

BAKARY TRAORE

**INFLUENCE DE LA STRUCTURE ANATOMIQUE
ET DES MÉTABOLITES SECONDAIRES SUR LES
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET LA QUALITÉ
ACOUSTIQUE DU BOIS DE VÈNE (*PTEROCARPUS
ERINACEUS* POIR) PROVENANT DU MALI.**

Thèse de doctorat en cotutelle présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec
dans le cadre du programme de doctorat en Science du Bois
pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.)

DEPARTEMENT DES SCIENCES DU BOIS ET DE LA FORET
FACULTE DE FORESTERIE, DE GEOGRAPHIE ET DE GEOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC, CANADA

Et

L'ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL ET DES EAUX ET FORETS
AGROPARISTECH,
NANCY, FRANCE
Pour l'obtention du grade de docteur d'AgroParisTech/ENGREF

2009

A ma sœur Feue, Niô
dite Kadidia Traoré,
pour m'avoir inscrit à
l'école. Et à mon
épouse, Aminata Sanogo,
pour sa patience et son
soutien moral.

Remerciements

Ce mémoire de thèse est le résultat de plus de 3 ans de travaux de recherche effectués d'une part, en alternance entre le Mali et la France et d'autre part, en cotutelle entre l'Université Laval et l'ENGREF de Nancy. Les travaux de recherche ont essentiellement été effectués au sein du Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB/INRA) de l'ENGREF de Nancy et du Centre de Recherche sur le Bois (CRB) de l'Université Laval.

C'est donc le lieu pour moi d'exprimer mes plus sincères remerciements au Pr. Patrick PERRE et au Pr. Tatjana STEVANOVIC pour m'avoir accueilli respectivement au sein de ces laboratoires, d'avoir accepté de diriger mes travaux et de m'avoir accordé un soutien financier de taille à travers leurs fonds de recherche.

Je tiens à exprimer mes très vifs remerciements à l'adresse de tous ceux qui ont de loin ou de près rendu non seulement le travail possible mais aussi sa réalisation agréable tant à l'Université Laval qu'à l'ENGREF de Nancy. Je voudrais ici en particulier remercier le Pr. René KELLER qui malgré qu'il soit en retraite s'est toujours montré disponible pour mes questions en matière d'anatomie du bois et Loïc BRANCHERIAU, chercheur au CIRAD de Montpellier, pour sa contribution dans l'analyse de la qualité acoustique du bois de vène.

Je remercie les techniciens du LERFoB/INRA et du CRB en l'occurrence Mr. Patrice MARCHAL pour la préparation du matériel d'essai et la réalisation des tests de sorption au LERMaB et de Mr. Luc GERMAIN et Mr. Yves BÉDARD respectivement pour la préparation du matériel d'essai et la détermination du taux des cendres à l'Université Laval.

Je tiens aussi à remercier Papa Niokor DIOUF pour sa contribution dans la réalisation des essais d'analyse chimique et Carole ASSOR pour ses conseils et sa contribution dans la mise en place définitive du sujet.

J'adresse aussi mes sincères remerciements aux autorités française et en particulier au Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France à Bamako (SCAC) qui, à travers son projet d'appui à l'Enseignement Supérieur du Mali, m'a accordé un soutien financier sous forme de bourse d'alternance de 15 mois. Je remercie aussi les autorités maliennes et en particulier le directeur général de l'IPR/IFRA de Katibougou, Pr. Fafré SAMAKE, pour les encouragements, les conseils et le soutien financier dans le prélèvement du matériel expérimental et pour avoir accepté ma demande de mise en congé de formation.

Résumé

Le vène est l'une des espèces des domaines climatiques soudanien et guinéen du Mali revêtant d'une importante contribution socio-économique. Le présent travail a consisté à déterminer la qualité du bois de vène tant au niveau intra-arbre qu'au niveau de l'origine géographique de provenance ainsi que l'influence des facteurs de variation de qualité liés à l'anatomie et aux métabolites extractibles. Dans cette optique, une quantification des extraits, une analyse qualitative et quantitative des caractères anatomiques et une analyse des cernes a été réalisée. En plus, une évaluation des caractéristiques physico-mécaniques en occurrence, l'infradensité (ID), le retrait, le comportement hygroscopique en fonction de la nature des extraits, le module dynamique d'élasticité (E_L) et les propriétés acoustiques pour la facture d'instrument xylophone (le module spécifique, E_L / ρ et le coefficient d'amortissement, $\tan\delta$) a été effectuée. Les résultats obtenus ont montrés, qu'en dépit d'un retrait très peu variable, l'ID, le E_L et la qualité acoustique du bois de vène sont supérieurs en zone guinéenne (ZG) qu'en zone soudanienne (ZS). Mais dans l'arbre, ils sont supérieurs dans le duramen médian (DM) et externe (DE) que dans le duramen interne (DI). Il ressort aussi que ces caractéristiques évoluent positivement avec le taux des extraits, la longueur et la proportion des fibres mais diminue significativement avec le nombre de vaisseaux par mm^2 et la proportion des vaisseaux. Les dimensions et la proportion des principaux caractères anatomiques diffèrent significativement d'une région à l'autre mais dans l'arbre elles varient de la moelle vers le DM au delà duquel ils restent stable jusqu'au DE. L'accroissement moyen est de 2,8 mm/an en ZS contre 4,9 mm/an en ZG. Le taux d'extraits, plus important en ZG qu'en ZS, augmente significativement de la moelle vers la zone de transition puis diminue fortement dans l'aubier. L'effet des extraits sur le comportement hygroscopique du bois s'est principalement illustré par une réduction considérable des valeurs du retrait et du point de saturation de la fibre, due non pas seulement à la teneur en extraits, mais aussi à leur nature chimique. Les extraits solubles dans l'acétone et dans l'éthanol-toluène suivie de l'eau chaude ont eu le plus d'effet sur l'hygroscopicité du bois de vène que ceux solubles dans l'eau chaude et dans l'hexane. Cependant, le retrait du duramen après extraction totale s'est révélé similaire à celui de l'aubier. A l'exception de ceux qui sont solubles dans l'acétone, les extraits semblent avoir peu d'effet sur l'anisotropie du retrait.

Abstract

The vene is one of indigenous species from the soudanian and Guinean climate zones of Mali which is a very important species from the socio-economic point of view. The aim of this work thus consisted to determine the quality of this species along the radial direction and according to the geographic provenance in Mali as well as the influence of the variation factors related to the anatomy and the extractives. Accordingly, a quantification of the extractives, a qualitative and quantitative analysis of the anatomical characters, an analysis of the ring width and an evaluation of the physical and mechanical characteristics in terms of basic density (BD), shrinkage, dynamic module of elasticity (E_L) as well as the effect of extractives on the hygroscopic behavior and the acoustic properties for the xylophone instrument manufacturing (the specific module, E_L/ρ and the damping coefficient, $\tan\delta$) were investigated. The results showed that, in spite of a very few shrinkage variation, the BD, the E_L and the acoustic quality of the vene wood are higher in Guinean area (GA) than in soudanian area (SA) and higher in the median and external heartwood (MHW and EHW) than in the internal heartwood (IHW). In addition, these characteristics significantly increase with the extractive content, the fiber length and the fiber proportion and significantly decrease with the number of vessels per mm^2 and the proportion of the vessels. The results showed also that the dimensions and the proportion of other anatomical characters differ significantly from one area to another but, in the tree, they vary from the pith towards the MHW beyond which they remain stable until EHW. The average ring width is 2.8 mm/year in SA against 4.9 mm/year in GA. The extractives content, which is higher in GA than in SA, significantly increases from the IHW towards the EHW and then strongly decreases in sapwood. Due to the extractives content and their chemical nature, the extractives affect the hygroscopic behavior of vene wood by a significant decrease of the shrinkage and the fiber saturation point. The acetone soluble extractives and those soluble in ethanol-toluene followed by warm water had more effect on wood hygroscopicity than those soluble in warm water and in hexane. However, the shrinkage after the total extraction of heartwood appeared similar to that of sapwood. Except for acetone soluble extractives, the extractives seem to have a very few effect on the shrinkage anisotropy.

Liste des figures

Figure 1. Structure d'un tronc d'arbre (adopter de Lenger B. et al 1999)	23
Figure 2. Plan ligneux du bois : a)-feuillus et b)- Résineux (Keller 1994).....	24
Figure 3. Mode de distribution des vaisseaux dans l'accroissement annuel (Keller 1994)	25
Figure 4. Caractéristiques des vaisseaux : a)-Type de perforations vasculaires b)- ponctuations intervasculaires (Bowyer et al 2007).....	25
Figure 5. La paroi cellulaire (Bowyer et al 2007).....	27
Figure 6. Types de ponctuations (Bowyer et al 2007).....	28
Figure 7. Polymère de la cellulose formant la micro-fibrille.....	29
Figure 8. Hémicellulose O-acethyl-glucurono xylane des feuillus (a) et O-acethyl- galactoglucomanane des résineux (b) (Haluk 1994).....	30
Figure 9. Monomères constitutifs de la lignine (Brunow et al 1999).....	31
Figure 10. Classe des terpènes (Haluk et al 1994).....	33
Figure 11. Structure des terpènes et terpénoïdes (Obst 1998)	34
Figure 12. Phénols simples (C6-C1 et C6-C2) (Stevanovic 2008).....	36
Figure 13. Stilbènes (C6-C2-C6) (Haluk et al 1994)	36
Figure 14. Structure des tanins et des lignanes (Fengel et Wegener 1984).....	36
Figure 15. Classe de flavonoïdes (Rowe 1989)	37
Figure 16. Les Glycérides (adapté de Haluk et al 1994)	38
Figure 17. Techniques d'extraction au soxtec (Holmbom 1999).....	40
Figure 18. Schéma des axes et plans naturels d'observation du bois.....	43
Figure 19. Type d'eau dans le bois (Bowyer et al 2007).....	44
Figure 20. Isothermes de sorption d'humidité du bois (Bowyer et al 2007)	46
Figure 21. Courbe contrainte - déformation	52
Figure 22. Expression du coefficient d'amortissement via: le decrement logarithmique (gauche) et le domaine fréquentiel (droite) (Bremaud 2006)	58
Figure 23. Le module spécifique et le coefficient d'amortissement vs. L'angle des microfibrille (Norimoto <i>et al</i> 1986).....	59
Figure 24. Aspect du fût, des feuilles, des fleurs et fruits de <i>Pterocarpus erinaceus</i> Tiquet (Tervuren Xylarium Wood Database).....	61

Figure 25. Caractères anatomiques du bois de vène : a- section transversale, b – section tangentielle, c – section radiale (Jardim e museu agricola do ultramar 1952).....	63
Figure 26. Squelette de base des flavonoïdes et isoflavonoïdes	65
Figure 27. Pterocarpanes de <i>Pterocarpus</i>	65
Figure 28. Structure squelettique des isoflavones de <i>Pterocarpus</i> (Seshadri 1972)	66
Figure 29. Biosynthèse et distribution des isoflavonoïdes de <i>Pterocarpus</i> (Rowe 1989)	66
Figure 30. Angolensin de <i>Pterocarpus</i> (Seshadri 1972).....	67
Figure 31. Pterostilbène (Seshadri 1972).....	67
Figure 32. Terpenoïdes de <i>Pterocarpus</i> (Seshadri 1972)	67
Figure 33. Quelques usages du bois de vène.	69
Figure 34. Pied de <i>Pterocarpus erinaceus</i> en plantation	70
Figure 35. Bois juvénile - bois adulte (Hébertet al. 2002).....	83
Figure 36. Variation radiale des propriétés du bois (Bowyer et al. 2007).....	84
Figure 37. Carte du Mali : Zone bioclimatiques (construite à partir de Coulibaly 2003)	98
Figure 38. Carte des sols et profil météorologique proche (PIRT 1983; FAO).....	100
Figure 39. Mesure de la circonférence à hauteur de poitrine.....	101
Figure 40. Découpe et transport des billons	102
Figure 41. Débit des plateaux	102
Figure 42. Schéma du Protocole de prélèvement du matériel expérimental	104
Figure 43. Dispositif du Bing	106
Figure 44. Magnitude de la transformée de Fourier	106
Figure 45. Signal analytique associé aux modes de fréquence.....	106
Figure 46. Schéma de mesure des dimensions de l'échantillon	107
Figure 47. Dispositif de la pesée hydrostatique (Bowyer et al 2007).....	110
Figure 48. Dispositif de d'analyse de cerne.....	113
Figure 49. Microdensitométrie à l'aide de l'analyseur de cerne QTRS-01X.....	114
Figure 50. Extraction à l'éthanol-toluène : a) dispositif du soxhlet, b) évaporateur rotatif sous vide	119
Figure 51. Sie à fil diamanté.....	122
Figure 52. Protocole du choix de l'épaisseur adéquate	122
Figure 53. Decoupe et mesure du retrait suivant chacun des traitements.....	123

