart peu connus. Ils apportent également des connaissances nouvelles sur les espèces de la mi canopée que sont les hémi-héliophiles.

La politique de gestion durable des forêts gabonaises pour la plupart naturelles et de leurs biodiversités permet de maintenir des taux de déforestation relativement faibles. Néanmoins, des progrès doivent encore être faits afin de limiter certaines atteintes déjà observables. L'une des visions actuelles de l'exploitation forestière au Gabon est de développer les marchés industriels pour les essences moins connues compte tenu de l'importante exploitation que subissent les essences les plus connues (primaires) à l'exemple de l'okoumé. Cependant, le remplacement des essences primaires par des essences peu connues aux qualités similaires ou plus élevées, ne permettra pas de résoudre le problème. Une exploitation forestière durable et raisonnée doit plutôt être privilégiée. Celle-ci passe par l'identification d'espèces menacées d'extinction (Paradis et al., 2023) et l'interdiction stricte de leur exploitation. La préservation d'un plus grand nombre de peuplement forestiers constitués majoritairement d'espèces d'ombre aidera à faire face à un éventuel réchauffement climatique. L'exploitation d'espèces autochtones à forte régénération naturelle et non d'espèces introduites par l'activité humaine est essentielle. Les connaissances sur l'écologie des espèces apportées par cette thèse doivent permettre la création de pépinières composées d'espèces (pionnières, hémi-héliophiles et tolérantes à l'ombre) principalement à faible régénération naturelle. Un entretien régulier des espaces forestiers (création de trouées et coupes de régénération par exemple) favorisant la croissance d'espèces de divers groupes écologiques doit être envisagé. La lutte contre la coupe illégale passe par le renforcement de la surveillance forestière et la mise en place de mesures de sécurité par des moyens technologiques (barrières de sécurité et caméra vidéo par exemple).

Perspectives

En guise de perspectives, nous proposons tout d'abord d'étendre cette étude aux espèces tropicales des pays du bassin du Congo autre que le Gabon, compte tenu des caractéristiques environnementales qui leur sont communes. Cela permettra de vérifier un effet de la zone géographique sur les propriétés du bois pour une même espèce et en fonction du tempérament écologique. Ce travail permettra au final d'avoir une connaissance assez large de la dynamique forestière du deuxième massif forestier tropical au monde. Nous suggérons d'autre part d'extrapoler le travail à l'ensemble de la base de données du CIRAD en particulier concernant les propriétés chimiques et les traits anatomiques. Nous proposons que soit réalisé un échantillonnage des espèces étudiées dans leurs conditions naturelles en y effectuant des mesures de traits morphologiques des arbres et de la canopée, compte tenu de la plasticité existante dans le tempérament des espèces héliophiles. Nous suggérons en plus de compléter les caractérisations effectuées par des essais de durabilité naturelle telles que la durabilité face aux termites et aux insectes, des essais de conductivité thermique et de résistance au feu en vue d'une caractérisation plus optimale des essences étudiées pour une meilleure utilisation de leur bois. Il serait aussi intéressant de compléter et comparer les résultats de la spectroscopie proche infrarouge par des analyses de fibres (taux de répartition des polymères du bois) et des extractions avec différents solvants. Etant donné l'impact de l'anatomie sur les propriétés de résistance mécanique du bois rapportée par de nombreux auteurs dans la bibliographie, nous suggérons d'élargir la caractérisation anatomique des espèces étudiées ici à d'autres traits tels que la largeur et la densité des rayons, la densité des fibres et les fractions de parenchymes radial. Des protocoles efficaces et rapides d'obtention de coupes anatomiques pour des bois tropicaux très durs devront également être envisagés.



Références bibliographiques

- [1] Ab Latib, H., Liat, L. C., Ratnasingam, J., Law, E. L., Azim, A. A., Mariapan, M., & Natkuncaran, J. (2020). Suitability of paulownia wood from Malaysia for furniture application. *BioResources*, *15*(3), 4727–4737.
- [2] Adamopoulos, S., & Voulgaridis, E. (2012). Effect of hot-water extractives on water sorption and dimensional changes of black locust wood. *Wood Research*, *57*(1), 69–78.
- [3] Adler, P. B., Salguero-Gómez, R., Compagnoni, A., Hsu, J. S., Ray-Mukherjee, J., Mbeau-Ache, C., & Franco, M. (2014). Functional traits explain variation in plant life history strategies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(2), 740-745. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315179111>
- [4] Agusti, J., & Greb, T. (2013). Going with the wind - Adaptive dynamics of plant secondary meristems. *Mechanisms of Development*, *130*(1), 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.mod.2012.05.011>
- [5] Almeida, T. H., Almeida, D. H., Aquino, V. B. M., Clialiu, E., Pinheiro, R. V., Branco, L. A. M. N., Almeida, J. P. B., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2020). Investigation of the fiber saturation point of tropical Brazilian wood species. *BioResources*, *15*(3), 5379–5387. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5379-5387>
- [6] Aloui, F., Ahajji, A., George, B., Merlin, A., & El Bakali, I. (2020). The durability of natural colour of different wood species exposed to solar- type radiation - Role of extracts. Conference: Natural durability of the wood color. Effect of extracts. Tabarka, Tunisia. <https://www.researchgate.net/publication/342903218>
- [7] Alvarez-clare, S. (2005). Biomechanical properties of tropical tree seedlings as a functional correlate of shade tolerance. (Doctoral dissertation, University of Florida).
- [8] Alvarez-Clare, S., & Kitajima, K. (2007). Physical defence traits enhance seedling survival of neotropical tree species. *Functional Ecology*, *21*(6), 1044–1054. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01320.x>
- [9] Amusant, N., Nigg, M., Thibaut, B., & Beauchene, J. (2014). Diversity of decay resistance strategies of durable tropical woods species: Bocoa prouacensis Aublet, Vouacapoua americana Aublet, Inga alba (Sw.) Wild. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *94*, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.012>
- [10] Anfodillo, T., Carraro, V., Carrer, M., Fior, C., & Rossi, S. (2006). Convergent tapering of xylem conduits in different woody species. *New Phytologist*, *169*(2), 279–290. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01587.x>
- [11] Apgaua, D. M., Ishida, F. Y., Tng, D. Y., Laidlaw, M. J., Santos, R. M., Rumman, R., ... & Laurance, S. G. (2015). Functional traits and water transport strategies in lowland tropical rainforest trees. *PLoS One*, *10*(6), e0130799. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130799>
- [12] Aramaki, M., Baillères, H., Brancheriau, L., Kronland-Martinet, R., & Ystad, S. (2007). Sound quality assessment of wood for xylophone bars. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *121*(4), 2407–2420. <https://doi.org/10.1121/1.2697154>
- [13] Arnaud, C., Brancheriau, L., Sabatier, S., Heinz, C., Chaix, G., & Tomazello-Filho, M. (2019). Interactions between the mechanical and hydraulic properties of eucalyptus trees under different environmental conditions of fertilization and water availability. *BioResources*, *14*(3), 7157–7168. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.7157-7168>

- [14] Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical Properties of Wood: A Review. *Forests*, 14(6), 1202. <https://doi.org/10.3390/f14061202>
- [15] Asseko Ella, M., Goli, G., Pambou Nziengui, C. F., Gril, J., Fournely, E., & Moutou Pitti, R. (2024). Comparative investigation on viscoelastic and mechanosorptive creep behavior of two tropical hardwoods and one temperate softwood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82(1), 35–52. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-02002-w>
- [16] ASTM D143-94. (1994). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. *American Society for Testing and Materials - ASTM. Annual Book of ASTM*, 94, 31.
- [17] Atkinson, D., & Wilson, S. A. (1979). The growth and distribution of fruit tree roots: some consequences for nutrient uptake. In *Symposium on Mineral Nutrition and Fruit Quality of Temperate Zone Fruit Trees 92*, p. 137-150.
- [18] Baas, P., Ewers, F. W., Davis, S. D., & Wheeler, E. A. (2004). Evolution of xylem physiology. In *The evolution of plant physiology*, p. 273-295. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012339552-8/50016-0>
- [19] Bang, C., Sabo, J. L., & Faeth, S. H. (2010). Reduced wind speed improves plant growth in a desert city. *PLoS One*, 5(6), e11061.
- [20] Banque de schémas de Dijon (2024). Répartition des stomates et échanges avec l’atmosphère. https://pdfprof.com/PDF_Image.php?id=56715&t=18
- [21] Barber, S. A. (1979). Growth requirements for nutrients in relation to demand at the root surface. In *The soil–root interface*, p. 5-20. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-325550-1.50008-2>
- [22] Bárcenas-Pazos, G., Velázquez-Morales, P., & Dávalos-Sotelo, R. (2000). Effect of lignin content on shrinkage of four Mexican woods. *Holzforschung*, 54(5), 541–543. <https://doi.org/10.1515/HF.2000.091>
- [23] Baucher, M., El Jaziri, M., & Vandeputte, O. (2007). From primary to secondary growth: Origin and development of the vascular system. *Journal of Experimental Botany*, 58(13), 3485–3501. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm185>
- [24] Begović, K., Schurman, J. S., Svitok, M., Pavlin, J., Langbehn, T., Svobodová, K., Mikoláš, M., Janda, P., Synek, M., Marchand, W., Vitková, L., Kozák, D., Vostarek, O., Čada, V., Bače, R., & Svoboda, M. (2023). Large old trees increase growth under shifting climatic constraints: Aligning tree longevity and individual growth dynamics in primary mountain spruce forests. *Global Change Biology*, 29(1), 143–164. <https://doi.org/10.1111/gcb.16461>
- [25] Bénédet, F., Doucet, J.-L., Fayolle, A., Gillet, J.-F., Gourlet-Fleury, S., & Vincke, D. (2019). “CoForTraits, African plant traits information database.” CIRAD Dataverse, V1. <https://doi.org/10.18167/DVN1/Y2BIZK>
- [26] Berenguer, E., Lennox, G. D., Ferreira, J., Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Maria, M., Seixas, M. De, Smith, C. C., Withey, K., & Barlow, J. (2021). Tracking the impacts of El Niño drought and fire in human-modified Amazonian forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(30), e2019377118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2019377118>
- [27] Bianchi, E., Bugmann, H., & Bigler, C. (2021). Light availability predicts mortality probability of conifer saplings in Swiss mountain forests better than radial growth and tree size. *Forest Ecology and Management*, 479, 118607. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118607>
- [28] Blanc, L., Florès, O., Molino, J.-F., Gourlet-Fleury, S., & Sabatier, D. (2003). Diversité spécifique et regroupement d’espèces arborescentes en forêt guyanaise. *Revue Forestière Française*, 55(sp), 131–146. <https://doi.org/10.4267/2042/5767>
- [29] Bongers, F., & Sterck, F. J. (1998). “Architecture and development of rainforest trees: responses to light variation.” *Dynamics of Tropical Communities*, 125–162.

Références bibliographiques

- [30] Bordonné, P. A. (1989). Module dynamique et frottement intérieur dans le bois: mesures sur poutre flottantes en vibrations naturelles. *Theses. fr* (Doctoral dissertation, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL).
- [31] Bossdorf, O., & Pigliucci, M. (2009). Plasticity to wind is modular and genetically variable in *Arabidopsis thaliana*. *Evolutionary ecology*, *23*, 669-685. <https://doi.org/10.1007/s10682-008-9263-3>
- [32] Bossu, J., Beauchêne, J., Estevez, Y., Duplais, C., & Clair, B. (2016). New insights on wood dimensional stability influenced by secondary metabolites: The case of a fast-growing tropical species *Bagassa guianensis* aubl. *PLoS ONE*, *11*(3), e0150777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150777>
- [33] Brancheriau, L. (2014). An alternative solution for the determination of elastic parameters in free-free flexural vibration of a Timoshenko beam. *Wood Science and Technology*, *48*(6), 1269-1279. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0672-x>
- [34] Brancheriau, L., & Bailleres, H. (2002). Natural vibration analysis of clear wooden beams: A theoretical review. *Wood Science and Technology*, *36*(4), 347-365. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0143-7>
- [35] Brancheriau, L., Baillères, H., Détienne, P., Gril, J., & Kronland, R. (2006). Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. *Journal of Wood Science*, *52*(3), 270-273. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0755-2>
- [36] Brienen, R. J., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., & ... & Zagt, R. T. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, *519*(7543), 344-348. <https://doi.org/10.1038/nature14283>
- [37] Brockley, S. B., DuVall, M. A., & Bevington, J. M. (2010). PS 14-110: Herbivore defense in three species of Amazonian Cecropia from Peru. In *The 95th ESA Annual Meeting*.
- [38] Brunner, M., Eugster, R., Trenka, E., & Bergamin-Strotz, L. (1996). FT-NIR Spectroscopy and Wood Identification. *Holzforschung*, *50*, 130-134. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.2.130>
- [39] Brym, Z. T., Lake, J. K., Allen, D., & Ostling, A. (2011). Plant functional traits suggest novel ecological strategy for an invasive shrub in an understorey woody plant community. *Journal of Applied Ecology*, *48*(5), 1098-1106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02049.x>
- [40] Buckley, J., Widmer, A., Mescher, M. C., & De Moraes, C. M. (2019). Variation in growth and defence traits among plant populations at different elevations: Implications for adaptation to climate change. *Journal of Ecology*, *107*(5), 2478-2492. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13171>
- [41] Burslem, D. F. R. P., Grubb, P. J., & Turner, I. M. (1995). Responses to nutrient addition among shade-tolerant tree seedlings of lowland tropical rain forest in Singapore. *Journal of Ecology*, 113-122. <https://doi.org/10.2307/2261155>
- [42] Canham, C. D. (1989). Different responses to gaps among shade-tolerant tree species. *Ecology*, *70*(3), 548-550. <https://doi.org/10.2307/1940200>
- [43] Carrer, M., Von Arx, G., Castagneri, D., & Petit, G. (2015). Distilling allometric and environmental information from time series of conduit size: The standardization issue and its relationship to tree hydraulic architecture. *Tree Physiology*, *35*(1), 27-33. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu108>
- [44] Cave, I. D. (1966). Theory of X-ray measurement of microfibril angle in wood. *Forest Products Journal*, *16*, 37-42.
- [45] Chanson, B. (1992). Hétérogénéités angulaires des déformations de maturation: Interprétation basée sur le concept de plan d'organisation des arbres. *Quatrième Séminaire ASMA («Architecture, Structure et Mécanique de l'arbre»)*, Université de Montpellier II, 120-131.
- [46] Charra-Vaskou, K., Badel, E., Charrier, G., Ponomarenko, A., Bonhomme, M., Foucat, L., Mayr, S., & Améglio, T. (2016). Cavitation and water fluxes driven by ice water potential in Juglans

- regia during freeze-thaw cycles. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 739–750. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv486>
- [47] Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12(4), 351–366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- [48] Chave, J., Muller-Landau, H. C., Baker, T. R., Easdale, T. A., Steege, H. T., & Webb, C. O. (2006). Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological applications*, 16(6), 2356–2367. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2356:RAPVOW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2356:RAPVOW]2.0.CO;2)
- [49] Chen, L., Xiang, W., Wu, H., Lei, P., Zhang, S., Ouyang, S., Deng, X., & Fang, X. (2017). Tree growth traits and social status affect the wood density of pioneer species in secondary subtropical forest. *Ecology and Evolution*, 7(14), 5366–5377. <https://doi.org/10.1002/ece3.3110>
- [50] Cheng, X., Ping, T., Li, Z., Wang, T., Han, H., & Epstein, H. E. (2022). Effects of environmental factors on plant functional traits across different plant life forms in a temperate forest ecosystem. *New Forests*, 53(1), 125–142. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09847-0>
- [51] Chi Leung, S. O., Via, B. K., Groom, L. H., & Schimleck, L. R. (2004). Near infrared spectroscopy in the forest products industry. *Forest Products Journal*, 54(3), 6–16.
- [52] Christoforo, A. L., Blecha, K. A., Carvalho, A. L. C. de, Rezende, L. F. S., & Lahr, F. A. R. (2013). Characterization of Tropical Wood Species for Use in Civil Constructions. *Journal of Civil Engineering Research*, 3(3), 98–103. <https://doi.org/10.5923/j.jce.20130303.02>
- [53] Clark, D. a., & Clark, D. B. (1992). Life history diversity of canopy and emergent trees in a neotropical rain forest. *Ecological Monographs*, 62(3), 315–344.
- [54] Cochard, H., & Granier, A. (1999). Fonctionnement hydraulique des arbres forestiers. *Revue Forestiere Francaise*, 51(2), 121–134. <https://doi.org/10.4267/2042/5425>
- [55] Coley, P. D., & Barone, J. A. (1996). Herbivory and plant defenses in tropical forests. *Annual review of ecology and systematics*, 27(1), 305–335. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.27.1.305>
- [56] Cooley, A. M., Reich, Al., & Rundel, P. (2004). Leaf support biomechanics of neotropical understory herbs. *American Journal of Botany*, 91(4), 573–581. <https://doi.org/10.3732/ajb.91.4.573>
- [57] Coomes, D. A., & Grubb, P. J. (1998). A comparison of 12 tree species of Amazonian caatinga using growth rates in gaps and understorey, and allometric relationships. *Functional Ecology*, 12, 426–435.
- [58] Coomes, D. A., Kunstler, G., Canham, C. D., & Wright, E. (2009). A greater range of shade-tolerance niches in nutrient-rich forests: An explanation for positive richness-productivity relationships? *Journal of Ecology*, 97(4), 705–717. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01507.x>
- [59] 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>
- [60] Cullen, S. (2002). Trees and Wind: Wind Scales and Speeds. *Arboriculture & Urban Forestry*, 28(5), 237–242. <https://doi.org/10.48044/jauf.2002.036>
- [61] Cuzzuol, G. R. F., dos Santos Galvão, E. K., Werner, E. T., Pezzopane, J. E. M., & da Silva Gasparini, X. S. (2022). Carbon reservoirs in shade-tolerant morphotype of *Paubrasilia echinata* are more susceptible to humidity and temperature changes than sun-tolerant morphotype. *Flora*, 287, 151991. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151991>
- [62] Cuzzuol, G. R. F., Gama, V. N., Zanetti, L. V., Werner, E. T., & Pezzopane, J. E. M. (2020). UV-B effects on growth, photosynthesis, total antioxidant potential and cell wall components of shade-tolerant and sun-tolerant ecotypes of *Paubrasilia echinata*. *Flora*, 271, 151679. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151679>

Références bibliographiques

- [63] Davies, S. J., & Ashton, P. S. (1999). Phenology and fecundity in 11 sympatric pioneer species of Macaranga (Euphorbiaceae) in Borneo. *American Journal of Botany*, 86(12), 1786–1795. <https://doi.org/10.2307/2656675>
- [64] Day, M. E., & Greenwood, M. S. (2011). Regulation of ontogeny in temperate conifers. In *Size- and age-related changes in tree structure and function*, p. 91-119. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1242-3_4
- [65] De Borst, K., Bader, T. K., & Wikete, C. (2012). Microstructure-stiffness relationships of ten European and tropical hardwood species. *Journal of Structural Biology*, 177(2), 532–542. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2011.10.010>
- [66] de Lima Vieira, W., Phelipe Amorim, E., Corsato Correa, C., Minoru Yamaji, F., Menezes Freitas, M. L., Wagner Ballarin, A., Tomazello-Filho, M., Guerrini, I. A., Rossi, M., & Longui, E. L. (2021). Effect of soil type on mean annual increment, wood anatomy and properties of 33-year-old *Corymbia citriodora* (Hook.), KD Hill, & LAS Johnson. *Research, Society and Development*, 10(10), 1-22. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19004>
- [67] De Saint Aubin, G. (1963). La Forêt Du Gabon. *Centre Technique Forestier Tropical*, Nogent-sur-Marne, Paris, pp 208.
- [68] Del Tredici, P. (2001). Sprouting in temperate trees: a morphological and ecological review. *The botanical review*, 67, 121-140. <https://doi.org/10.1007/BF02858075>
- [69] Demmig-adams, B., Stewart, J. J., & Iii, W. W. A. (2017). Environmental regulation of intrinsic photosynthetic capacity: an integrated view. *Current Opinion in Plant Biology*, 37, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.03.008>
- [70] Donaldson, L. (2008). Microfibril angle: Measurement, variation and relationships - A review. *Iawa Journal*, 29(4), 345–386. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000192>
- [71] Doughty, C. E., & Goulden, M. L. (2008). Are tropical forests near a high temperature threshold? *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G1). <https://doi.org/10.1029/2007JG000632>
- [72] Duan, H., Cao, S., Zheng, H., Hu, D., Lin, J., Lin, H., Hu, R., Sun, Y., & Li, Y. (2016). Variation in the growth traits and wood properties of Chinese fir from six provinces of Southern China. *Forests*, 7(9), 192. <https://doi.org/10.3390/f7090192>
- [73] Duarte, B. B., Lahr, F. A. R., da Silva Curvelo, A. A., & Christoforo, A. L. (2020). Influence of physical and chemical components on the physical-mechanical properties of ten brazilian wood species. *Materials Research*, 23(2), e20190325.. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0325>
- [74] Dudt, J. F., & Shure, D. J. (1994). The influence of light and nutrients on foliar phenolics and insect herbivory. *Ecology*, 75(1), 86-98.
- [75] Durmaz, E., Ucuncu, T., Karamanoglu, M., & Kaymakci, A. (2019). Effects of heat treatment on some characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *BioResources*, 14(4), 9531–9543. <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9531-9543>
- [76] Elo, A., Immanen, J., Nieminen, K., & Helariutta, Y. (2009). Stem cell function during plant vascular development. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 20(9), 1097–1106. <https://doi.org/10.1016/j.semcd.2009.09.009>
- [77] Ennos, A. R. (1989). The mechanics of anchorage in seedlings of sunflower, *Helianthus annuus* L. *New Phytologist*, 113(2), 185-192. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1989.tb04705.x>
- [78] Ennos, A. R. (1991). The mechanics of anchorage in wheat *Triticum aestivum* L.: II. Anchorage of mature wheat against lodging. *Journal of Experimental Botany*, 42(12), 1607–1613. <https://doi.org/10.1093/jxb/42.12.1607>
- [79] Ennos, A. R. (1997). Wind as an ecological factor. *Trends in Ecology and Evolution*, 12(3), 108–111. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(96\)10066-5](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(96)10066-5)

- [80] Falster, D. S. (2006). Sapling strength and safety the importance of wood density in tropical forests. *New Phytologist*, 171(3).
- [81] Fan, Z. X., Zhang, S. B., Hao, G. Y., Ferry Slik, J. W., & Cao, K. F. (2012). Hydraulic conductivity traits predict growth rates and adult stature of 40 Asian tropical tree species better than wood density. *Journal of Ecology*, 100(3), 732–741. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01939.x>
- [82] Farsi, M., & Kiaei, M. (2014). Wood physical properties and tracheid dimensions of non-native softwoods in Iran. *Cellulose Chemistry and Technology*, 48(5–6), 445–454.
- [83] Favrichon, V. (1994). Classification des espèces arborées en groupes fonctionnels en vue de la réalisation d'un modèle de dynamique de peuplement en forêt guyanaise. *Revue d'Écologie (La Terre et La Vie)*, 49(4), 379–403. <https://doi.org/10.3406/rev.1994.2149>
- [84] Fengel, D., & Wegener, G. (1989). Wood Chemistry, ultrastructure, reactions, 3rd Edn. *Walter de Gruyter, Berlin*, 32–35, 182–226.
- [85] Ferdous, J., Islam, M., & Rahman, M. (2023). The role of tree size, wood anatomical and leaf stomatal traits in shaping tree hydraulic efficiency and safety in a South Asian tropical moist forest. *Global Ecology and Conservation*, 43, e02453. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02453>
- [86] Fernandes, C., Gaspar, M. J., Pires, J., Alves, A., Simões, R., Rodrigues, J. C., Silva, M. E., Carvalho, A., Brito, J. E., & Lousada, J. L. (2017). Physical, chemical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* wood at five sites in Portugal. *IForest*, 10(4), 669–679. <https://doi.org/10.3832/ifer2254-010>
- [87] Fichtler, E., & Worbes, M. (2012). Wood anatomical variables in tropical trees and their relation to site conditions and individual tree morphology. *Iawa Journal*, 33(2), 119–140. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000084>
- [88] Fourdrigniez, M., & Meyer, J.-Y. (2008). Liste et caractéristiques des plantes introduites naturalisées et envahissantes en Polynésie française. *Contribution à La Biodiversité de Polynésie Française*, n°17, 62 + Annexes.
- [89] 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>
- [90] Fujimoto, T., Kurata, Y., Matsumoto, K., & Tsuchikawa, S. (2008). Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 16(6), 529–537. <https://doi.org/10.1255/jnirs.818>
- [91] Fujimoto, T., Yamamoto, H., & Tsuchikawa, S. (2007). Estimation of wood stiffness and strength properties of hybrid larch by near-infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 61(8), 882–888. <https://doi.org/10.1366/000370207781540150>
- [92] Fujiwara, S. (1992). Anatomy and properties of Japanese hardwoods II. Variation of dimensions of ray cells and their relation to basic density. *Iawa Journal*, 13(4), 397–402.
- [93] Geimer, R. L., Herian, V. L., & Xu, D. (1997). Influence of juvenile wood on dimensional stability and tensile properties of flakeboard. *Wood and Fiber Science*, 29(2), 103–120.
- [94] Gérard, J., Edi Kouassi, A., & Daigremont, C. (1998). Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains (Vol. 11). *CIRAD-forêt*.
- [95] Gérard, J., Guibal, D., Paradis, S., & Cerre, J.-C. (2016). Atlas des bois tropicaux : Caractéristiques technologiques et utilisations. *Editions Quae*
- [96] Gherardi Hein, P. R., & Tarcísio Lima, J. (2012). Relationships between microfibril angle, modulus of elasticity and compressive strength in Eucalyptus wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 14(3), 267–274.
- [97] Ghorbanian Far, M., Najafian Ashrafi, M., Shaabani Asrami, H., Amiri Moghadam, Y., Bari, E., Niemz, P., & ... & Ribera, J. (2024). Physical and mechanical properties of different beech wood

Références bibliographiques

- species grown at various climate conditions: a review. *Holzforschung*, (0). <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/hf-2023-0117>
- [98] Gianoli, E., Salgado-Luarte, C., & Escobedo, V. M. (2023). Shade Tolerance and the Relationship Between Herbivory and Light Availability. *International Journal of Plant Sciences*, 184(7), 519–524. <https://doi.org/10.1086/726006>
- [99] Giroud, G., Bégin, J., Defo, M., & Ung, C. H. (2017). Regional variation in wood density and modulus of elasticity of Quebec's main boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, 400, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.019>
- [100] Giroud, G., Defo, M., Champagne, E., Barrette, J. (2020). Évaluation non destructive des propriétés du bois. Partie 3 - La spectroscopie en proche infrarouge. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13789.69607>
- [101] Gong, X., Yuan, D., Zhu, L., Li, Z., & Wang, X. (2024). Long-term changes in radial growth of seven tree species in the mixed broadleaf-Korean pine forest in Northeast China: Are deciduous trees favored by climate change? *Journal of Forestry Research*, 35(1), 70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11676-024-01725-7>
- [102] González-Melo, A. (2022). Wood anatomical traits mediate life-history variations at the sapling, but not at the adult stage. *Trees - Structure and Function*, 36(4), 1337–1347. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02293-1>
- [103] Grabner, M., Müller, U., Gierlinger, N., & Wimmer, R. (2005). Effects of heartwood extractives on mechanical properties of larch. *Iawa Journal*, 26(2), 211–220. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000113>
- [104] Gravel, D., Canham, C. D., Beaudet, M., & Messier, C. (2010). Shade tolerance, canopy gaps and mechanisms of coexistence of forest trees. *Oikos*, 119(3), 475–484. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2009.17441.x>
- [105] Guibal, D., Gerard, J., & Guyot, A. (2023). Méthode de calcul du PSF (Point de Saturation des Fibres) à partir de la variation de surface du plan radial-tangentiel. *GDR 3544 Sciences Du Bois*.
- [106] Guillemot, J., Martin-StPaul, N. K., Bulascoschi, L., Poorter, L., Morin, X., Pinho, B. X., le Maire, G., R. L. Bittencourt, P., Oliveira, R. S., Bongers, F., Brouwer, R., Pereira, L., Gonzalez Melo, G. A., Boonman, C. C. F., Brown, K. A., Cerabolini, B. E. L., Niinemets, Ü., Onoda, Y., Schneider, J. V., ... Brancalion, P. H. S. (2022). Small and slow is safe: On the drought tolerance of tropical tree species. *Global Change Biology*, 28(8), 2622–2638. <https://doi.org/10.1111/gcb.16082>
- [107] Hacke, U. G., Sperry, J. S., Wheeler, J. K., & Castro, L. (2006). Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency. *Tree Physiology*, 26(6), 689–701. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.6.689>
- [108] Hale, S. E., Gardiner, B. A., Wellpott, A., Nicoll, B. C., & Achim, A. (2012). Wind loading of trees: Influence of tree size and competition. *European Journal of Forest Research*, 131(1), 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0448-2>
- [109] Han, X., Huang, J., & Zang, R. (2022). Soil nutrients and climate seasonality drive differentiation of ecological strategies of species in forests across four climatic zones. *Plant and Soil*, 473(1–2), 517–531. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05303-w>
- [110] Harju, A. M., Venäläinen, M., Beuker, E., Velling, P., & Viitanen, H. (2001). Genetic variation in the decay resistance of Scots pine wood against brown rot fungus. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(7), 1244–1249. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-7-1244>
- [111] He, W., & Hu, H. (2013). Rapid prediction of different wood species extractives and lignin content using near infrared spectroscopy. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 33(1), 52–64. <https://doi.org/10.1080/02773813.2012.731463>
- [112] 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. *Holzforschung*, 76(9), 781–790. <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0055>

[113] 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. *IForest*, 15(1), 56–62. <https://doi.org/10.3832/ifor3973-014>

[114] Henry, H. A., & Thomas, S. C. (2002). Interactive effects of lateral shade and wind on stem allometry, biomass allocation, and mechanical stability in *Abutilon theophrasti* (Malvaceae). *American Journal of Botany*, 89(10), 1609–1615. <https://doi.org/10.3732/ajb.89.10.1609>

[115] Hernandez, R. E. (2007). Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods. *Wood Science and Technology*, 41(3), 249–265. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0114-5>

[116] Hietz, P., Valencia, R., & Joseph Wright, S. (2013). Strong radial variation in wood density follows a uniform pattern in two neotropical rain forests. *Functional Ecology*, 27(3), 684–692. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12085>

[117] 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>

[118] Hillis, W. E. (2012). Heartwood and tree exudates (Vol. 4). Springer Science & Business Media.

[119] Hoeber, S., Leuschner, C., Köhler, L., Arias-Aguilar, D., & Schuldt, B. (2014). The importance of hydraulic conductivity and wood density to growth performance in eight tree species from a tropical semi-dry climate. *Forest Ecology and Management*, 330, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.039>

[120] Huang, Y., Wang, L., Chao, Y., Nawawi, D. S., Akiyama, T., Yokoyama, T., & Matsumoto, Y. (2015). Relationships between Hemicellulose Composition and Lignin Structure in Woods. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 36(1), 9–15. <https://doi.org/10.1080/02773813.2015.1039543>

[121] Hubbell, S. P., Foster, R. B., O'Brien, S. T., Harms, K. E., Condit, R., Wechsler, B., Wright, S. J., & Loo De Lao, S. (1999). Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest. *Science*, 283(5401), 554–557. <https://doi.org/10.1126/science.283.5401.554>

[122] Hussain, S., Iqbal, N., Rahman, T., Liu, T., Brestic, M., Safdar, M. E., Asghar, M. A., Farooq, M. U., Shafiq, I., Ali, A., Shoaib, M., Chen, G., Qin, S., Liu, W., & Yang, W. (2019). Shade effect on carbohydrates dynamics and stem strength of soybean genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.011>

[123] Imaji, A., & Seiwa, K. (2010). Carbon allocation to defense, storage, and growth in seedlings of two temperate broad-leaved tree species. *Oecologia*, 162(2), 273–281. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1453-3>

[124] Imamura, H. (1989). Contribution of extractives to wood characteristics. In Natural products of woody plants: chemicals extraneous to the lignocellulosic cell wall. *Springer Berlin Heidelberg*, 843–860.

[125] Islam, M., Rahman, M., & Bräuning, A. (2018). Xylem anatomical responses of diffuse porous *Chukrasia tabularis* to climate in a South Asian moist tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 412, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.035>

[126] Islam, M., Rahman, M., & Bräuning, A. (2019). Long-term wood anatomical time series of two ecologically contrasting tropical tree species reveal differential hydraulic adjustment to climatic stress. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 412–423. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.037>

[127] James, K. R., Moore, J. R., Slater, D., & Dahle, G. A. (2017). Tree biomechanics. *CAB Reviews*, 12, Article 38.

Références bibliographiques

- [128] Jankowska, A., Drożdżek, M., Sarnowski, P., & Horodeński, J. (2017). Effect of Extractives on the Equilibrium Moisture Content and Shrinkage of Selected Tropical Wood Species. *BioResources*, 12(1), 597–607. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.597-607>
- [129] Janse-Ten Klooster, S. H., Thomas, E. J. P., & Sterck, F. J. (2007). Explaining interspecific differences in sapling growth and shade tolerance in temperate forests. *Journal of Ecology*, 95(6), 1250–1260. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01299.x>
- [130] Jeong, G. Y. (2013). Relationship between anatomical and mechanical properties of loblolly pine (*Pinus taeda*). *Forest Products Journal*, 63(1–2), 47–53. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-13-00002>
- [131] Jucker, T., Bouriaud, O., Avacaritei, D., Dănilă, I., Duduman, G., Valladares, F., & Coomes, D. A. (2014). Competition for light and water play contrasting roles in driving diversity-productivity relationships in Iberian forests. *Journal of Ecology*, 102(5), 1202–1213. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12276>
- [132] Karban, R., Agrawal, A. A., & Mangel, M. (1997). The benefits of induced defenses against herbivores. *Ecology*, 78(5), 1351–1355. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[1351:TBOIDA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[1351:TBOIDA]2.0.CO;2)
- [133] Kelley, S. S., Rials, T. G., Snell, R., Groom, L. H., & Sluiter, A. (2004). Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology*, 38(4), 257–276. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0213-5>
- [134] Kennedy, R. W. (1995). Coniferous wood quality in the future: concerns and strategies. *Wood Science and Technology*, 29(5), 321–338. <https://doi.org/10.1007/BF00202581>
- [135] King, D. A. (1991). Correlations Between Biomass Allocation, Relative Growth Rate and Light Environment in Tropical Forest Saplings. *Functional ecology*, 485–492.
- [136] Kitajima, K. (2002). Do shade-tolerant tropical tree seedlings depend longer on seed reserves? Functional growth analysis of three Bignoniaceae species. *Functional Ecology*, 16(4), 433–444. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00641.x>
- [137] Koch, G. W., Stillet, S. C., Jennings, G. M., & Davis, S. D. (2004). The limits to tree height. *Nature*, 428(6985), 851–854. <https://doi.org/10.1038/nature02417>
- [138] Kolb, T. E., Steiner, K. C., McCormick, L. H., & Bowersox, T. W. (1990). Growth response of northern red-oak and yellow-poplar seedlings to light, soil moisture and nutrients in relation to ecological strategy. *Forest Ecology and Management*, 38(1-2), 65–78. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90086-Q](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90086-Q)
- [139] Kollmann, F. F. P., & Côté, W. J. (1968). Principles of Wood Science and Technology I: Solid Wood. In *Springer-Verlag*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>
- [140] Kong, D., Wang, J., Zeng, H., Liu, M., Miao, Y., Wu, H., & Kardol, P. (2017). The nutrient absorption–transportation hypothesis: optimizing structural traits in absorptive roots. *New Phytologist*, 213(4), 1569–1572. <https://doi.org/10.1111/nph.14344>
- [141] Kord, B., Kialashaki, A., & Kord, B. (2010). The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34(2), 121–126. <https://doi.org/10.3906/tar-0903-14>
- [142] Kotowska, M. M., Hertel, D., Rajab, Y. A., Barus, H., & Schuldt, B. (2015). Patterns in hydraulic architecture from roots to branches in six tropical tree species from cacao agroforestry and their relation to wood density and stem growth. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00191>
- [143] Kunstler, G., Falster, D., Coomes, D. A., Hui, F., Kooyman, R. M., Laughlin, D. C., Poorter, L., Vanderwel, M., Vieilledent, G., Wright, S. J., Aiba, M., Baraloto, C., Caspersen, J., Cornelissen, J. H. C., Gourlet-Fleury, S., Hanewinkel, M., Herault, B., Kattge, J., Kurokawa, H., ... Westoby, M. (2016). Plant functional traits have globally consistent effects on competition. *Nature*, 529(7585), 204–207. <https://doi.org/10.1038/nature16476>

- [144] Larson, P. R. (1962). Auxin gradients and the regulation of cambial activity. *Tree growth*, 97-117.
- [145] Latreille, A., Davi, H., Huard, F., & Pichot, C. (2017). Variability of the climate-radial growth relationship among *Abies alba* trees and populations along altitudinal gradients. *Forest Ecology and Management*, 396, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.012>
- [146] Lawton, R. O. (1984). Ecological constraints on wood density in a tropical montane rain forest. *American Journal of Botany*, 71(2), 261-267. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1984.tb12512.x>
- [147] Lazarescu, C., Hart, F., Pirouz, Z., Panagiotidis, K., Mansfield, S. D., Barrett, J. D., & Avramidis, S. (2017). Wood species identification by near-infrared spectroscopy. *International Wood Products Journal*, 8(1), 32–35. <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1242270>
- [148] Le Baillif, M., & Oksman, K. (2006). The influence of the extrusion process on bleached pulp fiber and its composites. In *Proceedings of the progress in wood and biofibrepastic composites conference, Toronto*.
- [149] Leclercq, A. (1980). Relations between silviculture of beech and the physical and mechanical properties of its wood. *Bulletin Des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 15(2), 121–148.
- [150] Lecointre, G., & Le Guyader, H. (2017). Classification Phylogénétique du Vivant.
- [151] Lehnebach, R. (2015). Etude de la variabilité ontogénique du profil ligneux chez quelques espèces forestières tropicales de Guyane française (Doctoral dissertation, Université de Montpellier).
- [152] Lehnebach, R., Bossu, J., Va, S., Morel, H., Amusant, N., Nicolini, E., & Beauchêne, J. (2019). Wood density variations of legume trees in French Guiana along the shade tolerance continuum: Heartwood effects on radial patterns and gradients. *Forests*, 10(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/f10020080>
- [153] Lerot, B. (2006). Les éléments minéraux. 34p.
- [154] Leroy, C. (2006). Rôle de l'architecture dans l'interception lumineuse des couronnes de *Tectona grandis* et *Acacia mangium*. Utilisation pour la simulation des bilans radiatifs dans les systèmes agroforestiers (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
- [155] Levionnois, S., Jansen, S., Wandji, R. T., Beauchêne, J., Ziegler, C., Coste, S., Stahl, C., Delzon, S., Authier, L., & Heuret, P. (2021). Linking drought-induced xylem embolism resistance to wood anatomical traits in Neotropical trees. *New Phytologist*, 229(3), 1453–1466. <https://doi.org/10.1111/nph.16942>
- [156] Lichtenegger, H., Reiterer, A., Stanzl-Tschegg, S. E., & Fratzl, P. (1999). Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods - A possible strategy of mechanical optimization. *Journal of Structural Biology*, 128(3), 257–269. <https://doi.org/10.1006/jsbi.1999.4194>
- [157] Lima, M. D. R., Ramalho, F. M. G., Trugilho, P. F., Bufalino, L., Dias Júnior, A. F., Protásio, T. de P., & Hein, P. R. G. (2022). Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. *Renewable Energy*, 193, 584–594. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.048>
- [158] Liu, W. guo, Hussain, S., Liu, T., Zou, J. lin, Ren, M. lu, Zhou, T., Liu, J., Yang, F., & Yang, W. yu. (2019). Shade stress decreases stem strength of soybean through restraining lignin biosynthesis. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1), 43–53. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61905-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61905-7)
- [159] Loehle, C. (1988). Tree life history strategies: the role of defenses. *Canadian Journal of Forest Research*, 18, 209–222.
- [160] Luostarinen, K., & Hakkarainen, K. (2019). Chemical composition of wood and its connection with wood anatomy in *Betula pubescens*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 34(7), 577–584. <https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1662939>