Figure 54 Principe de fonctionnement du micromètre laser (Perré. 2007).....	124
Figure 55 Support-échantillon (Perré. 2007)	124
Figure 56 Enceinte de conditionnement et contrôle de l'humidité relative (Perré. 2007).	125
Figure 57. Cycle de fonctionnement du cryothermostat.....	126
Figure 58. Préparation de l'échantillon au montage.....	126
Figure 59. Accroissement annuel du bois de vène à la loupe binoculaire	133
Figure 60. Image de la section transversale d'un échantillon de vène (<i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir) obtenue au microscope optique.	134
Figure 61. Profil densitométrique et de radiographie du bois de vène	135
Figure 62. Densité moyenne de cerne vs largeur de cerne	135
Figure 63. Evolution des composantes de densité avec l'âge en zone guinéenne (a) et soudanienne (b).....	135
Figure 64. Evolution radiale du diamètre des vaisseaux du bois de vène a.- DI ; a.- DM ; c.- DE (grossissement de 200x)	140
Figure 65. Eclisses de bois de vène macérées Figure 66. Paroi des fibres vues au microscope électronique	141
Figure 67. Cellules du parenchyme axial du vène en plan radiale (grossissement 200x)	141
Figure 68. Caractères anatomiques du bois de vène : a)-plan transversal ; b)-plan radial et c)-plan tangentiel	142
Figure 69. image du vène au microscope électronique montrant des métabolites primaires (MP) ou substances de réserves dans l'aubier (a) et des métabolites secondaires (MS) dans le duramen (b)	144
Figure 70. Module dynamique d'élasticité vs. Longueur des fibres	155
Figure 71. Module dynamique d'élasticité vs. Nombre de vaisseaux par mm ²	155
Figure 72. Module dynamique d'élasticité vs. Teneur en extraits	155
Figure 73. Module dynamique spécifique vs. Longueur des fibres.....	156
Figure 74. Module dynamique spécifique vs. Nombre de vaisseaux par mm ²	157
Figure 75. Module dynamique spécifique vs. Teneur en extraits.....	157
Figure 76. Coefficient d'amortissement vs. Nombre de vaisseaux par mm ²	158
Figure 77. Coefficient d'amortissement vs. Longueur des fibres.....	158
Figure 78. Infradensité vs. Teneur en extraits	161

Figure 79. Infradensité vs. Proportion des fibres.....	161
Figure 80. Infradensité vs. Proportion des vaisseaux	161
Figure 81. Module dynamique et module spécifique vs. Infradensité.....	162
Figure 82. Coefficient d'amortissement vs. Infradensité.....	163
Figure 83. Retrait radial vs. Teneur en eau du bois	168
Figure 84. Retrait tangentiel vs. Teneur en eau du bois	168

Liste des tableaux

Tableau 1. Classe d'extraction et groupe d'extraits (Fengel et Wegener 1984).....	41
Tableau 2. Composés isoflavones de <i>Pterocarpus</i> suivant les substituants radicaux sur la structure squelettique (Seshadri 1972 ; Surowiec et al 2004).....	66
Tableau 3. Propriétés physiques et mécaniques du bois de vène.....	68
Tableau 4. Largeur moyenne de cerne par provenance et par classe d'âge.....	133
Tableau 5. Analyse de la variance sur la largeur de cerne.....	133
Tableau 6. Valeurs moyennes des composantes densitométriques.....	134
Tableau 7. Analyse quantitative et qualitative des caractères anatomiques par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène	138
Tableau 8. Analyse de la variance sur la variabilité des caractères anatomique du bois de vène.....	139
Tableau 9. Teneur en extraits (à l'éthanol-toluène plus l'eau chaude, à l'éthanol-toluène et à l'eau chaude) du bois de vène par provenance et par position radiale dans l'arbre.....	145
Tableau 10 Analyse de la variance sur la variabilité de teneur en extraits.....	145
Table 11. Valeurs moyennes et écart type (entre parenthèse) du module d'élasticité et des propriétés acoustiques par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène	148
Tableau 12. Analyse de la variance sur la variabilité du module d'élasticité et des propriétés acoustiques du bois de vène.....	148
Tableau 13. Valeurs moyennes et écart type (entre parenthèse) de l'infradensité par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène	149
Tableau 14. Analyse de la variance sur la variabilité de l'infradensité du bois de vène	150
Tableau 15. Valeurs moyennes et écart type (entre parenthèse) du retrait par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène.....	151
Tableau 16. Analyse de la variance sur la variabilité du retrait du bois de vène.....	151
Tableau 17. Corrélation de Pearson.....	153
Tableau 19. Equations de régression multiple.....	153
Tableau 18. Valeurs du coefficient de regression normalisés	154
Tableau 20. Influence des extraits sur le PSF du bois de vène.....	171

Tableau 21. Influence des extraits sur le retrait et l'anisotropie du retrait du bois de vène
..... 174

Table des matières

Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	ix
1. Introduction générale.....	13
1.1 Introduction.....	15
1.2 Contexte de l'étude.....	15
1.3 Choix du vène.....	17
1.4 Plan du travail.....	18
2. Revue de littérature.....	19
2.1 Introduction.....	20
2.2 Caractéristiques structurelles du bois.....	20
2.2.1 Matériau d'origine biologique.....	20
2.2.2 Organisation macroscopique du bois.....	21
2.2.3 Organisation microscopique du bois.....	23
2.2.4 Structure de la paroi cellulaire.....	26
2.3 Nature chimique du bois.....	28
2.3.1 Les composants structuraux.....	28
2.3.2 Les extractibles.....	31
2.4 Caractéristiques physiques et mécaniques du bois.....	43
2.4.1 Matériau orthotrope et anisotrope.....	43
2.4.2 Matériau hygroscopique.....	43
2.4.3 Matériau dense et poreux.....	47
2.4.4 Module d'élasticité du bois.....	51
2.4.5 Propriétés acoustiques du bois pour la facture d'instruments xylophones.....	53
2.5 Etat de connaissance du vène (<i>P. erinaceus</i>).....	60
2.5.1 Botanique.....	60
2.5.2 Phénologie.....	61
2.5.3 Répartition géographique naturelle.....	61
2.5.4 Caractéristique structurelles du vène.....	62

2.5.5	Extractibles des espèces <i>Pterocarpus</i>	63
2.5.6	Caractéristiques physico-mécaniques du bois de vène	68
2.5.7	Caractéristiques technologiques du bois de vène	68
2.5.8	Usage du vène	69
2.5.9	Sylviculture du vène	69
2.6	Variabilité structurelle et impact sur la qualité du bois	71
2.6.1	Introduction.....	71
2.6.2	Variations des propriétés liées aux conditions du milieu	71
2.6.3	Variations des propriétés liées aux tissus constitutifs.....	74
2.6.4	Variations de propriétés liées à l'accroissement annuel	78
2.6.5	Variations de propriétés liées à l'âge cambial	83
2.6.6	Propriétés structurelles et qualité acoustique du bois	87
2.7	Influence des métabolites secondaires sur la qualité du bois.....	88
2.8	Conclusion	94
2.9	Problématique et hypothèses de l'étude.....	94
2.10	Objectifs du travail.....	95
2.10.1	Objectif général.....	95
2.10.2	Objectifs spécifiques.....	95
3	Matériel et méthode	97
3.1	Le milieu d'étude	98
3.1.1	. Aperçu sur le Mali	98
3.1.2	. Caractéristiques de la zone d'étude	99
3.2	Matériel expérimental	101
3.3	Méthodes d'études	105
3.3.1	Mesure des caractéristiques mécaniques	105
3.3.2	Mesure de l'infradensité	109
3.3.3	Mesure du retrait à l'échelle macroscopique	111
3.3.4	Analyse de cerne.....	112
3.3.5	Etudes anatomique du bois de vène.....	114
3.3.6	La teneur en extractibles du bois de vène.....	117
3.3.7	Effet des extraits sur le comportement hygroscopique du bois de vène à l'échelle des micro-échantillons	120
3.3.8	Analyses statistiques des résultats	127

4	Résultats et discussions.....	130
4.1	Variation des propriétés structurelles et des taux d'extractibles du bois de vène 131	
4.1.1	Caractéristiques des cernes du bois de vène.....	131
4.1.2	Caractéristiques anatomiques	137
4.1.3	La teneur en extraits du bois de vène.....	143
4.1.4	Conclusion	145
4.2	Variation des propriétés physico-mécaniques du bois de vène	147
4.2.1	Le module d'élasticité et les propriétés acoustiques du bois de vène.....	147
4.2.2	L'infradensité.....	149
4.2.3	Le retrait à l'échelle macroscopique.....	150
4.2.4	Conclusion	151
4.3	Effet des caractères anatomiques et des extraits sur les propriétés physiques et mécaniques du bois de vène.....	152
4.3.1	Effet sur le module d'élasticité	154
4.3.2	Effet sur les propriétés acoustiques	156
4.3.3	Effet sur l'infradensité	160
4.3.4	Effet sur le retrait	164
4.3.5	Conclusion	165
4.4	Effet de la nature des extraits sur le comportement hygroscopique du bois de vène à l'échelle des échantillons minatures.....	166
4.4.1	Effet des extraits sur les courbes de sorption.....	166
4.4.2	Effet sur le point de saturation de la fibre (PSF)	169
4.4.3	Effet sur le retrait et l'anisotropie du retrait	172
4.4.4	Conclusions.....	175
5	Conclusion générale et perspectives	176
5.1	Conclusion générale.....	177
5.2	Perspectives	182
	Références bibliographiques.....	185

1. Introduction générale

1.1 Introduction

Le bois constitue l'une des principales ressources naturelles du globe. C'est une richesse naturelle qui revête d'une haute qualité environnementale que presque tous les pays possèdent ou qu'ils peuvent créer et renouveler indéfiniment. Sa production et sa transformation s'intègrent ainsi, dans un processus de développement durable. Il a longtemps été et reste encore l'un des matériaux de préférence que l'on retrouve dans presque tous les secteurs de la vie.

Au Mali, les espèces susceptibles de produire du bois d'œuvre proviennent essentiellement des domaines climatiques soudanien et guinéen. Parmi celles-ci, le vène présente une importante contribution socio-économique tant au niveau du bois qu'au niveau du fourrage comme aliment du bétail. Son bois est fortement estimé aussi bien pour ses propriétés physico-mécaniques que pour son aspect esthétique et sa durabilité naturelle dans des emplois comme l'ameublement, la construction traditionnelle mais aussi et surtout pour la facture d'instruments xylophones.