Références bibliographiques

- [161] Ma, T., Inagaki, T., Ban, M., & Tsuchikawa, S. (2019). Rapid identification of wood species by near-infrared spatially resolved spectroscopy (NIR-SRS) based on hyperspectral imaging (HSI). *Holzforschung*, 73(4), 323–330. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0128>
- [162] Mąderek, E., Zadworny, M., Mucha, J., & Karolewski, P. (2017). Light as a regulator of structural and chemical leaf defenses against insects in two *Prunus* species. *Acta Oecologica*, 85, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2017.09.002>
- [163] Mania, P., Wróblewski, M., Wójciak, A., Roszyk, E., & Moliński, W. (2020). Hardness of densified wood in relation to changed chemical composition. *Forests*, 11(5), 1–12. <https://doi.org/10.3390/F11050506>
- [164] Mantanis, G., Young, R., & Rowell, R. (1994). Swelling of wood Part 1. Swelling in water. *Wood Science and Technology*, 28, 119–134.
- [165] Markesteijn, L., Poorter, L., Paz, H., Sack, L., & Bongers, F. (2011). Ecological differentiation in xylem cavitation resistance is associated with stem and leaf structural traits. *Plant, Cell and Environment*, 34(1), 137–148. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02231.x>
- [166] Martín, J. A., & López, R. (2023). Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe. *Forests*, 14(2), 283. <https://doi.org/10.3390/f14020283>
- [167] Martínez-Cabrera, H. I., Estrada-Ruiz, E., Castañeda-Posadas, C., & Woodcock, D. (2012). Wood specific gravity estimation based on wood anatomical traits: Inference of key ecological characteristics in fossil assemblages. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 187, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.08.005>
- [168] Martone, P. T., Boiler, M., Burgert, I., Dumais, J., Edwards, J., MacH, K., Rowe, N., Rueggeberg, M., Seidel, R., & Speck, T. (2010). Mechanics without Muscle: Biomechanical inspiration from the plant world. *Integrative and Comparative Biology*, 50(5), 888–907. <https://doi.org/10.1093/icb/icq122>
- [169] Masoumi, A., & Bond, B. H. (2024). Dimensional Stability and Equilibrium Moisture Content of Thermally Modified Hardwoods. *BioResources*, 19(1), 1218–1228. <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.1218-1228>
- [170] Masserann, C., & Mariaux, A. (1985). Recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres sur l'anisotropie transverse de retrait. *Bois & Forêts Des Tropiques*, n° 209.
- [171] McCulloh, K., Sperry, J. S., Lachenbruch, B., Meinzer, F. C., Reich, P. B., & Voelker, S. (2010). Moving water well: Comparing hydraulic efficiency in twigs and trunks of coniferous, ring-porous, and diffuseporous saplings from temperate and tropical forests. *New Phytologist*, 186(2), 439–450. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03181.x>
- [172] McMahon, P. (2012). Effect of Nutrition and Soil Function on Pathogens of Tropical Tree Crops. *Plant Pathology*, 243–272. <https://doi.org/10.5772/32490>
- [173] Messaoudène, M., Tafer, M., Loukkas, A., & Marchal, R. (2008). Propriétés physiques du bois de chêne zéen de la forêt des Aït Ghobri (Algérie). *Bois et Forêts Des Tropiques*, 298(4), 37–48.
- [174] Meunier, Q., Moubogou, C., & Doucet, J. L. (2015). Les arbres utiles du Gabon. Presses agronomiques de Gembloux.
- [175] Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K., Krause, C., & Wolcott, M. (2008). Effect of Fiber Length on Processing and Properties of Extruded Wood-Fiber/HDPE Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 110(5), 1085–1092. <https://doi.org/10.1002/app.28720>
- [176] Miyoshi, Y., Kojiro, K., & Furuta, Y. (2018). Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension. *Journal of Wood Science*, 64(5), 509–514. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1730-z>

- [177] Modrý, M., Hubený, D., & Rejšek, K. (2004). Differential response of naturally regenerated European shade tolerant tree species to soil type and light availability. *Forest Ecology and Management*, 188(1–3), 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.029>
- [178] Montero, C. (2011). Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
- [179] Montgomery, R. A., & Chazdon, R. L. (2002). Light gradient partitioning by tropical tree seedlings in the absence of canopy gaps. *Oecologia*, 131(2), 165–174. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0872-1>
- [180] Moore, J. R., Cown, D. J., Lee, J. R., McKinley, R. B., Brownlie, R. K., Jones, T. G., & Downes, G. M. (2014). The influence of stem guying on radial growth, stem form and internal resin features in radiata pine. *Trees*, 28, 1197–1207. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1030-1>
- [181] Morel, H., Lehnebach, R., Cigna, J., Ruelle, J., Nicolini, E., & Beauchêne, J. (2018). Basic wood density variations of *Parkia velutina* Benoist, a long-lived heliophilic Neotropical rainforest tree. *Bois et Forêts des Tropiques*, 335(1), 59–69. <https://doi.org/10.19182/bft2018.335.a31518i>
- [182] Mosedale, J. R., Feuillat, F., Baumes, R., Dupouey, J.-L., & Puech, J.-L. (1998). Variability of wood extractives among *Quercus robur* and *Quercus petraea* trees from mixed stands and their relation to wood anatomy and leaf morphology. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(7), 994–1006. <https://doi.org/10.1139/x98-066>
- [183] Moya, R., Tenorio, C., & Meyer, Í. (2012). Influence of wood anatomy on moisture content, shrinkage and during defects in *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. *Scientia Forestalis*, 40(94), 249–258.
- [184] Muller-Landau, H. C. (2004). Interspecific and inter-site variation in wood specific gravity of tropical trees. *Biotropica*, 36(1), 20–32. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2004.tb00292.x>
- [185] NF B51-007 (1985). Essai de compression axiale. *Association Française de Normalisation*.
- [186] NF B51-009 (1985). Essai de flexion dynamique. *Association Française de Normalisation*.
- [187] NF B51-012 (2019). Essai de cisaillement. *Association Française de Normalisation*.
- [188] Niinemets, Ü., & Kull, O. (1998). Stoichiometry of foliar carbon constituents varies along light gradients in temperate woody canopies: Implications for foliage morphological plasticity. *Tree Physiology*, 18(7), 467–479. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.7.467>
- [189] Niinemets, Ü., & Valladares, F. (2004). Photosynthetic acclimation to simultaneous and interacting environmental stresses along natural light gradients: optimality and constraints. *Plant Biology*, 6(03), 254–268. <https://doi.org/10.1055/s-2004-817881>
- [190] Niklas, K. J., & Spatz, H. C. (2010). Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*, 97(10), 1587–1594. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000150>
- [191] Nock, C. A., Geihofer, D., Grabner, M., Baker, P. J., Bunyavejchewin, S., & Hietz, P. (2009). Wood density and its radial variation in six canopy tree species differing in shade-tolerance in western Thailand. *Annals of Botany*, 104(2), 297–306. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp118>
- [192] Normand, D. (1998). Manuel d'identification des bois commerciaux-Tome 1 : Généralités. *Editions Quae*.
- [193] Nourtier, M., Chanzy, A., Cailleret, M., Yingge, X., Huc, R., & Davi, H. (2014). Transpiration of silver Fir (*Abies alba* mill.) during and after drought in relation to soil properties in a Mediterranean mountain area. *Annals of Forest Science*, 71(6), 683–695. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0229-9>
- [194] 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. *Plant Physiology*, 154(2), 555–561. <https://doi.org/10.1104/pp.110.161281>

Références bibliographiques

- [195] O'Brien, S. T., Hubbell, S. P., Spiro, P., Condit, R., & Foster, R. B. (1995). Diameter, height, crown, and age relationships in eight neotropical tree species. *Ecology*, 76(6), 1926–1939. <https://doi.org/10.2307/1940724>
- [196] Oboite, F. O., & Comeau, P. G. (2021). Climate sensitive growth models for predicting diameter growth of western Canadian boreal tree species. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(3), 363–373. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa039>
- [197] Oldeman, R. A. A., & Van Dijk, J. (1991). Diagnosis of the temperament of tropical rain forest trees. In *Rain Forest Regeneration and Management*, 6, 21–65.
- [198] Olson, M. E., Anfodillo, T., Rosell, J. A., Petit, G., Crivellaro, A., Isnard, S., León-Gómez, C., Alvarado-Cárdenas, L. O., & Castorena, M. (2014). Universal hydraulics of the flowering plants: Vessel diameter scales with stem length across angiosperm lineages, habits and climates. *Ecology Letters*, 17(8), 988–997. <https://doi.org/10.1111/ele.12302>
- [199] Olson, M. E., & Rosell, J. A. (2013). Vessel diameter-stem diameter scaling across woody angiosperms and the ecological causes of xylem vessel diameter variation. *New Phytologist*, 197(4), 1204–1213. <https://doi.org/10.1111/nph.12097>
- [200] Olson, M. E., Soriano, D., Rosell, J. A., Anfodillo, T., Donoghue, M. J., Edwards, E. J., ... & Méndez-Alonzo, R. (2018). Plant height and hydraulic vulnerability to drought and cold. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(29), 7551–7556. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721728115>
- [201] Ona, T., Sonoda, T., Itoh, K., & Shibata, M. (1997). Relationship of lignin content, lignin monomeric composition and hemicellulose composition in the same trunk sought by their within-tree variations in *Eucalyptus camaldulensis* and *E. globulus*. *Holzforschung*, 51(5), 396–404. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.5.396>
- [202] ONF (2024). *Stress hydrique et sécheresse : les arbres contraints de s'adapter*. <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/raconte-moi-la-foret/comprendre-la-foret/foret-et-biodiversite/agir-pour-la-biodiversite/+191f::stress-hydrique-et-secheresse-les-arbres-contraints-de-sadapter.html>
- [203] Osunkoya, O. O., Sheng, T. K., Mahmud, N. A., & Damit, N. (2007). Variation in wood density, wood water content, stem growth and mortality among twenty-seven tree species in a tropical rainforest on Borneo Island. *Austral Ecology*, 32(2), 191–201. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2007.01678.x>
- [204] Ouair, D., Megherbi Benali, A., Toumi Benali, F., Thévenon, M.-F., Candelier, K., Pignolet, L., & Gérard, J. (2022). Durabilité naturelle et composition en extractibles du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* du Nord-Ouest de l'Algérie. *Bois & Forêts Des Tropiques*, 350, 57–69. <https://doi.org/10.19182/bft2021.350.a36837>
- [205] Ozaki, Y., Šaši, S., & Jiang, J. H. (2001). How can we unravel complicated near infrared spectra?—Recent progress in spectral analysis methods for resolution enhancement and band assignments in the near infrared region. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 9(2), 63–95. <https://doi.org/10.1255/jnirs.295>
- [206] Özcan, C., & Korkmaz, M. (2019). Determination of relationship between thermal and mechanical properties of wood material. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 47(4), 408–417. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2019.47.4.408>
- [207] Paluch, J. (2024). Site conditions alter spatial influence of overstory on shade-tolerant *Abies alba* Mill. seedlings. *Forest Ecology and Management*, 563, 121974. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121974>
- [208] Pâques, L. E. (2001). Genetic control of heartwood content in larch. *Silvae Genetica*, 50(2), 69–75.
- [209] Paradis, Anne-Hélène & Texier, Nicolas & Lachenaud, Olivier & Bidault, Ehoarn & Boupoya, Archange & Dauby, Gilles & Nguema, Diosdado & Ikabanga, Davy & Akouangou, Eric & Klein, Jan & Stévant, Tariq. (2023). Les écosystèmes menacés du Gabon : les HVC3 forestiers. Première version.. 10.13140/RG.2.2.22716.82567.

- [210] Pavlin, J., Nagel, T. A., Svitok, M., Di Filippo, A., Mikac, S., Keren, S., Dikku, A., Toromani, E., Panayotov, M., Zlatanov, T., Haruta, O., Dorog, S., Chaskovskyy, O., Bače, R., Begović, K., Buechling, A., Dušátko, M., Frankovič, M., Janda, P., ... Svoboda, M. (2024). Pathways and drivers of canopy accession across primary temperate forests of Europe. *Science of the Total Environment*, 906, 167593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167593>
- [211] Peltola, H., Kilpeläinen, A., & Kellomäki, S. (2002). Diameter growth of Scots pine (*Pinus sylvestris*) trees grown at elevated temperature and carbon dioxide concentration under boreal conditions. *Tree Physiology*, 22(14), 963–972. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.14.963>
- [212] Peltola, H., Miina, J., Rouvinen, I., & Kellomäki, S. (2002). Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine. *Silva Fennica*, 36(4), 813–825. <https://doi.org/10.14214/sf.523>
- [213] Petrovska, R., Bugmann, H., Hobi, M. L., Ghosh, S., & Brang, P. (2022). Survival time and mortality rate of regeneration in the deep shade of a primeval beech forest. *European Journal of Forest Research*, 141(1), 43–58. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01427-3>
- [214] Pfautsch, S., Harbusch, M., Wesolowski, A., Smith, R., Macfarlane, C., Tjoelker, M. G., Reich, P. B., & Adams, M. A. (2016). Climate determines vascular traits in the ecologically diverse genus *Eucalyptus*. *Ecology Letters*, 19(3), 240–248. <https://doi.org/10.1111/ele.12559>
- [215] Pittermann, J., & Sperry, J. S. (2006). Analysis of freeze-thaw embolism in conifers. The interaction between cavitation pressure and tracheid size. *Plant Physiology*, 140(1), 374–382. <https://doi.org/10.1104/pp.105.067900>
- [216] Placet, V., Bouali, A., Garcin, C., Cote, J., & Perre, P. (2011). Suivi par DRX des réarrangements microstructuraux induits par sollicitations mécaniques dans les fibres végétales tirées du chanvre. In *CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- [217] Pliura, A., Yu, Q., Zhang, S. Y., MacKay, J., Périnet, P., & Bousquet, J. (2005). Variation in wood density and shrinkage and their relationship to growth of selected young poplar hybrid crosses. *Forest Science*, 51(5), 472–482. <https://doi.org/10.1093/forestscience/51.5.472>
- [218] Poorter, L., & Bongers, F. (2006). Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species. *Ecology*, 87(7), 1733–1743. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1733:LTAGPO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1733:LTAGPO]2.0.CO;2)
- [219] Poorter, L., & Kitajima, K. (2007). Carbohydrate storage and light requirements of tropical moist and dry forest tree species. *Ecology*, 88(4), 1000–1011. <https://doi.org/10.1890/06-0984>
- [220] Poorter, L., Lianes, E., Moreno-de las Heras, M., & Zavala, M. A. (2012). Architecture of Iberian canopy tree species in relation to wood density, shade tolerance and climate. *Plant Ecology*, 213(5), 707–722. <https://doi.org/10.1007/s11258-012-0032-6>
- [221] Poorter, L., McDonald, I., Alarcón, A., Fichtler, E., Licona, J. C., Peña-Claros, M., Sterck, F., Villegas, Z., & Sass-Klaassen, U. (2010). The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist*, 185(2), 481–492. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092.x>
- [222] Poorter, L., & Rose, S. A. (2005). Light-dependent changes in the relationship between seed mass and seedling traits: A meta-analysis for rain forest tree species. *Oecologia*, 142(3), 378–387. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1732-y>
- [223] Portsmouth, A., & Niinemets, Ü. (2007). Structural and physiological plasticity in response to light and nutrients in five temperate deciduous woody species of contrasting shade tolerance. *Functional Ecology*, 21(1), 61–77. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2006.01208.x>
- [224] Prat, R., & Moreau, F. (2001). La photosynthèse : généralités. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/manipulations-en-svt/la-photosynthese-generalites>

Références bibliographiques

- [225] Pratt, R. B., Jacobsen, A. L., Ewers, F. W., & Davis, S. D. (2007). Relationships among xylem transport, biomechanics and storage in stems and roots of nine Rhamnaceae species of the California chaparral. *New Phytologist*, 174(4), 787–798. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02061.x>
- [226] Preston, K. A., Cornwell, W. K., & DeNoyer, J. L. (2006). Wood density and vessel traits as distinct correlates of ecological strategy in 51 California coast range angiosperms. *New Phytologist*, 170(4), 807–818. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01712.x>
- [227] Quine, C. P. (2001). A preliminary survey of regeneration of Sitka spruce in wind-formed gaps in British planted forests. *Forest Ecology and Management*, 151(1–3), 37–42. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00694-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00694-0)
- [228] Ranade, S. S., Seipel, G., Gorzsás, A., & García-Gil, M. R. (2022). Adaptive strategies of Scots pine under shade: Increase in lignin synthesis and ecotypic variation in defense-related gene expression. *Physiologia Plantarum*, 174(5), 1–9. <https://doi.org/10.1111/ppl.13792>
- [229] Rasmann, S., Pellissier, L., Defosse, E., Jactel, H., & Kunstler, G. (2014). Climate-driven change in plant-insect interactions along elevation gradients. *Functional Ecology*, 28(1), 46–54. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12135>
- [230] Read, J., Evans, R., Sanson, G. D., Kerr, S., & Jaffré, T. (2011). Wood properties and trunk allometry of co-occurring rainforest canopy trees in a cyclone-prone environment. *American Journal of Botany*, 98(11), 1762–1772. <https://doi.org/10.3732/ajb.1100080>
- [231] Rodríguez, M. (2010). Évolution et organisation spatiale de la dynamique vibratoire des arbres au cours de leur développement (Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique X).
- [232] Román-Dañobeytia, F., Cabanillas, F., Lefebvre, D., Farfan, J., Alferez, J., Polo-Villanueva, F., Llacsahuanga, J., Vega, C. M., Velasquez, M., Corvera, R., Condori, E., Ascorra, C., Fernandez, L. E., & Silman, M. R. (2021). Survival and early growth of 51 tropical tree species in areas degraded by artisanal gold mining in the Peruvian Amazon. *Ecological Engineering*, 159, 106097. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106097>
- [233] Rosell, J. A., Olson, M. E., & Anfodillo, T. (2017). Scaling of xylem vessel diameter with plant size: causes, predictions, and outstanding questions. *Current Forestry Reports*, 3, 46–59. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0049-0>
- [234] Ruelle, J. (2006). Analyse de la diversité du bois de tension de 3 espèces d'angiospermes de forêt tropicale humide de Guyane française (Doctoral dissertation, Antilles-Guyane).
- [235] Rüger, N., Berger, U., Hubbell, S. P., Vieilledent, G., & Condit, R. (2011). Growth strategies of tropical tree species: Disentangling light and size effects. *PLoS ONE*, 6(9), e25330. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025330>
- [236] Rüger, N., Condit, R., Dent, D. H., Dewalt, S. J., Hubbell, S. P., Lichstein, J. W., Lopez, O. R., Wirth, C., & Farrior, C. E. (2020). Demographic trade-offs predict tropical forest dynamics. *Science*, 368(6487), 165–168.
- [237] Rüger, N., Wirth, C., Wright, S. J., & Condit, R. (2012). Functional traits explain light and size response of growth rates in tropical tree species. *Ecology*, 93(12), 2626–2636. <https://doi.org/10.1890/12-0622.1>
- [238] Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Feria-Reyes, R., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2019). Wood Chemical Composition of Five Tree Species from Oaxaca, Mexico. *BioResources*, 14(4), 9826–9839.
- [239] Ruiz-Aquino, F., González-Peña, M. M., Valdez-Hernández, J. I., Romero-Manzanares, A., & Fuentes-Salinas, M. (2018). Mechanical properties of wood of two Mexican oaks: relationship to selected physical properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 69–77. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1168-9>

- [240] Rungwattana, K., & Hietz, P. (2018). Radial variation of wood functional traits reflect size-related adaptations of tree mechanics and hydraulics. *Functional Ecology*, 32(2), 260–272. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12970>
- [241] Russo, S. E., Jenkins, K. L., Wiser, S. K., Uriarte, M., Duncan, R. P., & Coomes, D. A. (2010). Interspecific relationships among growth, mortality and xylem traits of woody species from New Zealand. *Functional Ecology*, 24(2), 253–262. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01670.x>
- [242] Saatchi, S., Longo, M., Xu, L., Wilson, S. N., Brumby, S., & Elmore, A. C. (2021). Detecting vulnerability of humid tropical forests to multiple stressors. *One Earth*, 4(7), 988–1003. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.06.002>
- [243] Salih, E. Y., Fyhrquist, P., Abdalla, A. M., Abdelgadir, A. Y., Kanninen, M., Sipi, M., ... & Ali, H. A. (2017). LC-MS/MS tandem mass spectrometry for analysis of phenolic compounds and pentacyclic triterpenes in antifungal extracts of *Terminalia brownii* (Fresen). *Antibiotics*, 6(4), 37. <https://doi.org/10.3390/antibiotics6040037>
- [244] Sallenave, P. (1955). Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'union française. Centre Technique Forestier Tropical.
- [245] Sallenave, P. (1964). Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux. Centre Technique Forestier Tropical.
- [246] Sallenave, P. (1971). Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux. Centre Technique Forestier Tropical.
- [247] Sandak, J., Sandak, A., & Meder, R. (2016). Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: Hints and tips. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 24(6), 485–505. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1255>
- [248] Saputra, H., Simonsen, J., & Li, K. (2004). Effect of extractives on the flexural properties of wood/plastic composites. *Composite Interfaces*, 11(7), 515–524. <https://doi.org/10.1163/1568554042722964>
- [249] Savitzky, A., & Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, 36(8), 1627–1639.
- [250] Schindler, D., Bauhus, J., & Mayer, H. (2012). Wind effects on trees. *European Journal of Forest Research*, 131(1), 159–163. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0582-5>
- [251] Schmitt, S., Tysklind, N., Heuertz, M., & Hérault, B. (2022). Selection in space and time: Individual tree growth is adapted to tropical forest gap dynamics. *Molecular Ecology*. <https://doi.org/10.1111/mec.16392>
- [252] Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675.
- [253] Schöngart, J., Orthmann, B., Hennenberg, K. J., Porembski, S., & Worbes, M. (2006). Climate-growth relationships of tropical tree species in West Africa and their potential for climate reconstruction. *Global Change Biology*, 12(7), 1139–1150. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01154.x>
- [254] Schwanninger, M., Rodrigues, J. C., & 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. <https://doi.org/10.1255/jnirs.955>
- [255] Searson, M. J., Thomas, D. S., Montagu, K. D., & Conroy, J. P. (2004). Wood, density and anatomy of water-limited eucalypts. *Tree Physiology*, 24(11), 1295–1302. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.11.1295>
- [256] Sekhar, A. C., & Rajput, S. S. (1967). Some studies on the shrinkage behaviour of wood. *Wood Science and Technology*, 1(2), 99–108. <https://doi.org/10.1007/BF00353382>
- [257] Senft, J. F., & Bendtsen, B. A. (1985). Measuring microfibrillar angles using light microscopy. *Wood and Fiber Science*, 17(4), 564–567.