Mais, de part son origine biologique, le bois est un matériau hétérogène dont la qualité est définie en fonction de son adéquation à l'usage donné. Cette qualité, qui est le reflet de l'ensemble des propriétés physico-mécaniques, structurelles et chimiques du bois, découle directement de son mode de fabrication qui dicte les modalités et variations de sa structure multi-échelles (dimension et proportion des cellules constitutives, agencement micro et nanoscopique, composition chimique). Il apparaît donc évident que la production qualitative et quantitative du bois de vène est en grande partie tributaire des conditions du milieu (climat, sol...). Il convient donc d'étudier profondément l'espèce afin de mieux comprendre la variabilité de la qualité du bois aussi bien selon la provenance que dans l'arbre.

1.2 Contexte de l'étude

La recherche dans le domaine des sciences du bois au Mali se heurte à deux difficultés majeures : le manque de personnel qualifié et l'absence de laboratoire en matière de recherche sur le bois. En conséquence, les espèces locales sont restées peu connues tant au niveau de la qualité du bois qu'au niveau des caractéristiques de croissance. Selon Maïga (1999) les formations forestières du Mali n'ont pas historiquement bénéficié du

même intérêt financier que bon nombre de forêts dans la sous région et sont en conséquence moins bien connues. Beaucoup d'éléments restent donc à connaître en vue de faire le bon choix des essences locales à régénérer.

Au début des années 70, le choix de l'espèce ligneuse pour un reboisement optimal n'était pas simple et de lui pouvait dépendre le succès ou l'échec d'un projet. Fallait-il donc choisir des essences exotiques à croissance rapide (*Eucalyptus*, *Gmelina*) ou des essences locales bien adaptées au climat ? Afin de réduire la pression anthropique sur les formations naturelles et faute de données fiables sur le rythme de croissance des espèces locales et sans tenir compte des besoins et exigences légitimes des populations en matière de bois d'œuvre et de service, les programmes de reboisement ont alors opté durant des années pour des plantations d'essences exotiques à croissance rapide dans le souci d'approvisionner les villes en bois d'énergie (Schneider 1996). Il a été ainsi établi des secteurs modestes de forêts de plantation en *Eucalyptus camaldulensis* et *Gmelina arborea*. En fait, la croissance juvénile spectaculaire des espèces introduites a complètement occulté les espèces locales jusqu'à ce qu'on se rende compte que celles-ci ne répondaient pas, au stade adulte, aux besoins et exigences des populations puisque la qualité de leur bois était loin d'être reconnue similaire à celles des essences locales (Kelly et Cuny 2000). L'introduction d'espèces à croissance rapide n'a donc pas pu réduire la pression anthropique sur les formations naturelles. De plus il faut noter que ces espèces à croissance rapide ont un besoin en eau souterraine très élevé, ce qui contribue à accentuer d'avantage le dessèchement des terres.

Dans un contexte où la pluviométrie au Mali est de plus en plus déficitaire, l'option des espèces à croissance rapide devrait être substituée par celle des espèces locales bien acclimatées et qui sont reconnues être plus résistantes à la sécheresse (Aubreville 1950). Au Mali, les essences forestières susceptibles de fournir du bois d'œuvre sont principalement *Khaya senegalensis*, *Isoberlina doka*, *Daniela oliveri*, *Detarium microcarpum*, *Pterocarpus eurinaceus*, *Prosopis africana*, *Diospiros mespiliformis* etc. (Aubreville 1950). Ces espèces font aujourd'hui partie du groupe d'espèces méritant des actions prioritaires. Elles revêtent une grande importance notamment au niveau de l'utilisation diverse du bois (Kelly 1992) et sont de nos jours menacées de disparition suite à une forte pression anthropique. Mais faute de données fiables sur la qualité du bois en relation avec ses caractéristiques structurelles (rythme de croissance, anatomie,

extractibles), on assiste le plus souvent à un usage irrationnel et inapproprié du bois de ces espèces (fabrication de tambour djembé, d'escabeau, de charbon etc.).

Aujourd'hui, la croissance démographique suivie d'une concentration continue des populations en milieu urbain, crée une demande en bois de plus en plus forte au Mali. Ainsi, pour satisfaire cette demande, un véritable secteur économique s'est constitué en professionnalisant les activités d'exploitation, de transport et de commerce de bois. Les agriculteurs (paysans) se sont transformés en bûcherons et l'exploitation du bois occupe désormais leur deuxième activité (Touré 2001). Les espèces sont ainsi de nos jours menacées de disparition faute de régénération. Cette situation exige aujourd'hui une production de bois de plantation afin de répondre aux besoins légitimes des populations en bois. C'est pourquoi, le service forestier, conscient de la gravité de la situation, s'est engagé depuis les années 90, à travers un vaste mouvement de décentralisation de la gestion des ressources naturelles, à impliquer d'avantage les collectivités locales et les populations rurales dans la filière bois (Felber et Diallo 1991). Cela a permis une meilleure prise en compte du suivi des plantations et une gestion efficace de la coupe du bois. Les formations ont donc dans ces conditions bénéficiées d'une meilleure chance de survie et d'expansion étant donné qu'elles ont été réalisées, entretenues et aménagées par les populations elles-mêmes.

Si l'option d'une régénération artificielle des espèces locales demeure donc indispensable pour reconstituer le patrimoine forestier au Mali et couvrir ainsi le besoin en bois d'œuvre des populations, il est très utile de mieux comprendre la dynamique et la qualité du bois. Ceci implique une étude approfondie des caractéristiques de croissance, des propriétés structurelles ainsi que des propriétés physico-mécaniques du bois issus des formations naturelles existantes ; d'où l'intérêt de la présente étude.

1.3 Choix du vène

Le choix de l'espèce locale pour le présent travail a porté sur le vène (*Pterocarpus, eurinaceus* Poir) pour les raisons suivantes :

- L'espèce est, à notre connaissance, peu connue dans le monde de la recherche pour avoir été très peu diffusée en dehors de sa région mésologique ;

- l'intérêt particulier que l'espèce suscite auprès des populations tant au niveau du bois (matériau de construction, de menuiserie, d'instrument de musique etc.) qu'au niveau du fourrage comme aliments de bétail en période de saison sèche.
- L'espèce produit l'un des plus beaux bois de la région et reste en conséquence la plus menacée de disparition;
- L'espèce dispose d'une excellente distribution naturelle qui couvre une aire de répartition allant du domaine climatique guinéen au domaine climatique soudanien ;
- l'excellente capacité de l'espèce à enrichir les sols par la fixation d'azote, ce qui le laisse paraître comme un arbre idéal pour l'agroforesterie. Ainsi, face au déficit pluviométrique, aux coûts élevés des engrais chimiques et leurs effets sur l'environnement, le vène présente, des atouts certains dans la fertilisation naturelle des sols en milieu soudanien et guinéen (Sylla 1998) ;

1.4 Plan du travail

Le présent travail, qui répond ainsi aux soucis d'une meilleure compréhension de la variabilité de la qualité du bois du vène en vue d'une meilleure valorisation, s'articule autour de 4 chapitres :

- Chapitre I : La revue de littérature qui porte sur la généralité sur le bois, l'état actuel des connaissances sur le vène, les relations entre caractéristiques structurelles, métabolites extractibles et propriétés physico-mécaniques du bois ;
- Chapitre II : Le matériel et méthode qui décrit le matériel expérimental ainsi que les méthodes de détermination des caractéristiques étudiées;
- Chapitre III : Les résultats et discussion ;
- Chapitre IV : La conclusion générale et les perspectives

2 Revue de littérature

2.1 Introduction

Le bois est un matériau de prédilection que l'on retrouve dans presque tous les secteurs du développement socio-économique. L'appréciation de sa qualité est alors définie en fonction de son adéquation aux usages envisagés. Chaque caractéristique du bois peut donc répondre à une qualité donnée du moment qu'on peut lui associer une application. La notion de qualité du bois recouvre donc l'ensemble des propriétés (propriétés anatomiques, chimiques, physiques et mécaniques) qui conditionnent les aptitudes technologiques. Au Mali, le vène est particulièrement apprécié aussi bien pour la facture d'instrument xylophone que pour la menuiserie et l'ameublement. La qualité du bois pour de tels emplois peut donc être définie par ses propriétés acoustiques, son hygroscopicité, sa densité ainsi que ses propriétés structurelles et sa teneur en métabolites extractibles. Afin de faciliter la compréhension du texte, de mieux définir les objectifs et hypothèse de recherche et de pouvoir interpréter nos résultats avec conviction, le présent chapitre se propose d'abord de définir le matériau bois et les caractéristiques le qualifiant pour les emplois évoqués ci-dessus, de faire l'état des connaissances sur le bois de *P.erinaceus* et ensuite de faire une étude bibliographique sur l'influence de la structure anatomique et des métabolites extractibles sur la qualité du bois.

2.2 Caractéristiques structurelles du bois

2.2.1 Matériau d'origine biologique

Le bois constitue la majeure partie de l'arbre. Il est le produit d'un processus biologique long entretenu par l'arbre dans un rôle de soutien mécanique, de conduction et de réserve de ses substances nutritives durant toute sa vie. C'est une agglomération de cellules aux fonctions bien définies dont l'organisation dépend du génome des essences et des circonstances diverses de la vie de l'arbre. Ainsi, on trouve toutes les gammes de propriétés qui vont des bois très légers aux bois lourds, des bois tendres aux bois durs et des bois flexibles aux bois cassants.

Au cours de sa vie, un arbre grandit et "grossit". Cette double croissance est assurée respectivement par le méristème apical (tissus primaires situés au niveau des apex des

axes) et le méristème secondaire (situé à la périphérie du tronc et des branches appelé cambium ou « assise génératrice libéro-ligneuse »). En hauteur la croissance est essentiellement fonction du potentiel génétique de l'individu, de son âge et des conditions stationnelles et elle semblerait être peu affectée par la concurrence des arbres dominants (Hebert et al. 2002). En revanche l'arbre grossit en diamètre par divisions cellulaires du cambium. Ce qui correspond à la formation des différents tissus constitutifs du bois (conduction, soutien et réserve) dont la nature, la disposition et le mode d'agencement permet de décrire les essences. Le bois peut donc se définir comme étant un ensemble de tissus secondaires spécialisés (vaisseaux, fibres, parenchyme...), qui résultent de la différenciation vers l'intérieur de l'arbre (de la racine à la branche) des cellules du cambium libéroligneux (Keller 1994).

La différenciation des cellules cambiales qui conditionne la croissance individuelle en grosseur est fortement liée à la compétition entre individus, d'où l'intérêt des techniques sylvicoles pour contrôler la croissance radiale des individus en peuplement.

Dans les régions tempérées, une période d'activité cambiale allant du printemps à l'automne succède à un repos hivernal de végétation avec arrêt de formation du bois chez les espèces feuillues. En revanche dans certaines régions tropicales africaines on retrouve un partage de l'année en deux saisons (Mariaux 1967): une saison de pluies, propice à une reprise de la végétation et une saison sèche bien marquée où on assiste à un ralentissement voir un arrêt total de l'activité végétale. Cette saisonnalité de l'activité cambiale se traduit chez les espèces dont le cycle est bien tranché par la formation de cernes annuels bien distincts appelés « accroissement annuels ». Dans ces conditions il est alors possible, non seulement de définir l'âge d'un individu mais aussi de tracer son histoire et d'établir une dendrochronologie. L'accroissement annuel, informe sur le temps nécessaire à l'espèce pour atteindre le diamètre d'exploitation. Il reflète visuellement les conditions environnementales, informe sur d'éventuels changements des conditions environnementales favorables ou non à la dynamique de l'arbre et permet aussi de contrôler indirectement la qualité du bois produit.

2.2.2 Organisation macroscopique du bois

En coupe transversale (figure 1), on remarque que chez certaines essences, la partie centrale appelée le cœur, prend une teinte plus foncée tandis que la partie périphérique

forme une couronne claire. L'explication est qu'à une certaine distance du cambium, le bois perd sa fonction conductrice, en conservant seulement la fonction de soutien. Ce phénomène existe toujours mais ne s'accompagne d'une différence de couleur que dans certains cas. Deux types de bois sont ainsi distingués : le duramen (bois de cœur marqué par une coloration distincte) et la couronne claire dite aubier. Le duramen est la partie du xylème physiologiquement inactive contrairement à l'aubier. Ce qui lui confère un rôle pur de soutien. Sa formation est liée à l'imprégnation des parois et lumens des cellules consécutives à la mort des cellules parenchymateuse et à la libération de leur contenu (substance de réserve dégradées) dans la masse du bois ; d'où sa coloration foncée tendant généralement vers le brun et le rouge. Les raisons de la mort des cellules seraient liées à un déficit d'eau et à une concentration élevée de CO₂ suite à l'éloignement du cambium (Bowyer et al 2007). Le processus de duraminisation se fait cellule par cellule et il serait discontinu au cours de l'année ce qui serait à l'origine de veines colorées présentes chez certaines espèces (Mariaux 1967).

Quant au rapport duramen/aubier, il serait influencé par la vigueur de la couronne vivante dont l'activité biologique nécessite une largeur conséquente de bois d'aubier. La duraminisation servirait à réguler la proportion d'aubier nécessaire au déroulement normal des activités biologiques de l'arbre en termes de réserve, de transport et de restitution des nutriments. Le duramen est le lieu où s'accumulent des gommés, des tanins, des résines et des substances colorantes qui lui donnent souvent une teinte plus sombre et une durabilité vis-à-vis des attaques d'origine biologique (champignons, insectes). En revanche ses propriétés technologiques telles que le séchage, l'imprégnation, la finition sont chez certaines espèces fortement influencées par la présence des extraits ainsi que par certaines modifications anatomiques comme la présence des thylles, l'aspiration et l'incrustation des ponctuations. La proportion de duramen dans un arbre varie selon les espèces et selon les individus et plus particulièrement selon l'âge et la croissance. De manière générale, plus l'arbre est âgé plus la proportion de duramen est élevée. De même, plus le taux de croissance est important (ce qui sous entend un houppier développé), plus la proportion d'aubier est élevée. Outre ces deux zones, l'observation macroscopique de la section transversale du tronc (figure 1) de l'arbre permet de distinguer :

- le cambium libéro-ligneux, couche de cellule en constante division cellulaire

- le liber, encore appelé écorce interne, véhicule la sève élaborée du feuillage vers les zones de croissance.
- le rhytidome, appelé écorce externe, très riche en extractibles, assure le système défensif de l'arbre contre les agressions externes.

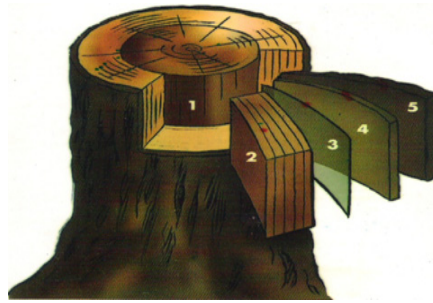


Figure 1. Structure d'un tronc d'arbre (adopter de Lenger B. et al 1999)

duramen, 2 – aubier, 3 – cambium, 4 – liber, 5 – écorce externe (rhytidome)

2.2.3 Organisation microscopique du bois

A l'échelle microscopique, l'agencement des différents tissus, issus de la différenciation des cellules cambiales en une structure tridimensionnelle, conduit à une multitude de schémas d'organisation structurale caractéristiques de chaque essence. Ce schéma de structure (figure 2) qui correspond à l'organisation spatiale des éléments constitutifs et leur morphologie propre définit le plan ligneux (Owoundi 1992). Ce dernier reste constant à l'intérieur de chaque espèce et permet ainsi de décrire et d'identifier les espèces en relation avec leur classement botanique. Il permet de distinguer fondamentalement deux grands groupes d'essence : les feuillus et les résineux. Les caractéristiques anatomiques de ces deux groupes d'essences sont aujourd'hui suffisamment décrites dans la littérature (Keller 1994, Bowyer et al 2007).

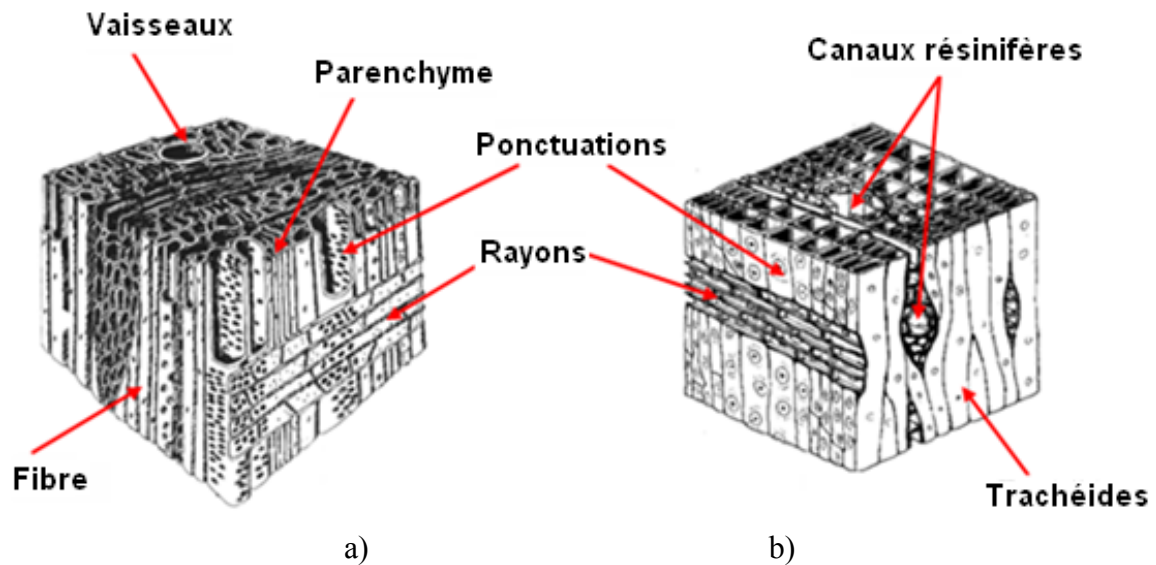


Figure 2. Plan ligneux du bois : a)-feuillus et b)- Résineux (Keller 1994)

Ainsi, chez les feuillus, le bois comporte principalement trois types de cellules : les vaisseaux, les fibres (libriformes et trachéides) et les parenchymes (axial et radial) :

- Les fibres libriformes sont des cellules fusiformes de faible diamètre et à parois épaisses. Quant aux fibres trachéides, elles ne se différencient des précédentes que par la présence de ponctuations aréolées et elles ne sont présentes que chez certaines espèces comme le bouleau et le hêtre. Les fibres assurent la rigidité et constituent ainsi un support mécanique à la tige. La proportion des fibres varie beaucoup entre les espèces et influence la résistance mécanique du bois ;
- les vaisseaux sont de véritables "conduits d'eau" (tissus de conduction). Longitudinalement, ils sont disposés bout à bout et communiquent par des perforations multiples ou simples (figure 4a) tandis que latéralement ils sont interconnectés d'une part entre eux par des ponctuations aréolées disposées selon l'essence soit en oblique, en fil horizontale ou en grille (scalariforme) (figure 4b) et d'autre part avec les autres éléments (les parenchymes) par des ponctuations semi-aréolées. La dimension et la proportion ainsi que leur contenu sont déterminantes dans l'appréciation des propriétés technologiques. Le mode de distribution des vaisseaux à l'intérieur du cerne (figure 3) permet de classer en gros les espèces en trois catégories : les espèces à zone poreuse, les espèces à zone semi-poreuse et les espèces à pores diffus.

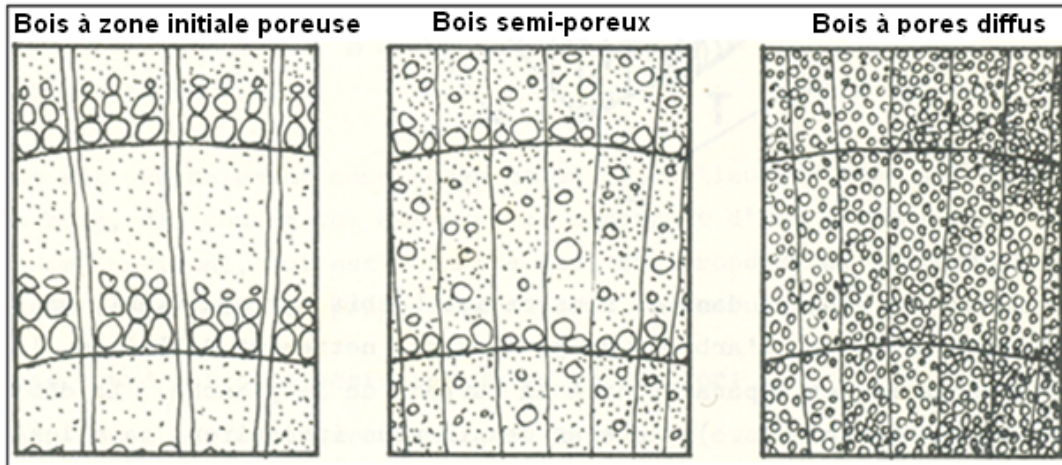


Figure 3. Mode de distribution des vaisseaux dans l'accroissement annuel (Keller 1994)

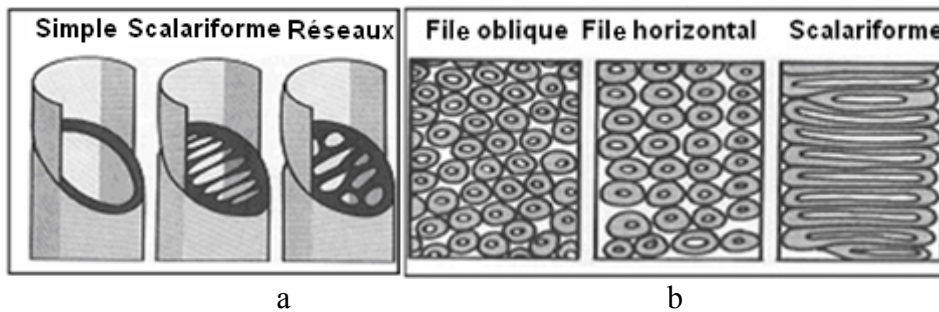


Figure 4. Caractéristiques des vaisseaux : a)-Type de perforations vasculaires b)-ponctuations intervasculaires (Bowyer et al 2007)

- les cellules de parenchyme axiales et radiales servent à l'entreposage et à la distribution de substances nutritives. Elles sont peu lignifiées et abondamment ponctuées (ponctuations simples). Les rayons peuvent être uni- ou multi-sériés. Leur hauteur, leur largeur et leur proportion, variables selon l'espèce, influencent considérablement les propriétés du bois (zone de faible résistance mécanique et des fentes de séchage etc.). Quant aux cellules du parenchyme axial, elles sont selon l'essence disposées autour des vaisseaux (paratrachéaux) ou isolées des vaisseaux (apotrachéaux).