Références bibliographiques

- [258] Shebani, A. N., Reenen, A. J. Van, & Meincken, M. (2008). The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta*, 471(1-2), 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.02.020>
- [259] Sheng-zuo, F., Wen-zhong, Y., & Xiang-xiang, F. (2004). Variation of microfibril angle and its correlation to wood properties in poplars. *Journal of Forestry Research*, 15(4), 261–267. <https://doi.org/10.1007/bf02844949>
- [260] Sheshmani, S., Ashori, A., & Farhani, F. (2012). Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(5), 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/app>
- [261] Sillett, S. C., Van Pelt, R., Koch, G. W., Ambrose, A. R., Carroll, A. L., Antoine, M. E., & Mifsud, B. M. (2010). Increasing wood production through old age in tall trees. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 976–994. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.003>
- [262] Simpson, W. (1991). Properties of wood related to drying. *Dry kiln operator's manual handbook*.
- [263] Smith, V. C., & Ennos, A. R. (2003). The effects of air flow and stem flexure on the mechanical and hydraulic properties of the stems of sunflowers *Helianthus annuus* L. *Journal of Experimental Botany*, 54(383), 845-849.
- [264] Sperry, J. S., Hacke, U. G., & Pittermann, J. (2006). Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *American Journal of Botany*, 93(10), 1490–1500. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1490>
- [265] Sterck, F. J., & Bongers, F. (1998). Ontogenetic changes in size, allometry, and mechanical design of tropical rain forest trees. *American Journal of Botany*, 85(2), 266–272. <https://doi.org/10.2307/2446315>
- [266] Stevanovic, T., & Perrin, D. (2009). Stevanovic, T., & Perrin, D. (2009). Chimie du bois, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [267] Stokes, A., Fitter, A. H., & Courts, M. P. (1995). Responses of young trees to wind and shading: Effects on root architecture. *Journal of Experimental Botany*, 46(9), 1139–1146. <https://doi.org/10.1093/jxb/46.9.1139>
- [268] Swaine, M. D., & Whitmore, T. C. (1988). On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. *Vegetatio*, 75, 81-86.
- [269] Takahashi, Y., Ishiguri, F., Nezu, I., Endo, R., Kobayashi, S., Tanabe, J., ..., & Yokota, S. (2023). Sawn-timber quality of six half-sib families of hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* (Siebold et Zucc.) Endl.). *Wood Material Science & Engineering*, 18(4), 1163–1170. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2113139>
- [270] Taylor, A. M., Gartner, B. L., & Morrell, J. J. (2002). Heartwood formation and natural durability-a review. *Wood and Fiber Science*, 34(4), pp. 587–611.
- [271] Telewski, F. W. (1989). Structure and function of flexure wood in *Abies fraseri*. *Tree Physiology*, 5(1), 113-121. <https://doi.org/10.1093/treephys/5.1.113>
- [272] Tenenhaus, M., Gauchi, J.-P., & Ménardo, C. (1995). *Revue de statistique appliquée, tome 43. 1*, 7–63.
- [273] Tenius Ribeiro, J. C., Nunes-Freitas, A. F., Fidalgo, E. C. C., & Uzêda, M. C. (2019). Forest fragmentation and impacts of intensive agriculture: Responses from different tree functional groups. *PLoS One*, 14(8), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212725>
- [274] Thibaut, B., & Gril, J. (2021). Tree growth forces and wood properties. *Peer Community Journal*, vol. 1.

- [275] Thomas, S. C. (1996). Asymptotic height as a predictor of growth and allometric characteristics in Malaysian rain forest trees. *American Journal of Botany*, 83(5), 556–566. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1996.tb12739.x>
- [276] Todaro, L., Rita, A., Pucciariello, R., Mecca, M., & Hiziroglu, S. (2018). Influence of thermo-vacuum treatment on thermal degradation of various wood species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(2), 541–547. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1230-7>
- [277] Todorova, M., Bardarov, N., Todorov, V., & Pancheva, T. (2023). Factors influencing of shrinkage processes in wood -an.
- [278] Tognetti, V. B., Bielach, A., & Hrtyan, M. (2017). Redox regulation at the site of primary growth: Auxin, cytokinin and ROS crosstalk. *Plant Cell and Environment*, 40(11), 2586–2605. <https://doi.org/10.1111/pce.13021>
- [279] Toong, W., Ratnasingam, J., Mohamad Roslan, M. K., & Halis, R. (2014). The prediction of wood properties from anatomical characteristics: The case of common commercial Malaysian timbers. *BioResources*, 9(3), 5184–5197. <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.5184-5197>
- [280] Tropix (7). Caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées. <https://tropix.cirad.fr/fiches-disponibles>
- [281] Trouy, M. C. (2015). Anatomie du bois: Formation, fonctions et identification. Éditions Quae.
- [282] Tsuchikawa, S., & Kobori, H. (2015). A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science*, 61(3), 213–220. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>
- [283] Tsuchikawa, S., & Tsutsumi, S. (1998). Adsorptive and capillary condensed water in biological material. *Journal of materials science letters*, 17(8), 661–663. <https://doi.org/10.1023/A:1006672324163>
- [284] Tyree, M. T., & Zimmermann, M. H. (2013). Xylem structure and the ascent of sap. *Springer Science & Business Media*.
- [285] Uetimane, E., & Ali, A. C. (2011). Relationship between mechanical properties and selected anatomical features of *ntholo*:(*pseudolachnostylis maprounaefolia*). *Journal of Tropical Forest Science*, 23(2), 166–176.
- [286] Van Gelder, H. A., Poorter, L., & Sterck, F. J. (2006). Wood mechanics, allometry, and life-history variation in a tropical rain forest tree community. *New Phytologist*, 171(2), 367–378. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01757.x>
- [287] Veneklaas, E., & Poorter, L. (1998). Growth and carbon partitioning of tropical tree seedlings in contrasting light environments. *Inherent variation in plant growth: physiological mechanisms and ecological consequences*, 337–362.
- [288] Villagra, M., Campanello, P. I., Montti, L., & Goldstein, G. (2013). Removal of nutrient limitations in forest gaps enhances growth rate and resistance to cavitation in subtropical canopy tree species differing in shade tolerance. *Tree Physiology*, 33(3), 285–296. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt003>
- [289] Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15559.x>
- [290] Voelker, S. L., Lachenbruch, B., Meinzer, F. C., & Strauss, S. H. (2011). Reduced wood stiffness and strength, and altered stem form, in young antisense 4CL transgenic poplars with reduced lignin contents. *New Phytologist*, 189(4), 1096–1109. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03572.x>

Références bibliographiques

- [291] Wang, Q., Xiao, S., & Shi, S. Q. (2019). The effect of hemicellulose content on mechanical strength, thermal stability, and water resistance of cellulose-rich fiber material from poplar. *BioResources*, 14(3), 5288–5300. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.5288-5300>
- [292] Wheeler, E. A., Baas, P., & Gasson, P. E. (1989). Iawa List of Microscopic Features for Hardwood identification. *AIWA Bulletin n.S.*, 10(3), 219–332.
- [293] Whitmore, T. C. (1989). Canopy gaps and the two major groups of forest trees. *Ecology*, 70(3), 536–538. <https://doi.org/10.2307/1940195>
- [294] Wiedenhoft, A. C., & Miller, R. B. (2005). Structure and function of wood. *Handbook of wood chemistry and wood composites*, 9–33.
- [295] Wiemann, M. C. (2007). *Estimating Janka hardness from specific gravity for tropical and temperate species* (No. 643). US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- [296] Wink, M. (2010). Introduction: Biochemistry, Physiology and Ecological Functions of Secondary Metabolites. *Biochemistry of Plant Secondary Metabolism: Second Edition*, 40, 1–19. <https://doi.org/10.1002/9781444320503.ch1>
- [297] Wolenski, A. R. V., Peixoto, R. G., Aquino, V. B. de M., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., & Panzera, T. H. (2020). Evaluation of mechanical strengths of tropical hardwoods: proposal of probabilistic models. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(4), 757–766. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01521-0>
- [298] Wood, L. W. (1960). Variation of strength properties in woods used for structural purposes.
- [299] Woodcock, D., & Shier, A. (2002). Wood specific gravity and its radial variations: The many ways to make a tree. *Trees - Structure and Function*, 16(6), 437–443. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0173-7>
- [300] Workman, J., & Weyer, L. (2008). Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy. CRC Press.
- [301] Wu, S., Xu, J., Li, G., Risto, V., Du, Z., Lu, Z., Li, B., & Wang, W. (2011). Genotypic variation in wood properties and growth traits of Eucalyptus hybrid clones in southern China. *New Forests*, 42(1), 35–50. <https://doi.org/10.1007/s11056-010-9235-7>
- [302] Xing, S., Cheng, X., Kang, F., Wang, J., Yan, J., & Han, H. (2022). The patterns of N/P/K stoichiometry in the *Quercus wutaishanica* community among different life forms and organs and their responses to environmental factors in northern China. *Ecological Indicators*, 137, 108783. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108783>
- [303] Xu, P., Liu, H., Donaldson, L. A., & Zhang, Y. (2011). Mechanical performance and cellulose microfibrils in wood with high S2 microfibril angles. *Journal of Materials Science*, 46(2), 534–540. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-5000-8>
- [304] Yam, K. L., Gogoi, B. K., Lai, C. C., & Selke, S. E. (1990). Composites from compounding wood fibers with recycled high density polyethylene. *Polymer Engineering & Science*, 30(11), 693–699. <https://doi.org/10.1002/pen.760301109>
- [305] Yang, J. L., & Evans, R. (2003). Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61, 449–452. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0424-3>
- [306] Yang, S. Y., Eom, C. D., Han, Y., Chang, Y., Park, Y., Lee, J. J., Choi, J. W., & Yeo, H. (2014). Near-infrared spectroscopic analysis for classification of water molecules in wood by a theory of water mixtures. *Wood and Fiber Science*, 46(2), 138–147.
- [307] Yang, N., Ren, J., Dai, S., Wang, K., Leung, M., Lu, Y., ... & Li, N. (2024). The Quantitative Biotinylproteomics Studies Reveal a WInd-Related Kinase 1 (Raf-Like Kinase 36) Functioning as an Early Signaling Component in Wind-Induced Thigmomorphogenesis and Gravitropism. *Molecular & Cellular Proteomics*, 23(3), 100738.

Références bibliographiques

- [308] Ye, X., Wang, F., Hu, X., Lin, Y., Sun, R., Liang, X., & Chen, F. (2022). Experimental Approach Alters N and P Addition Effects on Leaf Traits and Growth Rate of Subtropical *Schima superba* (Reinw. ex Blume) Seedlings. *Forests*, *13*(2), 141. <https://doi.org/10.3390/f13020141>
- [309] Yin, S., Xiao, Z., Zhao, G., Zhao, X., Sun, X., Zhang, Y., Wang, F., Li, S., Zhao, X., & Qu, G. Z. (2017). Variation analyses of growth and wood properties of *Larix olgensis* clones in China. *Journal of Forestry Research*, *28*(4), 687–697. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0359-2>
- [310] Zach, A., Schuldt, B., Brix, S., Horna, V., Culmsee, H., & Leuschner, C. (2010). Vessel diameter and xylem hydraulic conductivity increase with tree height in tropical rainforest trees in Sulawesi, Indonesia. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, *205*(8), 506–512. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2009.12.008>
- [311] Zhao, D., Yu, H., Bao, X., Liu, J., Yuan, H., Wang, Y., & Xue, Z. (2020). Effects of Removal of Extractives on the Chemical Composition and Mechanical Properties of Wood. *BioResources*, *15*(4), 8631–8647. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8631-8647>
- [312] Zimmermann, M. H., & Brown, C. L. (1971). *Trees, Structure and function*.
- [313] Zue Ondo, J. L., Ruelle, J., Dlouhá, J., & Fournier, M. (2021). Characterisation and variability of physical and structural properties of kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, and okoumé, *Aucoumea klaineana*, wood from natural forests in Gabon. *Bois et Forêts Des Tropiques*, *347*, 41–57. <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31939>

Annexe

A. Statistiques descriptives par espèces

Tableau A.1 : Statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques de la base de données du CIRAD en fonction des espèces. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation et NA : données manquantes.

Temp	Espèces	Propriétés																							
		ρ (kg/m ³)			R_v (%)			R_T (%)			R_R (%)			R_T/R_R			σ' (MPa)			σ_r (MPa)			τ (MPa)		
		m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
Pionnier (P)	<i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	563	40.4	7	14.6	1.1	8	9.8	0.6	6	4.7	0.5	10	2.1	0.1	4	38	9.15	24	78.6	13.5	17	6.4	2.2	34
	^S <i>Antrocaryon klaineum</i> Pierre	620	NA	NA	13.3	NA	NA	7.8	NA	NA	5.5	NA	NA	1.4	NA	NA	44	NA	NA	86.9	NA	NA	6.70	NA	NA
	^{P1} <i>Aucoumea klaineana</i> Pierre	450	0	0	10.5	0.4	3	6.4	0.1	1	4.10	0.4	10	1.6	0.2	11	37.7	5.4	14	73.4	6.7	9	6.1	1.3	21
	^S <i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	350.00	0.00	0	9.90	2.26	23	6.75	1.34	20	3.15	0.92	29	2.17	0.21	10	29.30	5.94	20	58.35	3.75	6	3.90	0.42	11
	^S <i>Croton oligandrus</i> Pierre	683	22.2	3	12.2	0.6	5	8.28	0.4	5	3.9	0.2	5	2.1	0.1	3	53.1	4.70	9	137	4.50	3	10.1	1.7	17
	^S <i>Cylicodiscus gabunensis</i> Harms	916	78.93	9	13.78	1.61	12	7.94	1.10	14	5.84	0.67	11	1.36	0.15	11	80.56	6.05	8	145.50	18.68	13	10.34	2.44	24
	^{P2} <i>Detarium macrocarpum</i> Harms	646.67	25.17	4	9.23	1.30	14	5.47	0.81	15	3.77	0.50	13	1.45	0.06	4	49.10	2.14	4	99.37	7.07	7	8.40	1.22	14
	^S <i>Discoglypemma caloneura</i> Prain	393.33	15.28	4	8.47	0.80	9	6.20	0.75	12	2.27	0.06	3	2.73	0.28	10	27.77	3.90	14	57.90	6.38	11	5.00	0.78	16
	^{P2} <i>Erythrophleum ivorense</i> A.Chev.	937.50	38.62	4	14.58	2.14	15	8.75	0.89	10	5.83	1.42	24	1.56	0.36	23	81.33	6.60	8	158.03	20.49	13	8.63	1.24	14
	^S <i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	490.00	NA	NA	8.90	NA	NA	5.90	NA	NA	3.00	NA	NA	1.97	NA	NA	34.10	NA	NA	53.20	NA	NA	4.70	NA	NA
	^S <i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre	1056.67	50.33	5	17.10	1.21	7	9.50	0.46	5	7.60	1.21	16	1.27	0.23	18	87.10	3.86	4	176.70	12.30	7	16.07	2.06	13
	^{P2} <i>Lophira alata</i> Banks	1140.00	NA	NA	19.40	NA	NA	11.00	NA	NA	8.40	NA	NA	1.31	NA	NA	105.00	NA	NA	227.00	NA	NA	13.80	NA	NA
	^{P2} <i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C.C.Berg	620.00	NA	NA	8.90	NA	NA	5.20	NA	NA	3.70	NA	NA	1.41	NA	NA	58.30	NA	NA	98.20	NA	NA	5.40	NA	NA
	^{P2} <i>Nauclea diderrichii</i> Merr.	780.00	NA	NA	13.10	NA	NA	8.50	NA	NA	4.60	NA	NA	1.85	NA	NA	59.40	NA	NA	103.40	NA	NA	8.50	NA	NA
	^{P2} <i>Testulea gabonensis</i> Pellegr.	750.00	NA	NA	12.90	NA	NA	8.70	NA	NA	4.20	NA	NA	2.07	NA	NA	68.00	NA	NA	120.60	NA	NA	10.70	NA	NA
^S <i>Xylopia aethiopica</i> A.Rich.	640.00	68.56	11	12.34	1.09	9	7.88	0.61	8	4.46	0.53	12	1.78	0.13	7	59.68	2.41	4	130.18	13.05	10	5.86	2.40	41	
Hém. i. hémico	<i>Anthonia fragrans</i> Exell et Hillcoat	750.00	NA	NA	11.10	NA	NA	7.80	NA	NA	3.30	NA	NA	2.36	NA	NA	65.70	NA	NA	144.70	NA	NA	8.30	NA	NA