Contrairement aux feuillus, les résineux ont une structure ligneuse beaucoup plus simplifiée. En effet, la quasi totalité de la masse du bois de ces essences est formée d'un seul type de cellules : les trachéides longitudinales disposées en files radiales. Ces trachéides assurent à la fois le rôle de soutien et de conduction des substances nutritives. Associées à ces cellules, on note la présence des parenchymes de rayon (toujours présentes) et des cellules de parenchyme axial (peu abondant et présent que chez

certaines espèces comme le séquoia par exemple). Chez certaines essences, on observe également des canaux résinifères (épicéas, pins, mélèzes et douglas).

2.2.4 Structure de la paroi cellulaire

Les caractéristiques de la paroi cellulaire désignées sous le vocable « Ultra structure du bois » sont l'ensemble des caractères de structure qui échappent à l'observation microscopique classique. Il s'agit, par opposition à l'étude de la morphologie des cellules et de leur assemblage en tissus, de l'étude de la constitution des parois cellulaires, de leurs anomalies et de leurs stades de formation (Mariaux 1983).

La structure de la paroi cellulaire (figure 5) présente une stratification en trois (3) couches qui se différencient selon la constitution chimique, l'orientation des microfibrilles de cellulose et les épaisseurs respectives. De la périphérie vers la cavité cellulaire, on distingue généralement :

- 1 la lamelle mitoyenne (ou lamelle moyenne), amorphe, isotrope est constituée en grande partie de substances pectiques, macromolécule de nature glucidique composées essentiellement d'acide galacturonique (polysaccharides acides), de lignine et d'eau. C'est une paroi hydrophile qui enveloppe les cellules et dont les propriétés physico-chimiques conditionnent la cohésion des cellules contiguës ;
- 2 la paroi primaire très hydrophile (jusqu'à 90 % de son poids en eau) et riche en hémicelluloses est constituée de microfibrilles de cellulose ayant un angle d'environ 85 (ou souvent sans orientation distincte) par rapport à l'axe de la cellule. Elle se caractérise surtout par sa grande plasticité ; ce qui favorise l'élongation post-cambiale,
- 3 la paroi secondaire, plus épaisse, est formée essentiellement de cellulose hautement cristalline (environ 94 % de la masse) dont la cohésion est assurée par une matrice hémicellulosique qui, à son tour, est liée à une matrice de lignine par des liaisons covalentes. La paroi secondaire joue un rôle très important dans le déterminisme des propriétés physico-mécaniques du bois grâce à la teneur élevée en cellulose, sa structure multilamellaire complexe et l'orientation des microfibrilles de cellulose. Cette paroi est composée de trois (3) sous-couches (figure 5) :

- la sous-couche S1, plus externe et plus fine, est composée de microfibrilles orientées à environ 60° de l'axe de la cellule,
- la sous couche S2 de la paroi secondaire dont l'angle des microfibrilles varie de 10 à 30° est la plus épaisse et la plus importante en termes de volume et d'impact sur les propriétés du bois,
- la sous-couche S3, la plus interne est située en bordure de la cavité cellulaire ; elle comporte des microfibrilles orientées transversalement (80°).

Les parois cellulaires sont aussi munies d'ouvertures appelées ponctuations qui permettent la circulation latérale des substances ainsi que les échanges intercellulaires durant toute la vie de l'arbre (Fengel and Wegener 1984). Le type et la forme de ces ponctuations sont caractéristiques des tissus constitutifs du bois et leur origine résiderait dans un phénomène physiologique lié à la différenciation des cellules sources. En général on distingue principalement deux types de ponctuations (figure 6): les ponctuations simples et les ponctuations aréolées. Les premières sont généralement présentes chez les fibres libriformes et les parenchymes tandis que les secondes ne sont présentes que chez les trachéides et les vaisseaux.

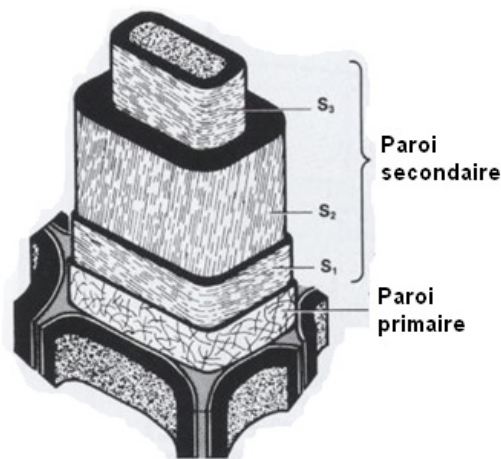


Figure 5. La paroi cellulaire (Bowyer et al 2007)

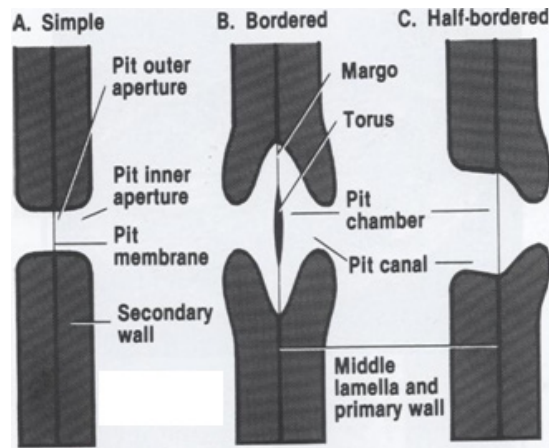


Figure 6. Types de ponctuations (Bowyer et al 2007)

2.3 Nature chimique du bois

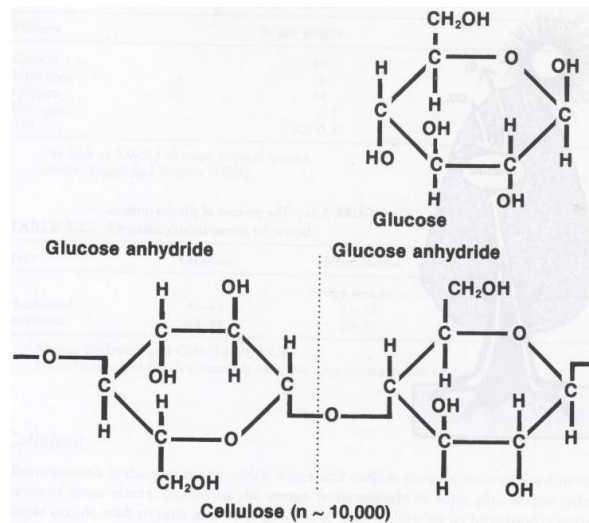
2.3.1 Les composants structuraux

La composition élémentaire du bois montre que trois éléments constituent à eux seuls près de 99 % de la matière ligneuse (le carbone, l'oxygène et l'hydrogène). Les principaux composants des parois cellulaires qui constituent l'essentiel de la masse du bois chez toutes les espèces sont des polymères végétaux complexes et de masse molaire importante : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Les microfibrilles de cellulose composés essentiellement de polymères solides et linéaires de glucose sont associées à des polymères amorphes polysaccharidiques (hémicellulose) noyés dans une matrice amorphe de polymère phénylpropane (lignine) et donnant ainsi naissance à une structure composite dite paroi cellulaire ligno-cellulosique (Rowe 1989).

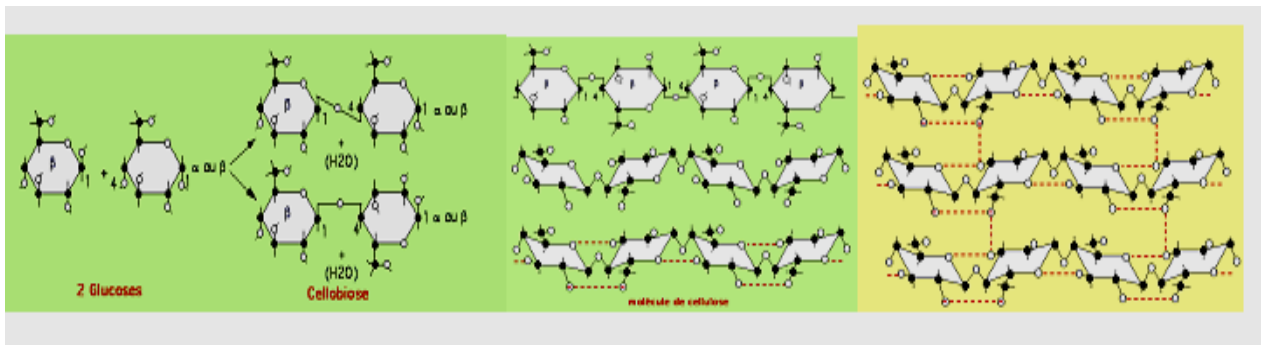
2.3.1.1 La cellulose

La molécule de cellulose est un polymère linéaire formé par la répétition régulière de la cellobiose (figure 7a). Celui-ci est caractérisé par une liaison glycosidique béta (β) entre deux maillons de D-glucose ayant la conformation chaise 4C_1 . En plus des liaisons covalente (C - C et C - O - C) très stables qui assurent une grande résistance mécanique, la molécule de cellulose dispose d'un nombre important de groupement hydroxyles le long de la chaîne qui lui permet de former des liaisons hydrogènes intramoléculaire [(3) OH---O (5) et (2) OH---OH (6)] et intermoléculaire [(6) OH---OH (3')], d'où l'aspect rubané de la molécule (figure 7b). Les molécules de cellulose

forment des microfibrilles dont les dimensions et l'orientation affectent considérablement les propriétés physiques et mécaniques du bois.



a) Cellobiose (Bowyer et al 2007)



b) <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/paroi/cellulose.htm>

Figure 7. Polymère de la cellulose formant la micro-fibrille

2.3.1.2 L'hémicellulose

Le terme hémicellulose regroupe tous les polysaccharides liés à la cellulose par des liaisons hydrogènes et qui sont soit des hexosanes (même formule moléculaire que la cellulose $(C_6H_{10}O_5)_n$ mais dont l'hydrolyse donne d'autres sucres en C6, mannose en particulier), soit des pentosanes dont l'hydrolyse donne des sucres en C5 et dont le plus abondant est le xylose. Ainsi, on distingue :

- le O-acetyl-glucurono xylane (figure 8a), l'hémicellulose majeure des feuillus où le xylane qui forme la chaîne principale, est essentiellement constitué des résidus fréquemment acétylés de D-xylose liés par des liaisons β -(1,4).

- le O-acetyl-galactoglucomanane (figure 8b), l'hémicellulose principale pour la plupart des conifères où le mannane qui forme la chaîne principale est constitué des résidus fréquemment acétylés de β -D mannopyranose et de β -D glucopyranose liés par des liaisons β - (1,4).