Annexe

	<i>P²Baillonella toxisperma</i> Pierre	870.00	NA	NA	15.20	NA	NA	8.70	NA	NA	6.50	NA	NA	1.34	NA	NA	72.00	NA	NA	167.10	NA	NA	13.50	NA	NA	
	<i>S⁵Brachystegia laurentii</i> Louis	590.00	NA	NA	7.70	NA	NA	4.80	NA	NA	2.90	NA	NA	1.66	NA	NA	48.90	NA	NA	89.00	NA	NA	5.30	NA	NA	
	<i>P²Celtis tessmannii</i> Rendle	724.00	47.22	7	10.80	1.93	18	6.86	1.21	18	3.94	0.74	19	1.75	0.10	5	63.78	3.36	5	130.94	11.62	9	7.10	1.16	16	
	<i>P¹Dacryodes buetneri</i> H.J.Lam	575.56	22.42	4	12.68	1.19	9	7.42	0.71	10	5.26	0.59	11	1.42	0.12	8	51.38	5.36	10	99.26	11.35	11	6.97	0.93	13	
	<i>P²Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	587.14	37.29	6	12.40	1.33	11	7.80	0.86	11	4.60	0.60	13	1.71	0.18	11	47.81	6.64	14	95.01	8.93	9	6.36	1.33	21	
	<i>S⁵Erismadelphus exsul</i> Mildbr.	800.00	NA	NA	19.30	NA	NA	12.20	NA	NA	7.10	NA	NA	1.72	NA	NA	59.60	NA	NA	127.30	NA	NA	5.50	NA	NA	
	<i>S⁵Gilbertiodendron brachystegioides</i> J.Leon.	710.00	NA	NA	13.70	NA	NA	9.20	NA	NA	4.50	NA	NA	2.04	NA	NA	59.90	NA	NA	121.10	NA	NA	7.70	NA	NA	
	<i>P²Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	490.00	NA	NA	7.50	NA	NA	5.30	NA	NA	2.20	NA	NA	2.41	NA	NA	37.10	NA	NA	76.20	NA	NA	5.80	NA	NA	
	<i>P²Guibourtia ehie</i> J.Leon.	833.75	47.79	6	12.16	1.90	16	8.05	1.33	16	4.11	0.63	15	1.96	0.16	8	68.45	9.90	14	142.60	20.09	14	11.24	2.03	18	
	<i>P²Guibourtia tessmannii</i> J.Leon.	910.00	NA	NA	17.00	NA	NA	9.50	NA	NA	7.50	NA	NA	1.27	NA	NA	66.70	NA	NA	131.70	NA	NA	9.30	NA	NA	
	<i>S⁵Parkia bicolor</i> A.Chev.	570.00	NA	NA	13.40	NA	NA	8.40	NA	NA	5.00	NA	NA	1.68	NA	NA	38.90	NA	NA	88.90	NA	NA	7.50	NA	NA	
	<i>P²Piptadeniastrum africanum</i> Brenan	705.00	59.16	8	12.83	0.46	4	9.03	0.46	5	3.80	0.49	13	2.41	0.37	15	58.28	8.87	15	123.30	12.52	10	12.10	3.04	25	
	<i>S⁵Poga oleosa</i> Pierre	510.00	NA	NA	9.90	NA	NA	6.90	NA	NA	3.00	NA	NA	2.30	NA	NA	40.60	NA	NA	80.00	NA	NA	7.50	NA	NA	
	<i>P²Pterocarpus soyauxii</i> Taub.	760.00	NA	NA	9.20	NA	NA	5.50	NA	NA	3.70	NA	NA	1.49	NA	NA	74.20	NA	NA	151.10	NA	NA	7.70	NA	NA	
	<i>P²Pycnanthus angolensis</i> Warb.	650.00	NA	NA	13.60	NA	NA	8.30	NA	NA	5.30	NA	NA	1.57	NA	NA	56.40	NA	NA	102.80	NA	NA	6.60	NA	NA	
	<i>S⁵Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	880.00	NA	NA	14.60	NA	NA	9.10	NA	NA	5.50	NA	NA	1.65	NA	NA	105.00	NA	NA	185.10	NA	NA	10.00	NA	NA	
	<i>S⁵Scyphocephalum mannii</i> Warb.	574.29	105.96	18	9.40	1.54	16	5.96	1.15	19	3.44	0.56	16	1.75	0.30	17	41.00	10.70	26	79.03	11.89	15	5.67	1.47	26	
	Tolérant à l'ombre (TO)	<i>S⁵Beilschmiedia spp.</i> Nees	730.00	24.49	3	11.95	1.70	14	7.98	1.40	18	3.98	0.33	8	2.00	0.23	12	53.88	6.54	12	113.05	13.04	12	10.50	1.78	17
		<i>P²Berlinia bracteosa</i> Benth.	610.00	NA	NA	9.60	NA	NA	6.90	NA	NA	2.70	NA	NA	2.56	NA	NA	55.30	NA	NA	98.90	NA	NA	7.70	NA	NA
		<i>P²Coelocaryon preussii</i> Warb.	505.00	49.70	10	10.35	1.30	13	6.65	0.68	10	3.70	0.82	22	1.86	0.38	21	36.60	8.04	22	78.03	13.56	17	6.52	1.97	30
<i>P²Dacryodes igaganga</i> Aubrev. et Pellegr.		616.67	24.22	4	12.78	1.26	10	7.85	0.73	9	4.93	0.67	14	1.61	0.17	11	55.57	3.05	5	101.80	6.70	7	9.15	2.69	29	
<i>P²Daniellia soyauxii</i> Rolfe		570.00	NA	NA	10.20	NA	NA	6.60	NA	NA	3.60	NA	NA	1.83	NA	NA	29.80	NA	NA	70.30	NA	NA	5.90	NA	NA	
<i>S⁵Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.		1060.00	0.00	0	18.35	0.21	1	11.35	0.07	1	7.00	0.14	2	1.62	0.02	1	89.75	4.45	5	179.90	0.42	0	16.05	1.77	11	
<i>S⁵Dialium pachyphyllum</i> Harms		1030.00	42.43	4	14.90	0.71	5	9.65	0.35	4	5.25	0.35	7	1.84	0.06	3	110.50	7.78	7	208.15	0.92	0	9.85	0.07	1	
<i>P²Gilbertiodendron dewevrei</i> J.Leon.		825.00	80.21	10	13.90	1.09	8	9.18	0.78	8	4.73	0.36	8	1.94	0.09	5	71.60	6.82	10	150.45	22.65	15	11.10	2.26	20	
<i>S⁵Julbernardia pellegriniana</i> Troupin		808.00	65.35	8	13.38	1.53	11	8.96	0.74	8	4.42	0.82	19	2.06	0.26	12	69.88	4.52	6	153.22	15.89	10	12.86	2.19	17	
<i>S⁵Santiria trimera</i> Aubrev.		660.00	NA	NA	11.20	NA	NA	7.40	NA	NA	3.80	NA	NA	1.95	NA	NA	59.90	NA	NA	115.10	NA	NA	6.00	NA	NA	
<i>S⁵Scytopetalum klaineanum</i> Pierre		810.00	84.85	10	14.90	1.84	12	10.05	1.06	11	4.85	0.78	16	2.08	0.12	6	56.40	5.09	9	138.55	23.26	17	10.95	2.19	20	
<i>S⁵Sindoropsis letestui</i> J.Leon.		732.86	73.19	10	10.41	1.70	16	6.80	1.08	16	3.61	0.67	18	1.89	0.17	9	60.24	6.93	12	130.10	20.58	16	9.63	1.59	16	
<i>P²Tetraberlinia bifoliolata</i> Haum.	610	NA	NA	9.7	NA	NA	6	NA	NA	3.7	NA	NA	1.6	NA	NA	45.6	NA	NA	101	NA	NA	5.1	NA	NA		

<i>P²Tieghemella africana</i> Pierre	710	NA	NA	11.5	NA	NA	6.7	NA	NA	4.8	NA	NA	1.4	NA	NA	55.8	NA	NA	109.7	NA	NA	11.5	NA	NA
---	-----	----	----	------	----	----	-----	----	----	-----	----	----	-----	----	----	------	----	----	-------	----	----	------	----	----

Suite des propriétés :

Propriétés

Temp	Espèces	W (J)			Fend (N/mm)			σ_t (MPa)			D			PSF (%)			E_L (MPa)			E_L/ρ (MPa/kg/m ³)		
		m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
Pionnier (P)	<i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	17.33	3.79	22	10.73	0.81	8	1.67	0.23	14	2.00	0.20	10	24.67	5.51	22	10725.67	1084.92	10	19.02	0.67	4
	<i>Antrocaryon klaineum</i> Pierre	22.00	NA	NA	19.10	NA	NA	2.30	NA	NA	1.70	NA	NA	40.00	NA	NA	10791.00	NA	NA	17.40	NA	NA
	<i>Aucoumea klaineana</i> Pierre	12.00	0.00	0	12.50	0.99	8	2.00	0.14	7	1.70	0.28	17	35.50	4.95	14	7357.50	555.08	8	16.35	1.23	8
	<i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	12.50	2.12	17	9.20	3.68	40	1.20	0.00	0	0.85	0.21	25	27.50	2.12	8	7505.00	1456.64	19	21.44	4.16	19
	<i>Croton oligandrus</i> Pierre	42.25	5.91	14	27.03	0.77	3	3.23	0.25	8	4.80	0.75	16	28.25	3.77	13	14837.75	1592.75	11	21.71	1.86	9
	<i>Cylicodiscus gabunensis</i> Harms	37.20	11.19	30	23.96	4.12	17	3.32	0.24	7	9.64	1.68	17	26.20	4.87	19	17736.40	2180.94	12	19.45	2.66	14
	<i>Detarium macrocarpum</i> Harms	24.33	9.50	39	15.03	0.50	3	2.27	0.40	18	3.47	0.31	9	23.67	0.58	2	10529.67	1136.83	11	16.27	1.41	9
	<i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	14.33	2.08	15	8.97	1.27	14	1.53	0.35	23	1.13	0.15	13	28.67	2.89	10	7619.33	749.47	10	19.42	2.42	12
	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.Chev.	37.25	8.34	22	20.75	5.88	28	3.28	0.51	16	11.13	2.23	20	24.75	4.03	16	18001.50	1634.91	9	19.20	1.48	8
	<i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	11.00	NA	NA	11.60	NA	NA	1.70	NA	NA	2.40	NA	NA	24.00	NA	NA	8142.00	NA	NA	16.62	NA	NA
	<i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre	40.67	9.02	22	30.90	0.79	3	4.30	0.17	4	13.60	2.61	19	26.67	4.51	17	20535.67	4220.10	21	19.39	3.67	19
	<i>Lophira alata</i> Banks	70.00	NA	NA	30.10	NA	NA	4.50	NA	NA	18.80	NA	NA	29.00	NA	NA	21974.00	NA	NA	19.28	NA	NA
	<i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C.C.Berg	10.00	NA	NA	12.90	NA	NA	2.00	NA	NA	4.40	NA	NA	24.00	NA	NA	10791.00	NA	NA	17.40	NA	NA
	<i>Nauclea diderrichii</i> Merr.	25.00	NA	NA	15.90	NA	NA	2.40	NA	NA	5.60	NA	NA	29.00	NA	NA	13832.00	NA	NA	17.73	NA	NA
	<i>Testulea gabonensis</i> Pellegr.	14.00	NA	NA	22.10	NA	NA	2.50	NA	NA	5.20	NA	NA	27.00	NA	NA	10497.00	NA	NA	14.00	NA	NA
<i>Xylopia aethiopica</i> A.Rich.	27.40	7.64	28	13.60	3.24	24	2.22	0.40	18	3.90	1.22	31	24.00	2.55	11	15284.00	3187.36	21	23.71	2.63	11	
Hémi-héliophile (HH)	<i>Anthonotha fragrans</i> Exell et Hillcoat	35.00	NA	NA	17.40	NA	NA	3.00	NA	NA	7.20	NA	NA	23.00	NA	NA	13636.00	NA	NA	18.18	NA	NA
	<i>Baillonella toxisperma</i> Pierre	32.00	NA	NA	24.60	NA	NA	4.00	NA	NA	7.80	NA	NA	25.00	NA	NA	18835.00	NA	NA	21.65	NA	NA
	<i>Brachystegia laurentii</i> Louis	26.00	NA	NA	9.90	NA	NA	1.90	NA	NA	2.80	NA	NA	39.00	NA	NA	9025.00	NA	NA	15.30	NA	NA
	<i>Celtis tessmannii</i> Rendle	33.60	7.89	23	15.00	1.91	13	2.44	0.27	11	5.94	1.04	17	26.20	4.97	19	15244.60	2411.88	16	20.99	2.25	11

Annexe

	<i>Dacryodes buetneri</i> H.J.Lam	19.11	3.26	17	16.71	4.32	26	2.44	0.32	13	2.67	0.45	17	32.00	5.70	18	11194.44	1612.88	14	19.50	3.07	16
	<i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	18.00	3.27	18	17.49	2.98	17	2.46	0.41	17	2.91	0.46	16	27.71	4.15	15	11646.00	1885.87	16	19.87	3.26	16
	<i>Erismadelphus exsul</i> Mildbr.	29.00	NA	NA	16.20	NA	NA	1.90	NA	NA	6.50	NA	NA	27.00	NA	NA	18050.00	NA	NA	22.56	NA	NA
	<i>Gilbertiodendron brachystegioides</i> J.Leon.	34.00	NA	NA	15.90	NA	NA	2.90	NA	NA	3.90	NA	NA	23.00	NA	NA	13734.00	NA	NA	19.34	NA	NA
	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	17.00	NA	NA	7.70	NA	NA	1.50	NA	NA	1.70	NA	NA	25.00	NA	NA	8142.00	NA	NA	16.62	NA	NA
	<i>Guibourtia ehie</i> J.Leon.	43.75	6.11	14	26.19	5.23	20	3.50	0.28	8	7.90	2.37	30	24.13	3.76	16	17744.00	2152.28	12	21.34	2.83	13
	<i>Guibourtia tessmannii</i> J.Leon.	31.00	NA	NA	22.80	NA	NA	3.90	NA	NA	7.90	NA	NA	34.00	NA	NA	15206.00	NA	NA	16.71	NA	NA
	<i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	16.00	NA	NA	20.70	NA	NA	2.60	NA	NA	3.10	NA	NA	36.00	NA	NA	11282.00	NA	NA	19.79	NA	NA
	<i>Piptadeniastrum africanum</i> Brenan	35.75	6.24	17	28.85	2.87	10	3.78	0.35	9	4.63	1.21	26	27.50	6.03	22	13488.75	2311.22	17	19.09	2.43	13
	<i>Poga oleosa</i> Pierre	19.00	NA	NA	11.10	NA	NA	2.00	NA	NA	2.20	NA	NA	28.00	NA	NA	8535.00	NA	NA	16.74	NA	NA
	<i>Pterocarpus soyauxii</i> Taub.	32.00	NA	NA	11.30	NA	NA	1.80	NA	NA	8.00	NA	NA	29.00	NA	NA	14126.00	NA	NA	18.59	NA	NA
	<i>Pycnanthus angolensis</i> Warb.	21.00	NA	NA	16.00	NA	NA	2.80	NA	NA	2.90	NA	NA	27.00	NA	NA	12655.00	NA	NA	19.47	NA	NA
	<i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	36.00	NA	NA	22.70	NA	NA	3.30	NA	NA	8.60	NA	NA	40.00	NA	NA	17560.00	NA	NA	19.95	NA	NA
	<i>Scyphocephalum mannii</i> Warb.	11.86	2.54	21	14.06	3.88	28	1.87	0.36	19	3.06	1.64	54	25.00	6.08	24	10931.29	2564.18	23	19.04	3.19	17
Tolérant à l'ombre (TO)	<i>Beilschmiedia spp.</i> Nees	21.25	9.98	47	21.48	3.32	15	2.83	0.35	12	3.93	0.62	16	25.50	2.52	10	12728.25	2069.01	16	17.40	2.51	14
	<i>Berlinia bracteosa</i> Benth.	20.00	NA	NA	15.70	NA	NA	2.30	NA	NA	2.50	NA	NA	30.00	NA	NA	8829.00	NA	NA	14.47	NA	NA
	<i>Coelocaryon preussii</i> Warb.	13.50	5.65	42	15.03	3.76	25	2.07	0.23	11	1.73	0.29	17	27.00	7.16	27	9973.67	2269.98	23	19.59	3.00	15
	<i>Dacryodes iganganga</i> Aubrev. et Pellegr.	19.17	2.86	15	21.58	2.16	10	2.77	0.23	8	3.20	0.82	26	27.00	3.58	13	10643.83	365.67	3	17.27	0.58	3
	<i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe	9.00	NA	NA	17.80	NA	NA	2.00	NA	NA	1.70	NA	NA	25.00	NA	NA	9418.00	NA	NA	16.52	NA	NA
	<i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	55.50	7.78	14	32.20	4.53	14	4.35	0.35	8	10.65	0.78	7	28.50	6.36	22	20454.00	2843.98	14	19.30	2.68	14
	<i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	67.00	4.24	6	25.70	5.80	23	4.00	0.14	4	13.10	2.26	17	23.00	0.00	0	21189.50	970.86	5	20.61	1.79	9
	<i>Gilbertiodendron dewevrei</i> J.Leon.	37.50	8.58	23	18.05	2.11	12	3.08	0.53	17	5.50	1.54	28	27.25	0.96	4	16849.00	1974.09	12	20.41	0.92	5
	<i>Julbernardia pellegriniana</i> Troupin	46.20	11.37	25	29.42	2.86	10	3.80	0.32	9	6.68	0.92	14	25.40	2.70	11	15539.00	2315.66	15	19.29	2.82	15
	<i>Santiria trimera</i> Aubrev.	22	NA	NA	18.3	NA	NA	2.9	NA	NA	3.8	NA	NA	25	NA	NA	13440	NA	NA	20.4	NA	NA
	<i>Scytopetalum klaineanum</i> Pierre	44.5	9.19	21	20.9	4.5	22	3.5	0.7	20	5.7	0.4	7	26.5	0.7	3	16726	1872	11	20.6	0.15	1
	<i>Sindoropsis letestui</i> J.Leon.	35.4	10.1	28	19.6	3.71	19	2.73	0.21	8	5.77	1.62	28	21.7	3.73	17	15079.29	3432.98	23	20.4	3.32	16
	<i>Tetraberlinia bifoliolata</i> Haum.	51	NA	NA	18	NA	NA	2.8	NA	NA	3.5	NA	NA	29	NA	NA	9418	NA	NA	15.4	NA	NA
	<i>Tieghemella africana</i> Pierre	14	NA	NA	26	NA	NA	3	NA	NA	3	NA	NA	24	NA	NA	10104	NA	NA	14	NA	NA

Tableau A.2 : Statistiques descriptives des propriétés physico-mécaniques des nouveaux essais en fonction des espèces. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation.

Temp	Espèces	Propriétés														
		ρ (kg/m ³)			E_L (MPa)			σ' (MPa)			τ (MPa)			W (J)		
		m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
Pionnier (P)	<i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	548.16	46.50	8	13720.06	2534.67	18	42.85	5.82	14	11.56	2.19	19	17.09	6.39	37
	<i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	346.79	37.28	11	10272.46	1756.43	17	32.18	4.22	13	7.82	0.78	10	21.37	10.43	49
	<i>Croton oligandrus</i> Pierre	680.08	35.57	5	16719.08	1196.93	7	56.22	4.16	7	21.33	1.72	8	25.83	15.41	60
	<i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	379.81	27.67	7	9232.58	1022.02	11	30.28	3.52	12	8.33	1.08	13	23.62	14.40	61
	<i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	536.75	33.67	6	9368.30	1223.75	13	39.09	5.18	13	15.52	2.67	17	32.48	15.58	48
	<i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre	1052.72	28.61	3	24755.45	2818.94	11	83.62	7.59	9	27.58	2.46	9	17.05	10.87	64
Hemi-héliophile (HH)	<i>P²Baillonella toxisperma</i> Pierre	822.13	27.58	3	20140.17	1347.19	7	67.44	3.61	5	20.28	1.13	6	20.90	17.01	81
	<i>S⁵Brachystegia laurentii</i> Louis	539.85	19.80	4	10445.43	1287.87	12	43.43	3.37	8	14.79	1.55	11	19.65	16.65	85
	<i>P²Celtis tessmannii</i> Rendle	688.09	17.91	3	15454.25	500.71	3	51.03	3.03	6	19.15	1.14	6	24.95	4.90	20
	<i>P¹Dacryodes buettneri</i> H.J.Lam	617.27	29.29	5	16044.00	1034.36	6	50.45	2.34	5	17.50	0.98	6	42.95	2.97	7
	<i>P²Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	627.95	44.48	7	14467.26	910.25	6	51.52	3.94	8	17.53	1.39	8	19.07	11.14	58
	<i>S⁵Dialium dinklagei</i> Harms	913.93	31.56	3	22808.10	1691.76	7	77.56	3.90	5	26.93	1.09	4	37.39	10.18	27
	<i>S⁵Erismadelphus exsul</i> Mildbr.	756.19	58.50	8	17335.08	4198.29	24	57.13	8.82	15	18.12	2.20	12	30.74	17.92	58
	<i>S⁵Gilbertiodendron brachystegioides</i> J.Leon.	704.33	22.65	3	18969.75	1554.23	8	58.39	3.82	7	17.87	0.88	5	3.91	0.97	25
	<i>P²Gosswailerodendron balsamiferum</i> Harms	467.99	21.38	5	8594.33	1441.87	17	35.28	4.38	12	13.55	0.73	5	13.84	3.75	27
	<i>S⁵Parkia bicolor</i> A.Chev.	594.84	55.86	9	11163.07	1840.23	16	42.74	7.11	17	19.37	2.05	11	21.63	5.30	24
	<i>S⁵Poga oleosa</i> Pierre	496.29	20.14	4	11428.67	840.43	7	40.45	1.53	4	10.05	1.90	19	14.03	6.50	46
	<i>S⁵Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	890.82	31.63	4	21690.80	2718.39	13	74.38	2.06	3	22.34	1.99	9	40.86	5.20	13
	<i>S⁵Scyphocephalum mannii</i> Warb.	570.24	88.70	16	10693.55	2039.86	19	37.46	3.55	9	11.08	2.23	20	15.48	10.31	67
Tolérant à l'ombre (TO)	<i>S⁵Beilschmiedia spp.</i> Nees	711.02	40.68	6	15182.80	3093.28	20	50.47	6.86	14	17.80	1.38	8	22.67	15.00	66
	<i>P²Dacryodes igaganga</i> Aubrev. et Pellegr.	642.07	5.35	1	14722.60	619.71	4	53.46	2.14	4	19.50	1.61	8	29.10	1.95	7
	<i>P²Daniellia soyauxii</i> Rolfe	510.31	18.47	4	10384.24	966.54	9	32.02	2.84	9	11.04	0.97	9	22.53	15.50	69