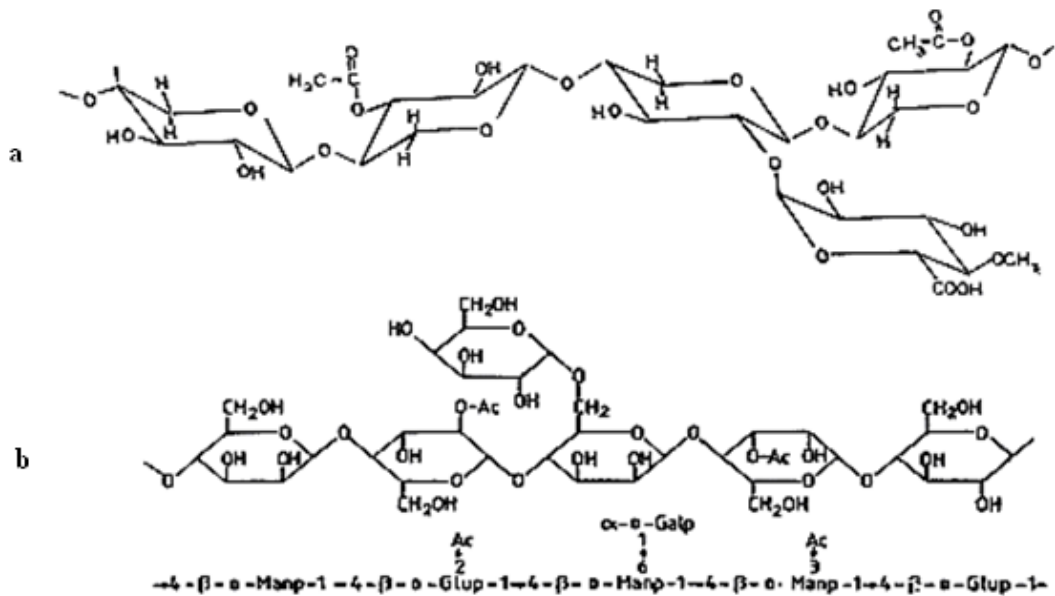


Figure 8. Hémicellulose O-acethyl-galcurono xylane des feuillus (a) et O-acethyl-galactoglucomanane des résineux (b) (Haluk 1994)

2.3.1.3 La lignine

Les lignines forment la fraction non glucidique la plus importante des parois végétales. Ce sont des polymères complexes amorphes de structure tridimensionnelle issus des dérivés d'alcools cinamiques (alcool trans : p-coumarique, coniférilique, sinapinique) ayant une structure phénylpropane (figure 9) et qui incrustent la paroi cellulaire. Elle sert de colle entre les microfibrilles de cellulose à travers des liaisons covalentes esters (avec les résidus acides uroniques) et éthers (avec les hydroxyles alcool primaires du galactose et de l'arabinose) qui la relie à la matrice d'hémicelluloses. La lignine non seulement contribue à la rigidité des parois cellulaires (important pour la croissance en hauteur des arbres et le renforcement de la résistance mécanique du bois) et à la réduction de la perméabilité des parois cellulaires (important pour le transport interne des fluides), mais aussi confère de la plasticité du matériau bois et de la toxicité vis-à-vis des attaques biologiques.

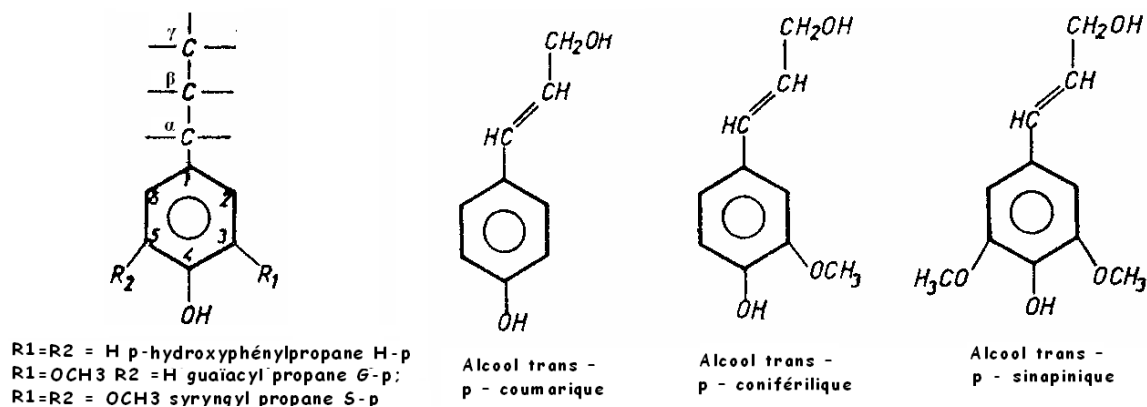


Figure 9. Monomères constitutifs de la lignine (Brunow et al 1999)

2.3.2 Les extractibles

Mise à part les éléments majeurs constituant son squelette, le bois contient une proportion importante de substances non ligno-cellulosiques (2 à 10 % voir 20 % chez certaines espèces) (Rowe 1989). Il s'agit non seulement des substances protéiques et des matières de réserve (amidon, sucre, lipide) dites métabolites primaires dans les cellules vivantes, mais aussi une quantité parfois importante de métabolites secondaires appelés extractibles du bois et des composés minéraux. Ces substances sont variables suivant l'espèce et les conditions du milieu.

Les extractibles sont définis comme étant les constituants non structurels du bois pouvant être extrait par des solvants organiques ou par l'eau (Hart 1989). Ce sont des molécules libres qui se trouvent dans la structure poreuse du bois et qui sont accessibles selon leur nature aux différents solvants. La teneur et la composition de ses molécules varient selon l'espèce, le site géographique, la saison, l'âge et même en fonction de la partie du bois (duramen, aubier, écorce) dans l'arbre. Généralement définis comme des substances non ligno-cellulosiques résultant en grande partie du vieillissement et de la duraminisation du bois, les extractibles constituent en quelque sorte la dernière phase de la formation du bois. Ce qui d'ailleurs en vaut leur appellation générale de métabolites secondaires.

Les métabolites secondaires (les polyphénols, les hydrocarbures, les huiles et cires etc.), contrairement aux métabolites primaires qui sont des substances indispensables à la croissance de l'arbre (sucre simples, acides aminés, acides nucléiques, protéines etc.), seraient des substances destinées non pas à la croissance de l'arbre mais comme

moyens de défense contre les contraintes extérieures (barrière protectrice contre la dessiccation ou les insectes et champignons). Elles apparaissent suite à la mort des cellules de parenchyme provoquée par la duraminisation (éloignement du cambium, déficit en eau, cessation de l'activité enzymatique, accumulation du dioxyde de carbone et de gaz d'éthylène etc.) et sont à l'origine des couleurs, des odeurs, ou encore de la résistance face aux agresseurs biologiques (Jodin 1994).

Comparées aux macromolécules structurales du bois, les extractibles sont des molécules plus légères que l'on retrouve dans la structure poreuse du bois. Elles sont généralement présentes dans les cavités cellulaires (lumens, espaces intercellulaires, canaux laticifères ou résinifères) mais peuvent aussi infiltrer la structure poreuse de la paroi cellulaire (micro-capillaires ou espaces insuffisamment remplis par la lignine et les hémicellulose). Le terme extractible proviendrait d'ailleurs du fait que l'on peut extraire ces substances par l'intermédiaire de solvants polaires (acétone, éthanol etc.) ou apolaire (éther de pétrole, toluène, benzène etc.) sans pour autant détruire les constituants structuraux du bois.

2.3.2.1 Nature des substances extractibles

Les substances extractibles recouvrent un grand nombre de composés représentant toutes les familles des composés organiques : les terpènes et dérivés (alcool, carbonyle et carboxyle), les composés aromatiques (les phénols et dérivés), les acides gras et dérivés, les alcaloïdes etc. Ces constituants peuvent se regrouper selon leur solubilité dans l'eau en composés hydrophiles et hydrophobes (ou lipophiles). Les composés solubles dans l'eau sont généralement les glucides et glycosides, certains polyphénols et les sels minéraux ; tandis que les lipophiles solubles dans les solvants organiques, recouvrent un grand nombre de composés organiques dont les terpénoïdes, les cires et glycérides (esters d'acides gras et de glycerol), les graisses, les acides gras et certains polysaccharides et polyphénols etc. Les extraits peuvent donc être considérés comme des mélanges complexes dont la composition chimique dépend non seulement du solvant d'extraction, mais aussi et surtout du genre botanique de l'espèce. Parmi ce grand nombre de composés extractibles, les phénols et les terpènes ainsi que leurs dérivés, sont ceux qui, de nos jours, attirent le plus l'attention des chercheurs tant du point de vue de leur application pratique que de leur effet sur les propriétés physiques, mécaniques et technologiques du bois.

2.3.2.1.1 Les terpènes et terpénoïdes

Les terpènes (figure 10 et 11) sont des substances naturelles dérivées de la structure squelettique en C₅ de l'isoprène (méthyl 2-butadiène C₅H₈). Ils se divisent suivant le nombre d'unité C₅H₈, en monoterpène (2 unités), sesquiterpènes (3 unités), diterpènes (4 unités), triterpènes (6 unités) (Haluk et al 1994, Obst R 1998). Ces composés peuvent être sous forme d'hydrocarbures ou des dérivés d'hydrocarbures avec des groupements fonctionnels OH ou C=O, COOH ; ils sont alors dits terpénoïdes. Les terpénoïdes constituent une partie importante des extractibles de plusieurs bois où ils constituent les composés majeurs des extraits aux solvants non polaires (Dev. 1989). Les huiles essentielles, le latex, les résines sont, en grande partie, constitués de terpénoïdes. Les mono et les sesquiterpènes sont les composés habituels des huiles essentielles tandis que les diterpènes et les triterpènes, moins volatiles, s'y retrouvent rarement (Dev S. 1989). Sous forme acyclique, monocyclique ou bicyclique, les composés terpénoïques peuvent ainsi se retrouver aussi bien dans la fraction volatile (composés lipophiles constituant les huiles essentielles) que dans la fraction non volatile (les glycosides, les lactones, les acides résiniques etc.) des substances extractibles.

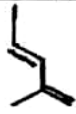
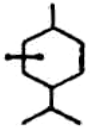
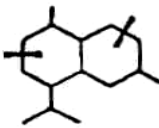
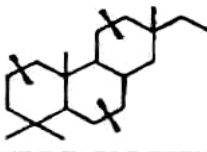
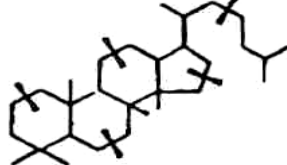
Name	Number of 5C-units	Structure
Isoprene (basic unit)	1 × 5C	
Monoterpenes	2 × 5C	
Sesquiterpenes	3 × 5C	
Diterpenes	4 × 5C	
Triterpenes	6 × 5C	

Figure 10. Classe des terpènes (Haluk et al 1994)

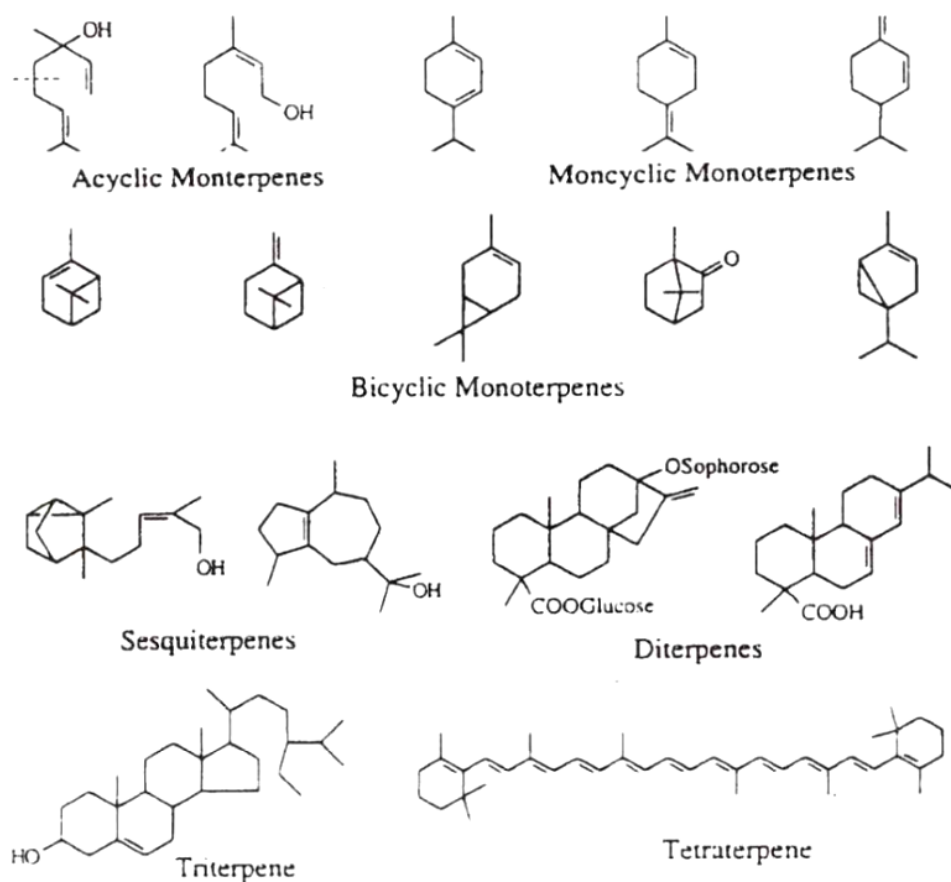


Figure 11. Structure des terpènes et terpénoïdes (Obst 1998)