Annexe

^S <i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	1041.42	20.75	2	27442.17	1085.18	4	85.21	3.77	4	26.56	3.00	11	21.97	3.36	15
^S <i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	997.72	55.93	6	23941.00	2356.25	10	87.71	8.19	9	28.75	3.21	11	19.78	5.59	28
^S <i>Scytopetalum klaineanum</i> Pierre	771.87	35.00	5	17898.29	2005.65	11	62.09	5.01	8	17.38	1.80	10	14.96	6.09	41

Suite des propriétés :

Propriétés

Temp	Espèces	AMF (°)			E _L /ρ (MPa/kg/m ³)			R _R (%)			R _T (%)			R _T /R _R			PSF (%)		
		m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
Pionnier (P)	<i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	9.95	0.80	8	24.95	3.40	14	3.72	1.00	27	7.70	1.26	16	2.25	0.83	37	27.8	1.5	5
	^S <i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	10.19	0.48	5	29.46	2.25	8	2.30	0.25	11	9.36	0.72	8	4.12	0.67	16	22.5	2.1	9
	^S <i>Croton oligandrus</i> Pierre	12.27	1.55	13	24.60	1.57	6	4.01	0.57	14	8.70	1.45	17	2.23	0.55	25	27.0	1.5	6
	^S <i>Discoglypemma caloneura</i> Prain	10.87	2.62	24	24.34	2.41	10	2.31	0.36	15	8.81	1.74	20	3.84	0.64	17	25.7	1.4	6
	^S <i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	14.65	1.59	11	17.44	1.84	11	2.95	0.19	6	8.24	0.66	8	2.80	0.27	9	24.0	0.7	3
	^S <i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre	9.63	0.73	8	23.49	2.30	10	6.78	0.65	10	8.81	0.78	9	1.32	0.20	15	25.2	1.0	4
Hemi-héliophile (HH)	^{P2} <i>Baillonella toxisperma</i> Pierre	10.25	0.48	5	24.48	0.90	4	5.64	0.32	6	5.71	1.20	21	1.02	0.24	24	26.6	1.3	5
	^S <i>Brachystegia laurentii</i> Louis	16.59	2.87	17	19.33	2.16	11	3.68	0.54	15	8.82	1.34	15	2.44	0.46	19	25.2	1.7	7
	^{P2} <i>Celtis tessmannii</i> Rendle	12.80	0.82	6	22.46	0.63	3	3.67	0.38	10	9.15	1.16	13	2.50	0.30	12	27.8	1.2	4
	^{P1} <i>Dacryodes buettneri</i> H.J.Lam	14.38	1.77	12	25.98	0.61	2	4.96	0.20	4	7.63	0.55	7	1.54	0.06	4	26.1	1.2	5
	^{P2} <i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	13.83	1.81	13	23.14	2.01	9	4.31	0.36	8	5.64	0.37	7	1.32	0.14	10	26.1	0.8	3
	^S <i>Dialium dinklagei</i> Harms	10.48	0.41	4	24.93	1.21	5	4.64	0.24	5	6.64	0.85	13	1.44	0.24	16	24.2	0.9	4
	^S <i>Erismadelphus exsul</i> Mildbr.	9.68	0.60	6	22.71	4.16	18	5.52	0.72	13	8.85	0.59	7	1.63	0.23	14	28.8	1.2	4
	^S <i>Gilbertiodendron brachystegioides</i> J.Leon.	9.40	0.32	3	26.92	1.91	7	4.27	0.39	9	6.70	0.38	6	1.58	0.20	12	26.7	2.5	9
	^{P2} <i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	16.09	4.24	26	18.28	2.39	13	2.01	0.13	6	6.89	2.03	29	3.46	1.13	33	24.5	1.8	7
	^S <i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	15.15	2.30	15	18.72	2.01	11	3.92	0.63	16	10.02	1.44	14	2.64	0.67	25	25.7	2.2	9
	^S <i>Poga oleosa</i> Pierre	10.90	1.58	14	23.01	0.86	4	3.08	0.35	12	10.87	0.31	3	3.56	0.35	10	26.3	0.8	3
	^S <i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	10.39	1.03	10	24.30	2.43	10	5.25	0.63	12	11.05	0.48	4	2.13	0.27	13	26.8	0.5	2

Tolérant à l'ombre (TO)	^S <i>Scyphocephalium manni</i> Warb.	13.75	2.60	19	19.26	4.75	25	3.38	0.98	29	6.77	1.25	18	2.12	0.55	26	23.2	4.2	18
	^S <i>Beilschmiedia</i> spp. Nees	12.64	1.88	15	21.24	3.57	17	3.57	0.60	17	8.26	1.72	21	2.41	0.77	32	25.1	1.5	6
	^{P2} <i>Dacryodes igaganga</i> Aubrev. et Pellegr.	16.04	1.34	8	22.93	0.85	4	5.70	0.17	3	7.89	0.38	5	1.39	0.10	7	26.2	0.5	2
	^{P2} <i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe	14.33	2.66	19	20.37	1.99	10	3.02	0.28	9	5.88	0.86	15	1.95	0.30	15	25.0	1.7	7
	^S <i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	9.72	0.29	3	26.35	0.95	4	6.18	0.97	16	7.94	0.42	5	1.32	0.22	17	22.2	2.1	9
	^S <i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	10.67	0.72	7	23.95	1.37	6	4.78	0.53	11	6.00	0.66	11	1.27	0.22	17	24.5	1.3	5
	^S <i>Scytopetalum klaineanum</i> Pierre	10.40	0.90	9	23.18	2.33	10	4.58	0.56	12	7.00	0.99	14	1.55	0.30	19	27.5	0.9	3

Annexe

Tableau A.3 : Statistiques descriptives des caractéristiques anatomiques étudiées en fonction des espèces. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation.

Temp	Espèces	Caractéristiques anatomiques											
		LF (mm)			nb_vais/mm ²			diam_tang_moy_vais (mm)			diam_rad_moy_vais (mm)		
		m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
Pionnier (P)	<i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	2	0.14	7	1	0.2	20	0.3	0.034	11	0.4	0.06	15
	<i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	1	0.12	12	0.9	0.2	22	0.2	0.016	8	0.3	0.02	7
	<i>Croton oligandrus</i> Pierre	2	0.3	15	4.8	1.7	35	0.1	0.031	31	0.2	0.04	20
	<i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	2	0.12	6	2.2	0.5	23	0.2	0.013	7	0.3	0.01	3
	<i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	1	0.09	9	1.9	0.6	32	0.2	0.035	18	0.3	0.03	10
Hémi-héliophile (HH)	<i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	1	0.08	8	5.4	3.1	57	0.1	0.013	13	0.2	0.03	15
	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	2	0.15	8	5.8	1.7	29	0.1	0.006	6	0.2	0.02	10
	<i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	2	0.07	4	2.1	0.4	19	0.2	0.023	12	0.3	0.02	7
	<i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	2	0.05	3	8.3	0.9	11	0.2	0.026	13	0.2	0.04	20
	<i>Scyphocephalum mannii</i> Warb.	2	0.12	6	5.6	3.1	55	0.2	0.012	6	0.2	0.03	15
Tolérant à l'ombre (TO)	<i>Beilschmiedia spp.</i> Nees	2	0.09	5	3.5	0.7	20	0.2	0.039	20	0.2	0.05	25
	<i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe	2	0.09	5	1	0.2	20	0.3	0.023	8	0.3	0.03	10
	<i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	2	0.32	16	3.6	0.7	19	0.2	0.011	6	0.2	0.02	10
	<i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	1	0.06	6	5.6	1.1	20	0.2	0.012	6	0.3	0.02	7
	<i>Scytopetalum klaineianum</i> Pierre	2	0.49	25	4.4	0.9	20	0.2	0.015	8	0.3	0.04	13

Suite des propriétés :

Temp	Espèces	Caractéristiques anatomiques											
		diam_moy_vais (mm)			epais_tang_moy_pari (µm)			epais_rad_moy_pari (µm)			epais_moy_pari (µm)		
		m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
Pionnier (P)	<i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	0.3	0.04	13	5	1.7	34	5	1.6	32	5	1.7	34
	<i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	0.3	0.02	7	2	0.3	15	2	0.3	15	2	0.3	15

	<i>Croton oligandrus</i> Pierre	0.2	0.03	15	3	1	33	3	1	33	3	1	33
	<i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	0.3	0.01	3	3	0.8	27	2	0.2	10	3	0.4	13
	<i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	0.2	0.03	15	2	0.5	25	2	0.6	30	2	0.5	25
Hémi-héliophile (HH)	<i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	0.2	0.02	10	3	0.4	13	3	0.4	13	3	0.4	13
	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	0.2	0.01	5	3	1.9	63	3	1.5	50	3	1.7	57
	<i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	0.2	0.02	10	3	0.4	13	3	0.5	17	3	0.5	17
	<i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	0.2	0.03	15	4	2.1	53	4	1.6	40	4	1.8	45
	<i>Scyphocephalum mannii</i> Warb.	0.2	0.02	10	3	0.6	20	3	0.3	10	3	0.4	13
Tolérant à l'ombre (TO)	<i>Beilschmiedia spp.</i> Nees	0.2	0.04	20	5	0.4	8	6	0.4	7	5	0.4	8
	<i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe	0.3	0.03	10	2	0.4	20	2	0.3	15	2	0.3	15
	<i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	0.2	0.02	10	8	0.6	8	7	0.5	7	7	0.5	7
	<i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	0.2	0.02	10	5	1	20	5	1	20	5	0.9	18
	<i>Scytopetalum klaineanum</i> Pierre	0.2	0.03	15	6	1.5	25	7	2	29	7	1.7	24

Annexe

Tableau A.4 : Statistiques descriptives de la composition chimique des espèces. m : moyenne ; sd : écart-type ; cv : coefficient de variation.

Temp	Espèces	Composition chimique											
		Cellulose (*)			Hémicelluloses (*)			Lignine (*)			Extractibles (*)		
		m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)	m	sd	cv (%)
Pionnier (P)	<i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	-0.0094	0.0008	-8.88	-0.0040	0.0004	-9.27	-0.0046	0.0004	-9.57	-0.0012	0.0003	-26.86
	<i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	-0.0068	0.0003	-4.09	-0.0028	0.0001	-2.77	-0.0037	0.0002	-6.17	-0.0010	0.0001	-13.13
	<i>Croton oligandrus</i> Pierre	-0.0071	0.0006	-7.93	-0.0030	0.0003	-8.72	-0.0036	0.0005	-13.52	-0.0010	0.0003	-34.29
	<i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	-0.0090	0.0005	-5.50	-0.0038	0.0002	-4.82	-0.0050	0.0003	-6.94	-0.0013	0.0002	-16.69
	<i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	-0.0074	0.0002	-3.09	-0.0030	0.0001	-4.66	-0.0037	0.0001	-3.71	-0.0019	0.0002	-8.73
	<i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre	-0.0050	0.0007	-13.36	-0.0019	0.0004	-19.30	-0.0018	0.0003	-17.46	-0.0022	0.0001	-3.38
Hemi-héliophile (HH)	<i>Baillonella toxisperma</i> Pierre	-0.0073	0.0005	-7.28	-0.0025	0.0003	-10.54	-0.0027	0.0003	-9.88	-0.0010	0.0001	-14.46
	<i>Brachystegia laurentii</i> Louis	-0.0075	0.0003	-4.63	-0.0014	0.0004	-30.36	-0.0040	0.0001	-3.59	-0.0019	0.0002	-8.49
	<i>Celtis tessmannii</i> Rendle	-0.0069	0.0004	-5.41	-0.0030	0.0001	-3.33	-0.0039	0.0002	-6.12	-0.0008	0.0002	-20.62
	<i>Dacryodes buettneri</i> H.J.Lam	-0.0070	0.0005	-7.52	-0.0026	0.0002	-6.88	-0.0032	0.0003	-9.38	-0.0014	0.0001	-4.91
	<i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	-0.0077	0.0004	-5.08	-0.0030	0.0002	-7.33	-0.0035	0.0002	-6.60	-0.0016	0.0001	-8.01
	<i>Dialium dinklagei</i> Harms	-0.0064	0.0003	-4.33	-0.0025	0.0001	-5.34	-0.0028	0.0002	-8.24	-0.0023	0.0002	-7.86
	<i>Erismadelphus exsul</i> Mildbr.	-0.0079	0.0009	-11.64	-0.0031	0.0004	-12.51	-0.0032	0.0004	-13.24	-0.0020	0.0004	-20.01
	<i>Gilbertiodendron brachystegioides</i> J.Leon.	-0.0065	0.0004	-5.85	-0.0024	0.0002	-8.85	-0.0029	0.0002	-6.80	-0.0022	0.0001	-5.41
	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	-0.0073	0.0005	-6.67	-0.0028	0.0002	-8.13	-0.0039	0.0003	-7.78	-0.0007	0.0001	-13.08
	<i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	-0.0079	0.0009	-11.24	-0.0031	0.0005	-16.66	-0.0036	0.0006	-16.26	-0.0015	0.0002	-11.18
	<i>Poga oleosa</i> Pierre	-0.0082	0.0003	-4.03	-0.0031	0.0001	-4.09	-0.0036	0.0002	-6.30	-0.0015	0.0001	-5.58
	<i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	-0.0072	0.0003	-4.81	-0.0030	0.0001	-4.07	-0.0029	0.0003	-9.66	-0.0023	0.0001	-3.61
	<i>Scyphocephalum mannii</i> Warb.	-0.0082	0.0009	-11.05	-0.0029	0.0006	-19.83	-0.0040	0.0009	-23.59	-0.0020	0.0010	-48.31
	Tolérant à l'ombre (TO)	<i>Beilschmiedia spp.</i> Nees	-0.0079	0.0004	-4.65	-0.0009	0.0005	-51.17	-0.0033	0.0003	-7.52	-0.0021	0.0002
<i>Dacryodes igaganga</i> Aubrev. et Pellegr.		-0.0081	0.0005	-6.64	-0.0031	0.0002	-7.74	-0.0032	0.0002	-7.51	-0.0019	0.0001	-3.57
<i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe		-0.0083	0.0003	-3.86	-0.0030	0.0002	-5.91	-0.0043	0.0003	-6.95	-0.0007	0.0003	-36.22
<i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.		-0.0055	0.0010	-18.64	-0.0017	0.0006	-33.38	-0.0021	0.0004	-17.72	-0.0014	0.0001	-4.95
<i>Dialium pachyphyllum</i> Harms		-0.0056	0.0010	-18.25	-0.0022	0.0005	-20.79	-0.0021	0.0006	-29.65	-0.0022	0.0003	-13.23
<i>Scytopetalum klaineianum</i> Pierre		-0.0079	0.0004	-5.53	-0.0032	0.0001	-4.62	-0.0033	0.0003	-9.15	-0.0011	0.0002	-13.87

(*) Intensité associée à la dérivée seconde du spectre SPIR après traitement SNV

B. Identification et prélèvement des plateaux au parc à bois du CIRAD



Figure B.1 : Prélèvement des plateaux.

C. Traçage des éprouvettes sur les plateaux

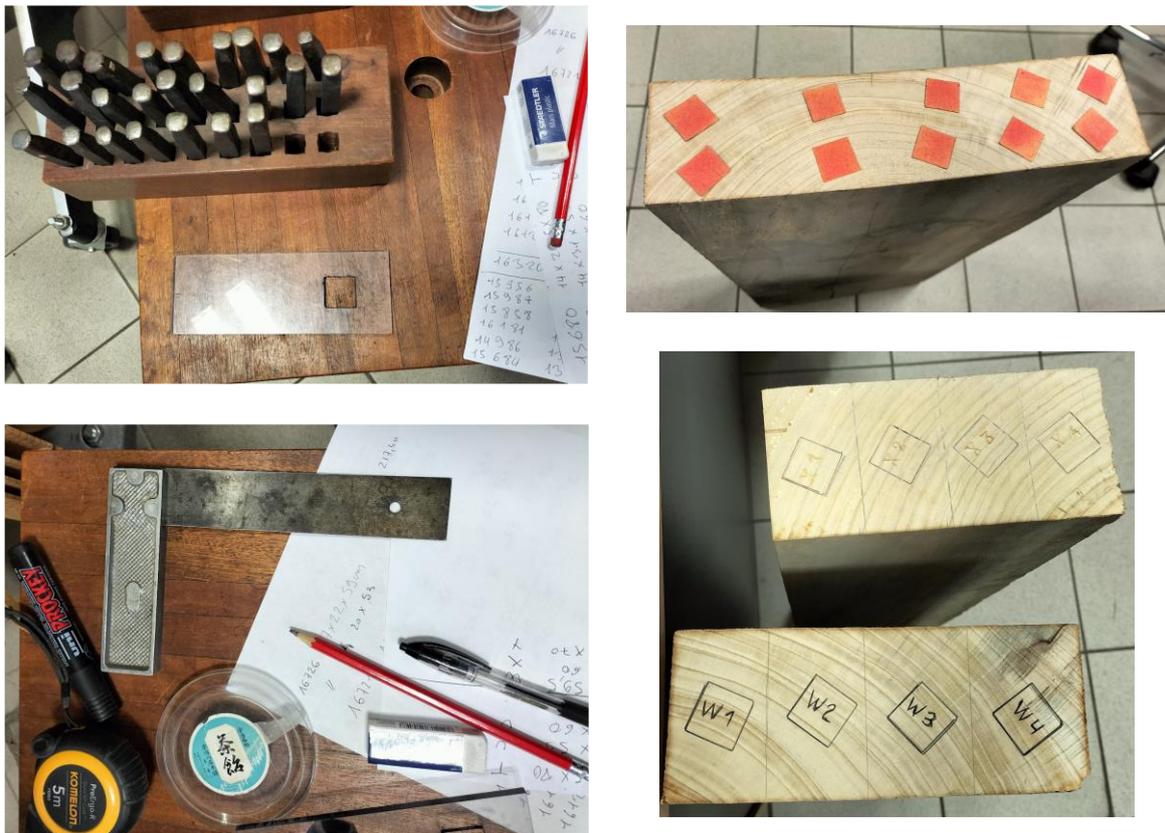


Figure C.1 : Exemple de traçage d'éprouvettes sur le plateau avant usinage.

D. Traçabilité des éprouvettes par des scans des plateaux après traçage

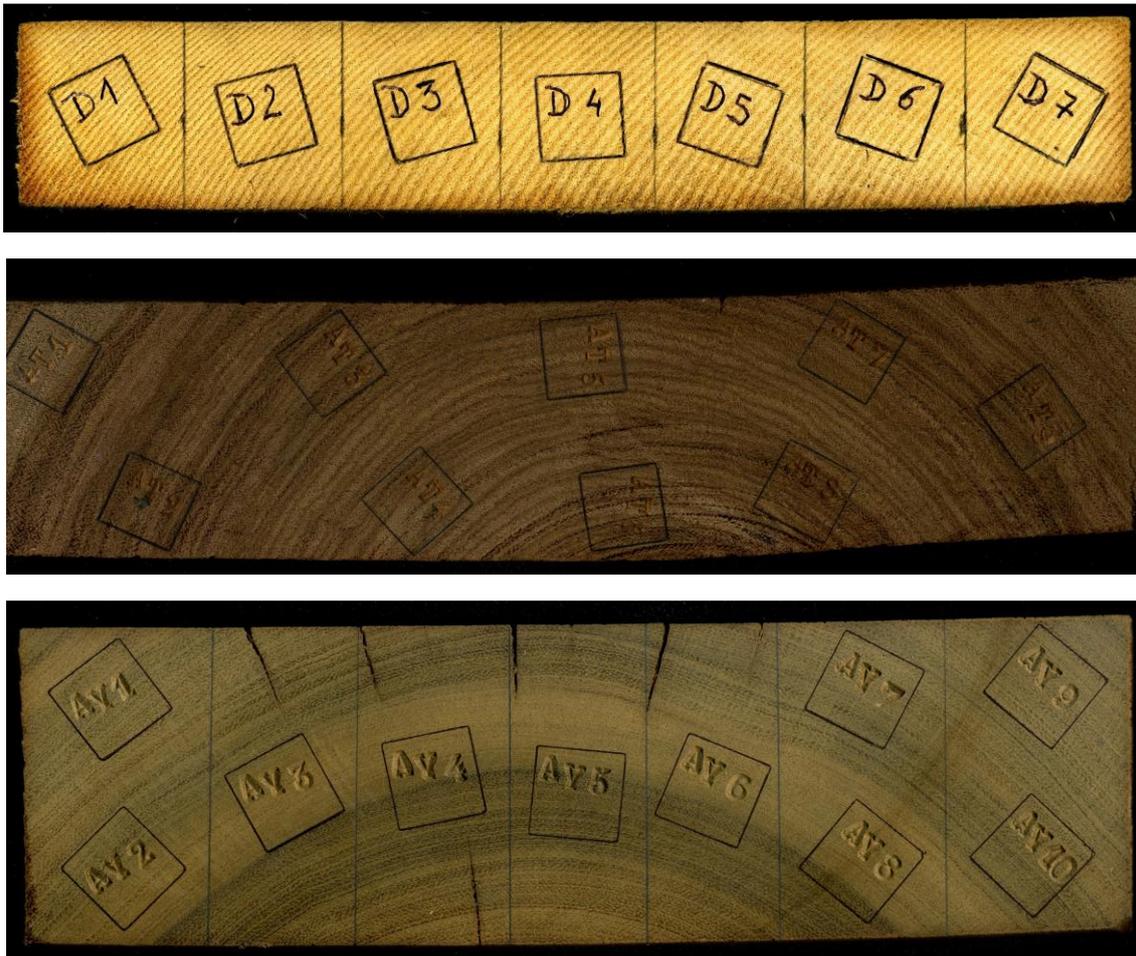


Figure D.1 : Exemples de scans de plateaux après traçage des éprouvettes

E. Liste des publications

Articles dans des revues à comité de lecture

- **E. Nkene Mezui**, C.F Pambou Nziengui, R. Moutou Pitti, et al. Strain and cracks investigations on tropical green wood slices under natural drying: experimental and numerical approaches. *Eur. J.Wood Prod.* 81, 187-207 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s00107-022-01881-9>
- **Nkene Mezui, E.**, Brancheriau, L., Ikogou, S., & Moutou Pitti, R. (2024). Light Tolerance-related Tree Growth Strategies and their Impacts on Key Functional Tree Traits: A Review. *BioResources*, 19(4), 9946–9963.
<https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/23877>
- **E. Nkene Mezui**, L. Brancheriau, S. Ikogou, R. Moutou Pitti. Tropical wood and their properties in relation to ecological temperament. | Soumis chez Wood Science and Technology
- **E. Nkene Mezui**, L. Brancheriau, S. Ikogou, R. Moutou Pitti. Link between the chemical composition of tropical hardwoods from Gabon and the ecological temperament of the trees. | Soumis chez Bois et Forêt des Tropiques
- **E. Nkene Mezui**, L. Brancheriau, S. Ikogou, R. Moutou Pitti. Relationships between physical-mechanical performance, chemical composition and anatomical features of tropical hardwoods with different ecological temperaments. | En cours de rédaction pour soumission chez iForest

Participation à des conférences internationales

- **Nkene Mezui E.**, Brancheriau L., Ikogou S., Moutou Pitti R. Liens entre la composition chimique de feuillus tropicaux du Gabon et leur tempérament écologique via la spectroscopie proche infrarouge. Présentation poster. 3^{ème} Conférence sur les Eco-Matériaux en Afrique -CEMA'2024 - Libreville, Gabon, 12-14 juin 2024.
- **Nkene Mezui E.**, Brancheriau L., Ikogou S., Moutou Pitti R. Impact des stratégies de croissance des arbres sur la performance mécanique des bois tropicaux du Gabon. Présentation orale. 3^{èmes} Journées du LaReVaBois au Gabon le 20 juillet 2023.
- **E. Nkene Mezui**, L. Brancheriau, D. Guibal, R. Moutou Pitti. (2022). Link between growth strategies and physical-mechanical properties of wood of tropical species from Gabon. In *Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems* (pp. 1708-1712). CRC Press. 8th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC) 5-7 September 2022, Cape Town.
- **E. Nkene Mezui**, R. Moutou Pitti, C.F. Pambou Nziengui, S. Ikogou, S. Ekomy Ango, P.K. Talla. Experimental and Numerical Study of Cracking and Strains of Tropical Green Wood Slice Subjected to Natural Drying. Oral communication. 2021 SEM Annual Conference on Experimental Applied Mechanics. June 14-17, 2021, Virtual.

- **Nkene Mezui E.**, Moutou Pitti R., Pambou Nziengui C.F., Talla P.K., Ikogou S., Ekomy Ango S. Déformation et fissuration des rondelles de bois verts tropicales soumises à la dessiccation. Présentation poster. 2^{ème} Conférence sur les Eco-Matériaux en Afrique. CEMA'2022 - Saly, Sénégal, 15-17 juin 2022.
- **Nkene Mezui E.**, Brancheriau L., Moutou Pitti R., Ikogou S. Influence du tempérament écologique sur les propriétés technologiques du bois d'essences peu connues d'origine gabonaise. Présentation poster. 2^{èmes} Journées du LaReVaBois au Gabon du 03 au 05 novembre 2021.

Participation à des conférences nationales

- **Nkene Mezui E.**, Brancheriau L., Moutou Pitti R., Ikogou S. (2021). Influence du tempérament écologique sur les propriétés technologiques du bois d'essences peu connues d'origine gabonaise. GDR 3544 sciences du bois. Communication orale poster. Montpellier 17-19 novembre 2021, 1-3 pages.
- **Nkene Mezui E.**, Moutou Pitti R., Brancheriau L. Identification, caractérisation des essences secondaires d'origine gabonaise. Présentation poster. Journées Scientifiques des Doctorants (JSD) de l'UCA du 28 au 30 juin 2021.
- **E. Nkene Mezui**, L. Brancheriau, S. Ikogou, R. Moutou Pitti (2023). Links between wood dimensional stability and light temperament in tropical hardwoods from Gabon. 12th meeting of the GDR 3544 wood science. Limoges, 22-24 November 2023.
- **E. Nkene Mezui**, L. Brancheriau, S. Ikogou, R. Moutou Pitti (2024). Caractéristiques anatomiques d'espèces tropicales aux tempéraments écologiques différents. 13th meeting of the GDR 3544 wood science. Nantes, 20-22 novembre.

Autre

- Maurin E., Giovannacci D., Gril J., Galimard P., Coureau J-L., Cointe A., Kauffmann L., **Nkene Mezui E.** Cathédrale Notre-Dame : Mesures du retrait longitudinal sur du chêne, essais à l'échelle matériau et à l'échelle de l'élément structure. 7 Mars 2022, Rapport n° R1U - PARIS 4e (Paris, 75)

F. Arrêté ministérielle classant les essences gabonaises des plus commercialisés au moins connues

MINISTERE DE L'ECONOMIE FORESTIERE,
DES EAUX, DE LA PECHE, CHARGE DE
DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA PROTECTION
DE LA NATURE

REPUBLIQUE GABONAISE
Union-Travail-Justice

Arrêté n° 000119/PR/MEFEPEPN
fixant la composition des groupes d'essences
exploitables.

Le Ministre de l'Économie Forestière,
des Eaux, de la Pêche, chargé de
l'Environnement et de la Protection
de la Nature

Vu la Constitution ;

Vu le décret n° 000128/PR du 27 janvier 2002 fixant la composition du Gouvernement de la République, ensemble les textes modificatifs subséquents ;

Vu la loi n° 016/01 du 31 décembre 2001 portant code forestier en République Gabonaise ;

Vu le décret n° 01746/PR/MEFCR du 29 décembre 1983 fixant les attributions et l'organisation du Ministère des Eaux et Forêts ;

Vu les nécessités de service;

ARRETE :

Article 1^{er} : Le présent arrêté, pris en application de l'article 31 de la loi n° 016/01 du 31 décembre 2001 portant code forestier en République Gabonaise, fixe la composition des groupes d'essences exploitables.

Article 2 : Suivant les possibilités de commercialisation, les essences exploitables sont réparties en trois groupes P1, P2 et S.

ARTICLE 3 : Les deux premiers groupes, constitués d'essences principales, sont composés ainsi qu'il suit :

- Groupe P1 : Okoumé et Ozigo
- Groupe P2 : bois divers faciles à commercialiser.

Le groupe S, constitué d'essences secondaires comprend les bois divers à promouvoir.

Article 4 : Les essences des Groupes P1, P2 et S, incluant pour chacune d'elles, le code d'aménagement, le nom pilote, le nom scientifique et la famille à laquelle elles appartiennent, sont fixées et classées dans les tableaux ci-après :

Essences du "Groupe P1" : Okoumé et Ozigo

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
1001	OKOUME	<i>Aucoumea klaineana</i>	Burséracées
1002	OZIGO	<i>Dacryodes buetnerii</i>	Burséracées

Essences du "Groupe P2" : Bois divers faciles à commercialiser

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
2001	ACAJOU	<i>Khaya ivorensis</i>	Méliacées
2002	AGBA (TOLA)	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i>	Césalpiniacées
2003	AIELE	<i>Canarium schweinfurthii</i>	Burséracées
2004	AKO	<i>Antiaris africana</i>	Moracées
2005	ALEN	<i>Detarium macrocarpum</i>	Césalpiniacées
2006	ALONE (KONDROTI)	<i>Rhodognophalon brevicuspe</i>	Bombacacées
2007	ANDOUNG HEITZII	<i>Monopetalanthus heitzii</i>	Césalpiniacées
2008	AZOBÉ	<i>Lophira alata</i>	Ochnacées
2009	BAHIA (ABURA)	<i>Mitragyna ciliata</i>	Rubiacees
2010	BILINGA	<i>Nauclea diderrichii</i>	Rubiacees
2011	BOSSÉ CLAIR	<i>Guarea cedrata</i>	Méliacées
2012	BOSSÉ FONCÉ	<i>Guarea thompsonii (G. oyemensis)</i>	Méliacées
2013	DABÉMA	<i>Piptadeniastrum africanum</i>	Mimosacées
2014	DIANIA (ENGO)	<i>Celtis briei (C. tessmannii)</i>	Ulmacées
2015	DIBÉTOU	<i>Lovoa trichilioides</i>	Méliacées
2016	DOUKA	<i>Tieghemella africana</i>	Sapotacées
2017	DOUSSIE BLANC	<i>Azelia bipindensis</i>	Césalpiniacées
2018	DOUSSIE PACHYLOBA	<i>Azelia pachyloba</i>	Césalpiniacées
2019	EBIARA	<i>Berlinia bracteosa</i>	Césalpiniacées
2020	EKOP (EKABA)	<i>Tetraberlinia bifoliolata</i>	Césalpiniacées
2021	EKOUNE	<i>Coelocaryon klainei</i>	Myristicacées
2022	ESSIA	<i>Petersianthus macrocarpus</i>	Lécythidacées
2023	EYONG	<i>Eribrroma oblonga</i>	Sterculiacées
2024	FARO GRANDE FEUILLE	<i>Daniellia klainei</i>	Césalpiniacées
2025	FARO PETITE FEUILLE	<i>Daniellia soyauxii</i>	Césalpiniacées
2026	FROMAGER	<i>Ceiba pentandra</i>	Bombacacées
2027	IGAGANGA	<i>Dacryodes igaganga</i>	Burséracées
2028	ILOMBA	<i>Pycnanthus angolensis</i>	Myristicacées
2029	IROKO	<i>Milicia excelsa (Chlorophora excelsa)</i>	Moracées
2030	IZOMBÉ	<i>Testulea gabonensis</i>	Ochnacées

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
2031	KÉVAZINGO	<i>Guibourtia tessmannii</i> (<i>G. pellegriniana</i>)	Césalpiniacées
2032	KOSIPO	<i>Entandophragma candollei</i>	Méliacées
2033	KOTIBÉ	<i>Nesogordonia spp.</i>	Sterculiacées
2034	LIMBA	<i>Terminalia superba</i>	Combrétacées
2035	LIMBALI	<i>Gilbertiodendron dewevrei</i>	Césalpiniacées
2036	LONGHI ABAM	<i>Gambeya lacourtiana</i>	Sapotacées
2037	LONGHI MBEBAME	<i>Gambeya africana</i>	Sapotacées
2038	MOABI	<i>Baillonella toxisperma</i>	Sapotacées
2039	MOVINGUI	<i>Distemonanthus benthamianus</i>	Césalpiniacées
2040	MUKULUNGU	<i>Autranella congolensis</i>	Sapotacées
2041	NIANGON	<i>Tarrietia densiflora</i>	Sterculiacées
2042	NIOVÉ	<i>Staudtia gabonensis</i> (<i>S. kamerunensis</i>)	Myristicacées
2043	OBOTO	<i>Mammea africana</i>	Guttifères
2044	OLON	<i>Fagara heitzii</i>	Rutacées
2045	OSSABEL	<i>Dacryodes normandii</i>	Burséracées
2046	OVANG-KOL	<i>Guibourtia ehie</i>	Césalpiniacées
2047	PADOUK	<i>Pterocarpus soyauxii</i>	Papilionacées
2048	PAU ROSA	<i>Swartzia fistuloides</i>	Césalpiniacées
2049	SAPELLI	<i>Entandophragma cylindricum</i>	Méliacées
2050	SIPO	<i>Entandophragma utile</i>	Méliacées
2051	TALI	<i>Erythrophleum ivorense</i>	Césalpiniacées
2052	TCHITOLA	<i>Oxystigma oxyphyllum</i>	Césalpiniacées
2053	TIAMA BLANC	<i>Entandophragma angolense</i>	Méliacées
2054	TIAMA NOIR (ACUMINATA)	<i>Entandophragma congoense</i>	Méliacées
2055	WENGE	<i>Millettia laurentii</i>	Papillonacées

Essences du "Groupe S" : Bois divers à promouvoir

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3001	ABEUM	<i>Gilbertiodendron spp.</i> sauf <i>G. dewevrei</i> , <i>G. pierreaneum</i> , <i>G. unijugum</i>	Césalpiniacées Césalpiniacées
3002	ACIOA	<i>Acioa spp.</i>	Chrysobalanacées
3003	ADJOUBA	<i>Dacryodes klaineana</i>	Burséracées
3004	ADZACON	<i>Lecomptedoxa spp.</i> sauf <i>L. klaineana</i>	Sapotacées
3005	ADZACON-ABOGA	<i>Manilkara spp.</i>	Sapotacées
3006	ADZEM	<i>Psilanthus mannii</i>	Rubiacées
3007	AFANE	<i>Panda oleosa</i>	Pandacées
3008	AFATOUK	<i>Maranthes gabonensis</i>	Chrysobalanacées
3009	AFINA	<i>Strombosia pustulata</i>	Olacacées
3010	AFO	<i>Poga oleosa</i>	Rhizophoracées
3011	AFOUPELI	<i>Hypodaphnis zenkeri</i>	Lauracées
3012	AGNUHÉ	<i>Pentadesma butyracea</i>	Guttifères

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3013	AKAK	<i>Duboscia spp.</i>	Tiliacées
3014	AKE	<i>Pterygota spp.</i>	Sterculiacées
3015	AKEUL	<i>Corynanthe pachyceras</i>	Rubiacées
		<i>Pausihystalia macroceras</i>	Rubiacées
3016	AKOK	<i>Baphia spp.</i>	Papilionacées
3017	AKOL	<i>Ficus exasperata</i>	Moracées
3018	ALANE-BEKU	<i>Klaineanthus gaboniae</i>	Euphorbiacées
3019	ALEP	<i>Desbordesia glaucescens</i>	Irvingiacées
3020	ALLEN-OCPO	<i>Dracaena spp.</i>	Agavacées
3021	ALLOPHYLUS	<i>Allophylus spp.</i>	Sapindacées
3022	AMVOUT	<i>Trichoscypha acuminata (T. abut)</i>	Anacardiées
3023	ANDOK	<i>Irvingia gabonensis</i>	Irvingiacées
3024	ANDONG	<i>Strephonema sericeum</i>	Combrétacées
3025	ANDOUNG 66	<i>Tetraberlinia polyphylla</i>	Césalpiniacées
3026	ANDOUNG DURAND	<i>Monopetalanthus durandii</i>	Césalpiniacées
3027	ANDOUNG INC	<i>Monopetalanthus spp.</i>	Césalpiniacées
		sauf <i>M.coriaceus, M.durandii, M.heitzii, M.letestui, M.pellegrini, M.microphyllus</i>	Césalpiniacées
3028	ANDOUNG LE TESTU	<i>Monopetalanthus le-testui</i>	Césalpiniacées
3029	ANDOUNG MICROPHYLLUS	<i>Monopetalanthus microphyllus</i>	Césalpiniacées
3030	ANDOUNG MOREL	<i>Monopetalanthus coriaceus</i>	Césalpiniacées
3031	ANDOUNG PELLEGRIN	<i>Monopetalanthus pellegrini</i>	Césalpiniacées
3032	ANGOA	<i>Erismadelphus exsul</i>	Vochysiées
3033	ANGUEUK	<i>Ongokea gore</i>	Olacacées
3034	ANGYLOCALYX	<i>Angylocalyx spp.</i>	Papilionacées
3035	ANTHONOTHA	<i>Anthonotha spp. Sauf A.fragrans, A.ferruginea</i>	Césalpiniacées
3036	ANTIDESMA	<i>Antidesma membranaceum</i>	Euphorbiacées
3037	ANZEM NOIR	<i>Copaifera mildbraedii</i>	Césalpiniacées
3038	ANZEM ROUGE	<i>Copaifera religiosa</i>	Césalpiniacées
3039	ANZILIM	<i>Eurypetalum batesii</i>	Césalpiniacées
3040	APHANOCALYX	<i>Aphanocalyx spp.</i>	Césalpiniacées
3041	ASSAS	<i>Macaranga spp.</i>	Euphorbiacées
3042	ASSONGHO	<i>Anthostema aubryanum</i>	Euphorbiacées
3043	ATANGATIER	<i>Dacryodes edulis</i>	Burséracées
3044	ATIEGHE	<i>Discoglyprena caloneura</i>	Euphorbiacées
3045	ATOM	<i>Dacryodes macrophylla</i>	Burséracées
3046	ATSUI	<i>Harungana madagascariensis</i>	Hyperiacées
3047	AVIE	<i>Memecylon spp.</i>	Melastomacées
3048	AVOM	<i>Cleistopholis patens</i>	Annonacées
3049	BAKIA	<i>Baikiaea spp.</i>	Césalpiniacées
3050	BALANITES	<i>Balanites wilsoniana</i>	Zygophyllacées
3051	BALONGA	<i>Balonga buchholzii</i>	Annonacées
3052	BAPHIOPSIS	<i>Baphiopsis parvifolia</i>	Césalpiniacées