2.3.2.1.2 Les polyphénols

Les composés phénoliques sont des molécules organiques comprenant un noyau aromatique et au moins un groupement hydroxyl (OH) libre ou engagés avec d'autres molécules (Croteau *et al* 2000). Ils sont présents dans toutes les parties des végétaux supérieurs (racines, tiges, feuilles, fleurs, pollens, fruits, graines et bois) et sont impliqués dans de nombreux processus physiologiques comme la croissance cellulaire, la rhizogenèse, la germination des graines ou la maturation des fruits (Boizot et Charpentier 2006). Ces composés renferment les phénols simples (composés en C₆, C₆-C₁, C₆-C₂ et dérivés aldéhydes acides (figure 12)), les stilbènes (composés en C₆-C₂-C₆ : figure 13) et les dérivés du phénylpropane (composés en C₆-C₃ : les lignanes (figure14d), la subérine, coumarines et furacoumarines etc.) et du phénylpropane acétate (C₆-C₃-C₆, les flavonoïdes, les tannins etc. figure14a, b, c). Ce dernier groupe est connu sous le nom de phénylpropanoïdes et phénylpropanoïdes acétates.

Certains phénols simples et les stilbènes sont issus de la voie biosynthétique du phénylpropane avec une dégradation du C6-C3 initialement formé. D'autres, comme l'acide gallique, sont par contre issus d'une voie directe d'aromatation de l'acide shikimique (Stevanovic 2008, Croteau et al 2000, Obst R 1998). Les phénols simples à l'état pur sont solubles dans les solvants polaires et la plupart des glycosides possèdent une solubilité dans l'eau de leur partie glycone. Parmi les phénols simples, on note la vanilline que l'on trouve dans la sève de l'érable ainsi que dans le bois des feuillus. On rencontre aussi le syringaldehyde, les acides phénoliques correspondant du squelette C6-C1 tel que l'acide salicylique, l'acide gallique, l'acide syringique, l'acide vanillique ainsi que leurs esters et glycosides dans le bois. Parmi les stilbènes (figure 13), on peut noter la pinosylvine et le resvératrol ainsi que leurs dérivés éthers.

Avec plus de 4500 représentants connus, les flavonoïdes constituent une grande catégorie de composés phénoliques présents dans la majorité des tissus végétaux. Ces composés sont des antioxydants très puissants. Ils regroupent les aurones, les chalcones, les isoflavonoïdes, les flavonoles, les flavonones, les flavanones, les flavones, flavan 3-4- diols (flavan 3-ol), catéchine et anthocyanines (figure 14a et 15). Quant aux tannins, ils se présentent sous deux formes : les tanins hydrolysables (figure 14b) qui sont des esters d'acide gallique et d'acide éllagique solubles dans l'eau et les tanins condensés (figure 14c) qui sont des oligomères de flavanes 3-ols et 3, 4 diols (dérivés du catéchine ou, proanthocyanidine). Ces composés ont la propriété de précipiter les protéines en solution aqueuse et la manifestation d'une astringence caractéristique. Ils sont recherchés principalement pour leur activité antioxydante mais aussi pour leur activité antifongique, antiradicalaire pour les effets bénéfiques qu'ils exercent sur la circulation sanguine etc.

Les flavonoïdes jouent non seulement un rôle primordial dans la coloration des fleurs, des fruits et du bois (Imamura 1989), mais aussi ils interviennent dans la relation plante-herbivore ainsi que dans le système défensif des plantes contre les agressions externes (dessiccation, insectes, champignons, UV). D'autres sont par ailleurs connus dans l'industrie pharmaceutique comme produits anticancerogène, antiinflammatoire, antiviral, antitoxique, inhibiteurs d'hormone etc. Le dépôt massif des proanthocyanidines et des isoflavonoïdes contribue fortement à la coloration et à la durabilité naturelle du bois (Croteau et al 2000, Obst. 1998).

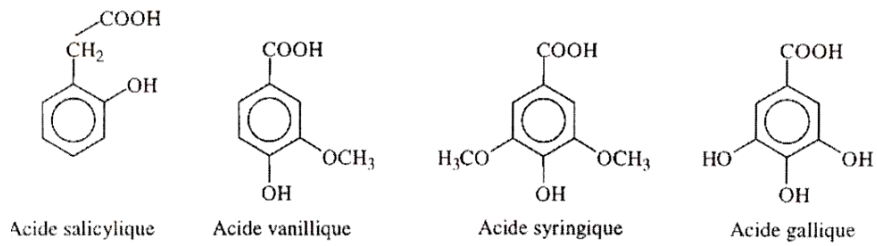


Figure 12. Phénols simples (C6-C1 et C6-C2) (Stevanovic 2008)

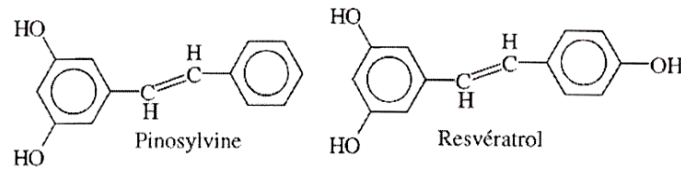
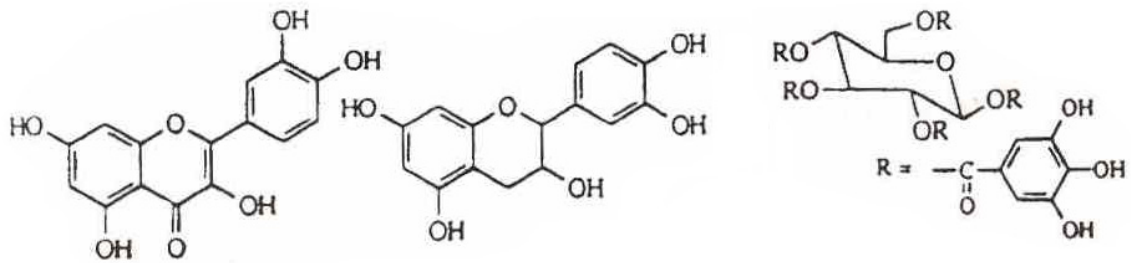
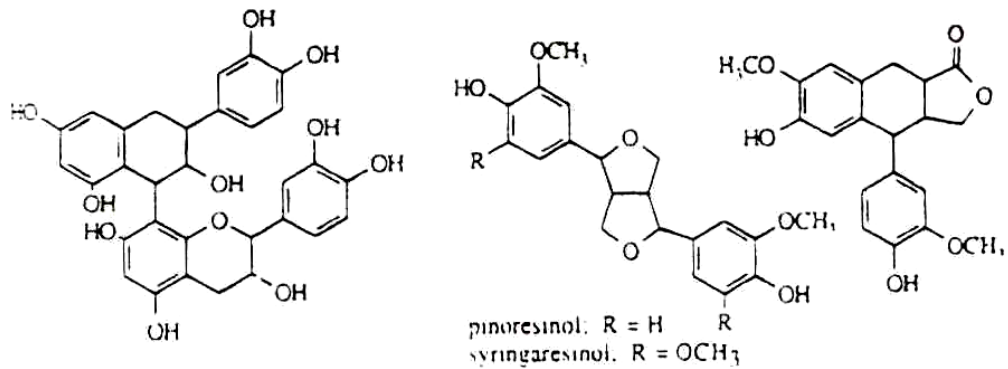


Figure 13. Stilbènes (C6-C2-C6) (Haluk et al 1994)



a) Flavonoïdes : flavonol et flavan-3-ol (C6-C3-C6) b) Tanins hydrolysables : (esters de glucose et de l'acide gallique et ces dérivés)



c) Tanin condensé (proanthocyanidines)

d) Lignanes (C6-C3)

Figure 14. Structure des tanins et des lignanes (Fengel et Wegener 1984)

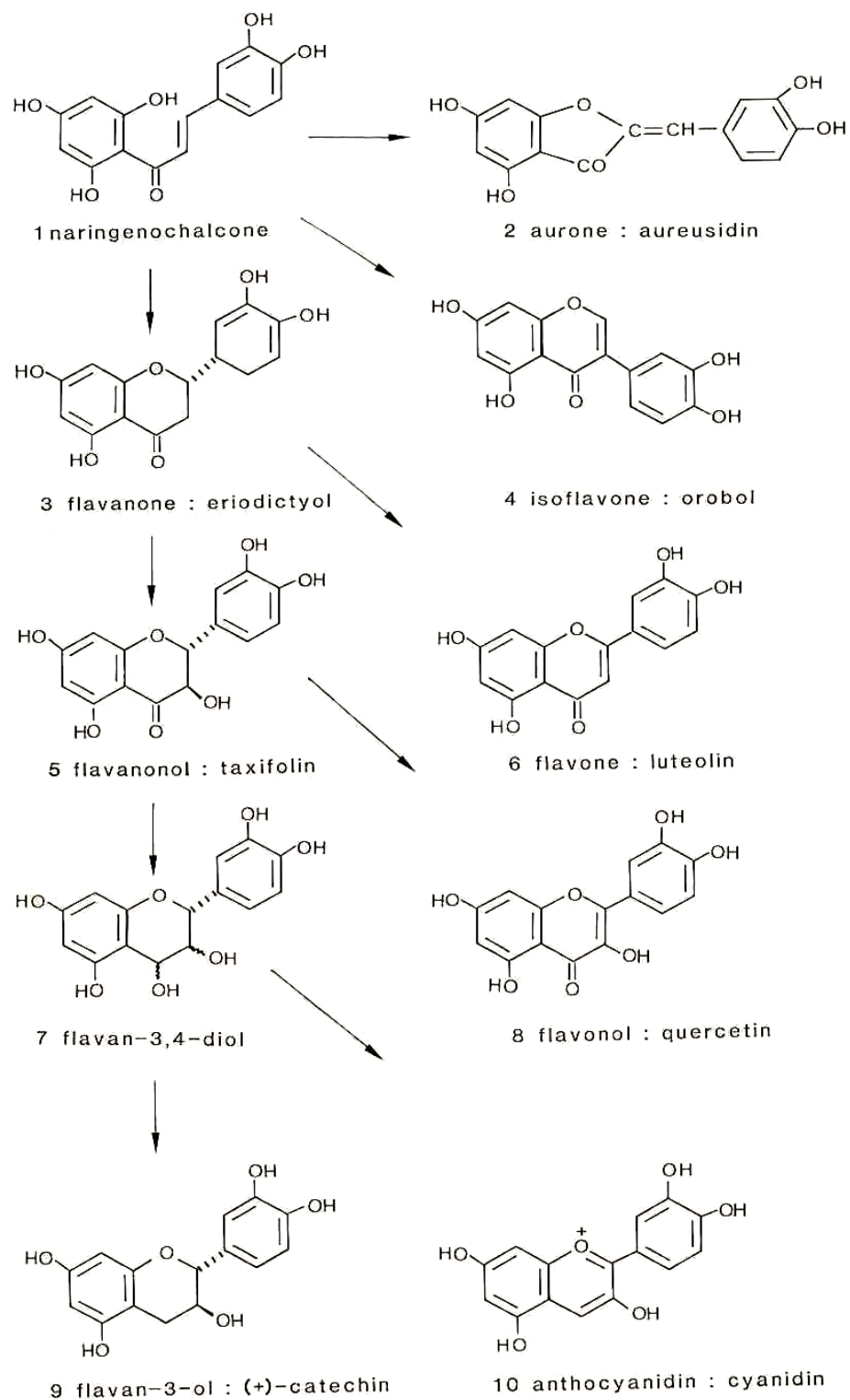


Figure 15. Classe de flavonoïdes (Rowe 1989)

2.3.2.1.3 Les Cires et glycérides

Les cires et les glycérides sont des esters d'acides gras et d'alcool. Les cires sont des esters d'acides gras et d'alcool à longue chaîne, tandis que les glycérides sont des esters

d'acides gras et de glyc erol (figure16). Ainsi, les acides gras, tel que l'acide linoléique isolé du bois de certaines espèces (*Betula verrucosa* ou *Quercus alba*), sont sous forme de triglycérides (Haluk et al 1994).Ce type d'extractibles est retrouvé dans les cellules de parenchyme.