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3053	BELI (AWOURA)	<i>Paraberlinia bifoliolata</i>	Césalpiniacées
3054	BENIAMAN	<i>Tetraberlinia moreliana</i>	Césalpiniacées
3055	BERLINIA	<i>Berlinia</i> spp.	Césalpiniacées
3056	BERLINIA	sauf <i>B. bacteosa</i> , <i>B. confusa</i> , <i>B. congolensis</i>	Césalpiniacées
3057	BLIGHIA	<i>Blighia welwitschii</i>	Sapindacées
3058	BODIOA	<i>Anopyxis klaineana</i>	Rhizophoracées
3059	BOMANGA	<i>Brachystegia zenkeri</i>	Césalpiniacées
3060	BOMBAX	<i>Bombax buonopozense</i>	Bombacacées
3061	BONG	<i>Fagara tessmannii</i>	Rutacées
3062	CANTHIUM	<i>Canthium</i> spp.	Rhizophoracées
		<i>Canthium</i> spp.	Rubiacees
3063	CASSIPOUREA	<i>Cassipourea</i> spp.	Rhizophoracées
3064	CENTROPLACUS	<i>Centroplacus glaucinus</i>	Pandacées
		<i>Centroplacus glaucinus</i>	Euphorbiacées
3065	CHYTRANTHUS	<i>Chytranthus</i> spp.	Sapindacées
3066	CLAOXYLON	<i>Claoxylon</i> spp.	Euphorbiacées
3067	COLA	<i>Cola</i> spp.	Sterculiacées
3068	COULA (EWOMEU)	<i>Coula edulis</i>	Olacacées
3069	CRABWOOD	<i>Carapa procera</i>	Méliacées
3070	CRATERANTHUS	<i>Crateranthus talbotii</i>	Lécythidacées
3071	CRUDIA	<i>Crudia</i> spp.	Césalpiniacées
3072	CRYPTOSEPALUM	<i>Cryptosepalum</i> spp.	Césalpiniacées
3073	CUVIERA	<i>Cuviera</i> spp.	Rubiacees
3074	DACRYODES	<i>Dacryodes</i> spp. sauf <i>D. buettneri</i> ,	Burséracées
		<i>D. edulis</i> , <i>D. igaganga</i> , <i>D. klaineana</i> ,	Burséracées
		<i>D. normandii</i> , <i>D. macrophylla</i>	Burséracées
3075	DIBEUM	<i>Gilbertiodendron unijugum</i>	Césalpiniacées
3076	DIVIDA	<i>Scorodolpheus zenkeri</i>	Césalpiniacées
3077	DJILIKA	<i>Spondianthus preussii</i>	Euphorbiacées
3078	DOMELE	<i>Bertiera</i> spp.	Rubiacees
3079	DOUSSIE BELLA	<i>Azelia bella</i>	Césalpiniacées
3080	DRYPETES	<i>Drypetes</i> spp. sauf <i>D. gossweileri</i>	Euphorbiacées
3081	EBAM	<i>Picralima nitida</i>	Apocynacées
3082	EBANA	<i>Guibourtia demeusii</i>	Césalpiniacées
3083	EBEBENG	<i>Phyllanthus discoideus</i>	Euphorbiacées
3084	EBENE	<i>Diospyros</i> spp.	Ebenacées
3085	EBIARA MINKOUL	<i>Berlinia confusa</i> et <i>Berlinia congolensis</i>	Césalpiniacées
3086	EBO	<i>Santiria trimera</i>	Burséracées
3087	EBOBOKU	<i>Scaphopetalum blackii</i>	Sterculiacées
3088	EBOM	<i>Anonidium mannii</i>	Annonacées
3089	EDJI	<i>Amphinias ferrugineus</i>	Césalpiniacées
3090	EDZIP	<i>Strombosia</i> spp. sauf <i>S. pustulata</i>	Olacacées
3091	EFOT	<i>Magnistipula</i> spp.	Chrysobalanacées

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3092	EGIPT	<i>Strombosiopsis tetrandia</i>	Olacacées
3093	EKAKU	<i>Thomandersia</i> spp.	Acanthacées
3094	EKAT	<i>Neochevalierodendron stephanii</i>	Césalpiniacées
3095	EKOBA	<i>Diogoa zenkeri</i>	Olacacées
3096	EKOULEBANG	<i>Maranthes glabra</i>	Chrysobalanacées
3097	EMIEN	<i>Alstonia</i> spp.	Apocynacées
3098	EMVI	<i>Homalium</i> spp. sauf <i>H. letestui</i>	Samydacées
3099	EMVI	<i>Homalium</i> spp. sauf <i>H. letestui</i>	Flacourtiacées
3100	ENDODESMIA	<i>Endodesmia calophylloides</i>	Hypericacées
3101	ENDONE	<i>Pausinystalia johimbe</i>	Rubiacées
3102	ENGOKOM	<i>Barteria fistulosa</i>	Passifloracées
3103	ENGOMEGOMA	<i>Engomegoma gordonii</i>	Olacacées
3104	ENGONA	<i>Pentaclethra eetveldeana</i>	Mimosacées
3105	ENGONG	<i>Trichoscypha engong</i>	Anacardiacées
3106	ERYTHRINA	<i>Erythrina</i> spp.	Papilionacées
3107	ESOMA	<i>Rauvolfia macrophylla</i>	Apocynacées
3108	ESSANG	<i>Parkia bicolor</i>	Mimosacées
3109	ESSANG-ELI	<i>Dichaetanthera africana</i>	Mélastomacées
3110	ESSESANG	<i>Ricinodendron heudelotii</i>	Euphorbiacées
3111	ESSONG	<i>Irvingia robur</i>	Irvingiacées
3112	ESSOULA	<i>Plagiostyles africana</i>	Euphorbiacées
3113	ETOM	<i>Syzygium</i> spp.	Myrtacées
3114	ETOU	<i>Treculia</i> spp.	Moracées
3115	ETUYA	<i>Tabernaemontana</i> spp.	Apocynacées
3116	EVEGNA	<i>Microdesmis zenkeri</i>	Euphorbiacées
3117	EVENE	<i>Brachystegia mildbraedii</i>	Césalpiniacées
3118	EVEUSS	<i>Klainedoxa</i> spp.	Irvingiacées
3119	EVINO	<i>Vitex</i> spp.	Verbénacées
3120	EVONG-EVONG	<i>Spathodea campanulata</i>	Bignoniacées
3121	EWOLEGHE	<i>Bridelia</i> spp.	Euphorbiacées
3122	EYOUM	<i>Dialium</i> spp. sauf <i>D. pachyphyllum</i>	Césalpiniacées
3123	EZELFOU	<i>Sterculia tragacantha</i>	Sterculiacées
3124	FAUX ENGOKOM	<i>Barteria nigritana</i>	Passifloracées
3125	FAUX PADOUK	<i>Pterocarpus</i> spp. sauf <i>P. soyauxii</i>	Papilionacées
3126	FEGIMANRA	<i>Fegimanra</i> spp.	Anacardiacées
3127	FEUP	<i>Monodora</i> spp.	Annonacées
3128	FICUS	<i>Ficus</i> spp. sauf <i>F. mucoso</i> , <i>F. exasperata</i>	Moracées
3129	FRAMIRÉ	<i>Terminalia ivorensis</i>	Combrétacées
3130	GAMBEYA	<i>Gambeya</i> spp. sauf <i>G. africana</i> , <i>G. subnuda</i> <i>G. lacourtiana</i> , <i>G. perpulchra</i> , <i>G. boukokoensis</i>	Sapotacées
3131	GANOPHYLLUM	<i>Ganophyllum giganteum</i>	Sapindacées
3132	GARCINIA	<i>Garcinia</i> spp.	Guttifères

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3133	GARDENIA	<i>Gardenia imperialis</i>	Rubiacées
3134	GHEKOA	<i>Araliopsis soyauxii</i>	Rutacées
3135	GHEOMBI	<i>Sindoropsis le-testui</i>	Césalpiniacées
3136	GOMBE	<i>Didelotia africana (D. letouzeyi)</i>	Césalpiniacées
3137	GREWIA	<i>Grewia spp.</i>	Tiliacées
3138	GUAREA	<i>Guarea spp. sauf G.cedrata, G.thompsonii, G.oyemensis G.thompsonii, G.oyemensis</i>	Méliacées Méliacées
3139	HEISTERIA	<i>Heisteria spp.</i>	Olacacées
3140	HYMENO	<i>Hymenostegia ngounyensis</i>	Césalpiniacées
3141	ICAQUIER	<i>Chrysobalanus icaco</i>	Chrysobalanacées
3142	IDEWA	<i>Haplormosia monophylla</i>	Papilionacées
3143	ISOLONA	<i>Isolona hexaloba</i>	Annonacées
3144	KA	<i>Dichostemma glaucescens</i>	Euphorbiacées
3145	KANGUELE	<i>Maesopsis eminii</i>	Rhamnacées
3146	KETA	<i>Lasianthera africana</i>	Icacinacées
3147	KOBAHIA	<i>Christiana africana</i>	Tiliacées
3148	KONG AFANE	<i>Lestua durissima</i>	Sapotacées
3149	LANDA	<i>Erythroxylum mannii</i>	Erthroxylacées
3150	LANNEA	<i>Lannea welwitschii</i>	Anacardiacees
3151	LEBONDA	<i>Trichilia tessmannii</i>	Méliacées
3152	LONGHI BOK	<i>Gambeya boukokoense</i>	Sapotacées
3153	LONGHI PERP	<i>Gambeya perpulchra</i>	Sapotacées
3154	LONGHI SUBNUDA	<i>Gambeya subnuda</i>	Sapotacées
3155	MANGUIER	<i>Mangifera indica</i>	Anacardiacees
3156	MANIL	<i>Symphonia globulifera</i>	Guttifères
3157	MAREYA	<i>Mareya spp.</i>	Euphorbiacées
3158	MBANEGUE	<i>Gilbertiodendron pierreanum</i>	Césalpiniacées
3159	MEBAMENE	<i>Maranthes chrysophylla</i>	Chrysobalanacées
3160	MEBIMENGONE	<i>Omphalocarpum spp.</i>	Sapotacées
3161	MED	<i>Crotonogyne argentea</i>	Euphorbiacées
3162	MEDZIME-KOGHE	<i>Psychotria spp.</i>	Rubiacées
3163	MEIOCARPE	<i>Meiocarpidium lepidotum</i>	Annonacées
3164	MEKOGHO	<i>Pachyelasma tessmannii</i>	Césalpiniacées
3165	MENGO	<i>Porterandia cladantha</i>	Rubiacées
3166	MENGOUROU	<i>Cynometra mannii (C. schlechteri)</i>	Césalpiniacées
3167	MFOL	<i>Enantia chlorantha</i>	Annonacées
3168	MIAMA	<i>Calpocalyx heitzii</i>	Mimosacées
3169	MIAMENGOME	<i>Caloncoba welwitschii</i>	Flacourtiacées
3170	MILLETIA	<i>Millettia spp.</i>	Papilionacées
3171	MISSISSE	<i>Calpocalyx spp. sauf C. heitzii</i>	Mimosacées
3172	MONDJADI	<i>Crateranthus talbotii</i>	Lecythidacées
3173	MORINDA	<i>Morinda lucida</i>	Rubiacées
3174	MUBALA	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	Mimosacées
3175	MUGONDI	<i>Eriocoelum spp.</i>	Sapindacées

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3176	MVANA	<i>Hylodendron gabunense</i>	Césalpiniacées
3177	MVEZORK	<i>Homalium letestui</i>	Samydacées
3178	MVEZORK	<i>Hommalium letestui</i>	Flacourtiacées
3179	MVOUMA	<i>Xylopiya quintasii</i>	Annonacées
3180	NAPOLEONA	<i>Napoleonaea spp.</i>	Lecythidacées
3181	NDONG ELI	<i>Xylopiya hypolampra</i>	Annonacées
3182	NGABA	<i>Librevillea klainei</i>	Césalpiniacées
3183	NGANG GR. FEUILLES	<i>Hymenostegia Klainei</i>	Césalpiniacées
3184	NGANG PET. FEUILLES	<i>Hymenostegia pelligrini</i>	Césalpiniacées
3185	NGEUL	<i>Croton spp.</i>	Euphorbiacées
3186	NGOM	<i>Sindora klaineana</i>	Césalpiniacées
3187	NGONG-MEBAME	<i>Funtumia spp.</i>	Apocynacées
3188	NGORANGORANE	<i>Camptostylus mannii</i>	Flacourtiacées
3189	NGORANGORANE	<i>Caloncoba glauca</i>	Flacourtiacées
3190	NIEUK	<i>Fillaeopsis discophora</i>	Mimosacées
3191	NIOLA	<i>Tetrorchidium didymostemon</i>	Euphorbiacées
3192	NKA	<i>Pteleopsis hylodendron</i>	Combrétacées
3193	NKAGHA	<i>Tessmannia spp.</i>	Césalpiniacées
3194	NKONENGU	<i>Beilschmeidia spp.</i>	Lauracées
3195	NKOUARSA	<i>Tetrapleura tetraptera</i>	Mimosacées
3196	NSA	<i>Maprounea membranacea</i>	Euphorbiacées
3197	NTOM	<i>Pachypodanthium staudtii</i>	Annonacées
3198	NTOMA-BILIBA	<i>Nauclea spp. sauf N.diderrichii</i>	Rubiacees
3199	NTONA (XYLOPIA ROUGE)	<i>Xylopiya pynaertii</i>	Annonacées
3200	NTSUA	<i>Xylopiya rubescens (Xylopiya staudtii)</i>	Annonacées
3201	NZIM-SOREU	<i>Anisophyllea spp.</i>	Rhizophoracées
3202	OBOBA	<i>Myrianthus arboreus</i>	Moracées
3203	OCHTHOCOSMUS	<i>Ochthocosmus spp.</i>	Ixonanthacées
3204	ODDONIO	<i>Oddoniodendron spp.</i>	Césalpiniacées
3205	ODUMA	<i>Gossweilerodendron joveri</i>	Césalpiniacées
3206	ODZIKOUNA	<i>Scytopetalum klaineinum</i>	Scytopétalacées
3207	OFOSS	<i>Pseudospondias spp.</i>	Anacardiacees
3208	OHIA	<i>Celtis mildbraedii</i>	Ulmacées
3209	OKALA	<i>Xylopiya aethiopica</i>	Annonacées
3210	OKAN	<i>Cylicodiscus gabunensis</i>	Mimosacées
3211	OKIP	<i>Ctenolophon englerianus</i>	Ctenolophonacées
3212	OKOLANGOUMA (OGUOMO)	<i>Lecomptedoxa klaineana</i>	Sapotacées
3213	OLAX	<i>Olax spp.</i>	Olacacées
3214	OLDFIELDIA	<i>Oldfieldia africana</i>	Euphorbiacées
3215	OLENE	<i>Irvingia grandifolia</i>	Irvingiacées
3216	OLONVOGO	<i>Fagara macrophylla</i>	Rutacées
3217	OMVONG	<i>Dialium pachyphyllum</i>	Césalpiniacées

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3218	ONZABILI	<i>Antrocaryon klaineum</i>	Anacardiacees
3219	ONZAN	<i>Odyndyea gabonensis</i>	Simaroubacees
3220	ONZEM	<i>Anthothona fragrans</i>	Cesalpiniacees
3221	ONZEM	<i>Anthothona ferruginea</i>	Cesalpiniacees
3222	OSSANG-ELI	<i>Parinari hypochrysea (Parinari excelsa)</i>	Chrysobalanacees
3223	OSSIMIALE	<i>Newtonia spp.</i>	Mimosacees
3224	OSSOMEDZO	<i>Newbouldia laevis</i>	Bignoniacees
3225	OTOUNGA	<i>Greenwayodendron suaveolens (Polyalthia suaveolens)</i>	Annonacees
3226	OVITA	<i>Afrostryax spp.</i>	Huacees
3227	OVOK	<i>Cleistopholis glauca</i>	Annonacees
3228	OWUI	<i>Hexalobus spp.</i>	Annonacees
3229	OYEM	<i>Brerania brieyi</i>	Rubiacees
3230	OYEM-TSUE	<i>Rauvolfia vomitoria</i>	Apocynacees
3231	OYOP	<i>Donella spp, Chrysophyllum pentagonocarpum</i>	Sapotacees
3232	OZOUGA	<i>Sacoglottis gabonensis</i>	Humiriacees
3233	PALETUVIER	<i>Rhizophora spp.</i>	Rhizophoracees
3234	PANCOVIA	<i>Pancovia spp.</i>	Sapindacees
3235	PIERRODENDRON	<i>Pierrodendron africanum</i>	Simaroubacees
3236	PLAGIOSIPHON	<i>Plagiosiphon spp.</i>	Cesalpiniacees
3237	POMME CYTHERE	<i>Spondias mombin</i>	Anacardiacees
3238	PREMNA	<i>Premna angolensis</i>	Verbenacees
3239	PROTOMEG	<i>Protomegabaria macrophylla</i>	Euphorbiacees
3240	RHABDOPHYLLUM	<i>Rhabdophyllum spp.</i>	Ochnacees
3241	RIKIO	<i>Uapaca spp.</i>	Euphorbiacees
3242	RINOREA	<i>Rinorea spp.</i>	Violacees
3243	ROTHMANNIA	<i>Rothmannia spp.</i>	Rubiacees
3244	SABIFOUT	<i>Maesobotrya spp.</i>	Euphorbiacees
3245	SANGOMA	<i>Allanblackia spp.</i>	Guttiferes
3246	SAPIUM	<i>Sapium spp.</i>	Euphorbiacees
3247	SCOTTELLIA	<i>Scottellia spp.</i>	Flacourtiacees
3248	SENE	<i>Albizia spp.</i>	Mimosacees
3249	SORINDEIA	<i>Sorindeia spp.</i>	Anacardiacees
3250	SORRO	<i>Scyphocephalium ochocoa</i>	Myristicacees
3251	STEMENO	<i>Stemenocoleus micranthus</i>	Cesalpiniacees
3252	STRYCHNOS	<i>Strychnos spp.</i>	Loganiacees
3253	TECLEA	<i>Teclea spp.</i>	Rutacees
3254	TOL	<i>Ficus mucuso</i>	Moracees
3255	TRICALYSIA	<i>Tricalysia spp.</i>	Rubiacees
3256	TRICHILIA	<i>Trichilia spp. sauf T.tessmannii</i>	Meliacees
3257	TRICHOSCYPHA	<i>Trichoscypha spp. sauf T.abui, T.acuminata, T.arborea</i>	Anacardiacees
3258	UVARIASTRUM	<i>Uvariastrum pierreanum</i>	Annonacees

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3259	WARNECKEA	<i>Warneckeia spp.</i>	Mélastomacées
3260	WARNECKEA	<i>Drypetes gossweileri</i>	Euphorbiacées
3261	XYLOPIA	<i>Xylopiia spp. sauf</i>	Annonacées
		<i>X.aethiopica, X. hypolampra, X. quintazii,</i>	Annonacées
		<i>X. rubescens, X. staudtii, X. pinaertii</i>	Annonacées
3262	ZEYHERELLA	<i>Zeyherella spp.</i>	Sapotacées
3263	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Anacardiacees
3264	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Annonacées
3265	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Apocynacées
3266	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Bignonacées
3267	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Bombacées
3268	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Burséracées
3269	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Césalpiniacées
3270	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Chrysobalanacées
3271	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Combrétacées
3272	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Ebénacées
3273	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Euphorbiacées
3274	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Flacourtiacées
3275	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Clusiacees
3276	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Hypericacées
3277	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Irvingiacées
3278	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Lauracées
3279	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Loganiacées
3280	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Mélastomacées
3281	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Méliacées
3282	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Mimosacées
3283	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Moracées
3284	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Myristicacées
3285	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Myrtacées
3286	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Ochnacées
3287	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Olacacées
3288	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Pandacées
3289	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Fabacées
3290	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Passifloracées
3291	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Rhizophoracées
3292	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Rubiacees
3293	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Rutacées
3294	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Samydacées
3295	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Sapindacées
3296	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Sapotacées
3297	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Scytopétalacées
3298	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Simaroubacées
3299	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Sterculiacées

Code	Nom pilote	Nom scientifique	Famille
3300	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Tiliacées
3301	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Ulmacées
3302	AUTRE	<i>Essence non identifiée</i>	Verbénacées

Article 5 : Les essences autres que celles mentionnées dans le présent arrêté présentant un intérêt commercial font partie du groupe S.

Article 6 : Une dérogation spéciale aux dispositions de l'article 3 relative à la composition des Groupes P2 et S peut être accordée par la Direction Générale des Eaux et Forêts aux concessionnaires qui en font la demande dans le cadre de la mise en œuvre de leurs CFAD.

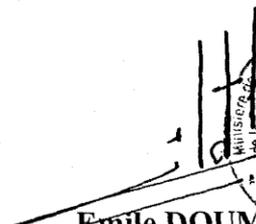
Cette dérogation peut s'étendre à deux espèces d'un groupe à l'autre, sous réserve des justificatifs prenant en compte les volumes estimés de ces espèces.

Article 7 : Le Directeur Général des Eaux et Forêts est chargé de l'exécution du présent arrêté qui abroge toutes dispositions antérieures contraires./-

Fait à Libreville, le

01 MARS 2004

Par le Ministre de l'Economie Forestière, des Eaux,
de la Pêche, chargé de l'Environnement
et de la Protection de la Nature



Emile DOUMBA, MINISTRE