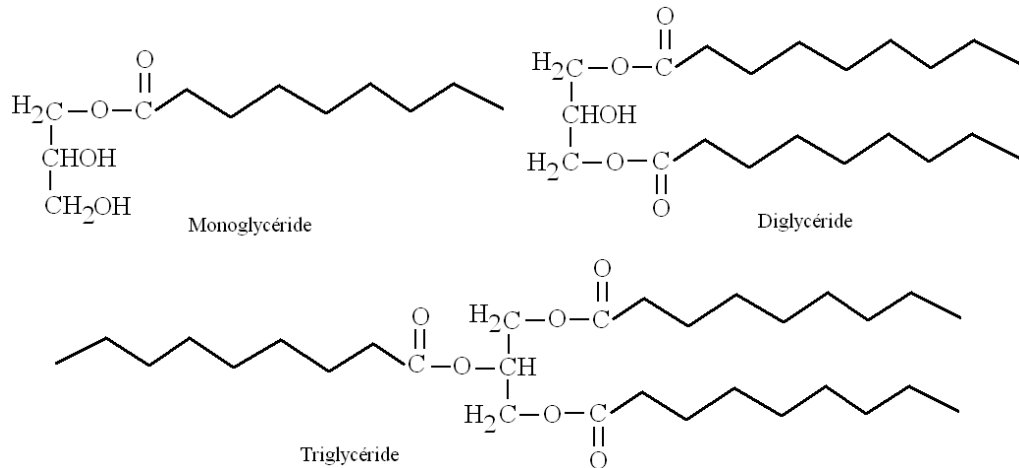


Figure 16. Les Glycérides (adapté de Haluk et al 1994)

2.3.2.2 Teneur et distribution des extraits

La teneur et la composition en extraits varie en fonction de l'essence, du site géographique, des conditions environnementales et même de la saison. La principale source de variation intra-arbre des taux d'extraits est la duraminisation :   une même hauteur de l'arbre, la charge d'extraits peut passer de moins de 5 % dans l'aubier à 10 %, voire 20 % du poids anhydre du bois dans le duramen. Dans l'arbre, le taux d'extraits dans le duramen augmente lorsque l'on s'éloigne de la moelle jusqu'à la limite duramen–aubier et diminue également dans le duramen quand la hauteur dans l'arbre augmente (Imamura 1989, Nepveu 1994, Holmbolm 1999, Gominho et al 2001).

En effet, Gominho *et al* (2001) trouvent que la quantité des extraits dans le duramen équivaut au double de ceux de l'aubier (7,6% contre 3,7%). Selon l'auteur, les extraits se déposent non seulement dans les micro-capillaires du bois mais aussi infiltrent durant la duraminisation, la paroi cellulaire sous forme de minuscules molécules

Hernandez (1989) trouve qu'environ 75% des extraits à l'eau résident dans la paroi cellulaire contre 25 % dans les lumens chez le séquoia sempervirens.

Hemingway et Hillis (1970) estiment que le facteur contrôlant la quantité et la composition des extraits est à mettre au compte des cellules de rayon durant la phase juvénile de leur développement.

Gierlinger *et al* (2004) rapportent une variabilité allant de 5,6 à 20,5 % du taux des extraits à l'eau chaude dans le duramen chez quelques espèces de mélèze (*Larix decidua var. decidua*, *L. decidua var. sudetica*, *L. kaempferi*, *L. eurolepis*) ; mais trouve un effet non significatif de l'origine géographique sur ces taux. En revanche, il souligne une différence significative selon l'espèce et la provenance géographique (les composés phénoliques ayant une concentration plus élevée chez *L. kaempferi* et *L. x eurolepis*) pour des taux d'extraits à l'acétone. Selon cet auteur, l'évolution radiale (de la moelle à la limite duramen-aubier) du taux des extraits est légèrement linéaire à curviligne. De ces travaux, il ressort que la teneur des extraits à l'acétone peut atteindre en 100 ans une variation de 2,2 %, alors que celle à l'eau chaude est d'environ 5 %. L'auteur constate aussi que la concentration des extraits à l'eau chaude doublerait tout les 30 cm. Il trouve également que le coefficient de corrélation entre la largeur de cerne et le taux d'extrait change avec l'âge cambial en montrant des rapports positifs dans la première phase de croissance et des rapports négatifs aux environ de 100 ans.

Roffael *et al* (2004) ont examiné l'acidité des extraits à l'eau chaude chez *Castanea sativa*. Selon ces travaux l'acidité des extraits est d'environ 3 % supérieure dans le duramen que dans l'aubier, d'où un pH plus élevé dans l'aubier que dans le duramen.

2.3.2.3 Solvants et techniques d'extraction

L'extraction est généralement effectuée avec des solvants polaires (acétone, éthanol etc.) ou apolaire (éther de pétrole, toluène, benzène etc.) mais le choix du solvant d'extraction est fonction du type de composé visé et de sa localisation cellulaire (tableau 1), d'où l'intérêt d'une extraction séquentielle (ou parallèle) aux solvants de polarité et poids moléculaires différents afin d'obtenir une information sur la nature des composés et leur localisation. Les essais d'extraction normalisés sont le plus souvent effectués sur matériel broyé, mais la littérature fait aussi état des essais sur du bois natif. Ces derniers ont l'avantage de permettre les mesures de propriétés sur le même échantillon avant et après extraction. Il faut toutefois noter qu'il n'est pas évident d'obtenir une extraction complète sur du matériel solide et, en plus, le processus d'extraction induirait des

retraits anormaux liés au phénomène du collapse (Choong et Achmadi 1991). Les solvants généralement utilisés sont l'éthanol, l'acétone, l'hexane (le benzène, le toluène), le dichlorométhane ainsi que des ratios en volume d'éthanol-toluène 1 :2 ou acétone-eau 9 :1 (Holmbolm 1999).

La technique d'extraction conventionnelle reconnue est l'extraction au soxhlet. Le soxhlet existe en différentes tailles selon la quantité de poudre à extraire qui peut aller de 0,5 à quelques centaines de gramme (g), mais les standards recommandent des extractions avec 10 g pour un volume de 250 ml de solvant. Une autre méthode alternative à l'extraction au soxhlet est l'extraction au soxtec (figure 17) dont le principe est basé sur l'immersion de la poudre dans le solvant. Cette méthode est plus rapide et nécessite une quantité moins importante de solvants. D'autres méthodes non conventionnelles dont l'avantage réside essentiellement dans la rapidité et l'économie du solvant, telles que le SFE (Supercritical Fluid Extraction) et le ASE (Accelerated Solvent Extraction) sont souvent utilisées (Holmbolm 1999).

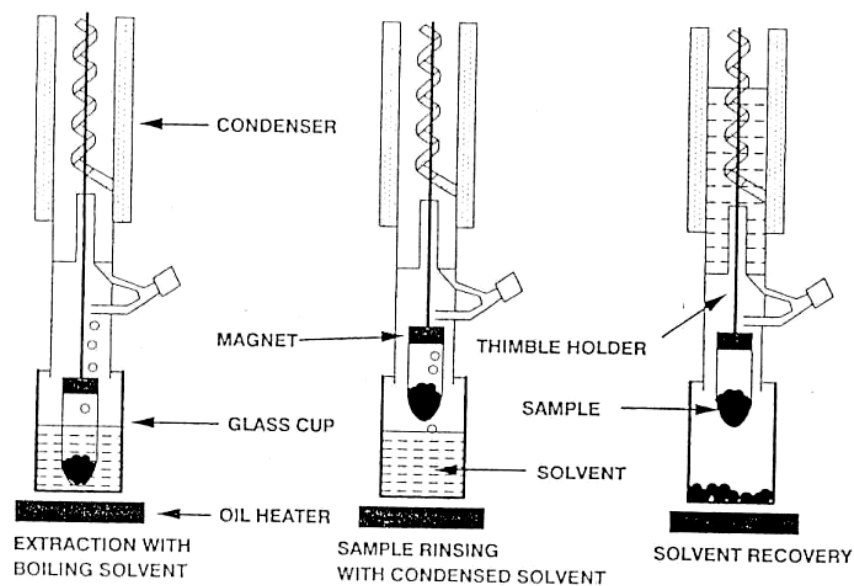


Figure 17. Techniques d'extraction au soxtec (Holmbom 1999)

Tableau 1. Classe d'extraction et groupe d'extraits (Fengel et Wegener 1984)

Extraction	Groupes principaux	Sous-groupes	Substances individuelles (exemples)
Distillation à la chaleur	<ul style="list-style-type: none"> → Terpènes → Phénols → Hydrocarbures → Lignanes 	<ul style="list-style-type: none"> → Monoterpènes → Sesquiterpènes → Diterpènes → Triterpènes → Tétraterpènes → Polyterpènes 	<ul style="list-style-type: none"> → Camphène → Carène → Limonène → Pinène → Bornéole
Extraction à l'éther	<ul style="list-style-type: none"> → Acides gras → Graisses, huiles → Cires → Résines → Acides résiniques → Stérols 	<ul style="list-style-type: none"> → Acides gras insaturés → Acides gras saturés 	<ul style="list-style-type: none"> → Acide oléique → Acide linoléique
Extraction à l'alcool	<ul style="list-style-type: none"> → Matières colorantes → Plobaphènes → Tanins → Stilbènes 	<ul style="list-style-type: none"> → Flavonoides → Anthocianins 	<ul style="list-style-type: none"> → Taxifolin → Quercétin
Extraction à l'eau	<ul style="list-style-type: none"> → Glucides → Protéines → Alcaloïdes 	<ul style="list-style-type: none"> → Monosaccharides → Amidon → Matières pectiques 	<ul style="list-style-type: none"> → Arabinose → Galactose → Raffinose

2.3.2.4 Domaines d'applications des extractibles

Les extractibles revêtent d'une grande importance dans l'industrie alimentaire, pharmaceutique et cosmétique ainsi que dans la synthèse des adhésifs. Le baume, les gommes, la myrrhe, la térébenthine et d'autres produits d'exsudation des arbres ont longtemps été largement utilisés (Zinkel 1989). Chez les arbres, les substances extractibles interviennent dans le mécanisme défensif contre les agressions externes (Croteau et al 2000). Des extractibles connus sous le nom de latex (produit par l'hévéa), principale source de fabrication du caoutchouc, ont particulièrement eu un impact très significatif sur la civilisation humaine durant le 20^{ème} siècle (Zinkel 1989). Le pin maritime *Pinus pinaster*, comme tous les membres du genre *Pinus*, produit également

une substance appelée gomme ou oléoresine qui est composée de terpènes et qui fut autrefois exploitée. La colophane et la térébenthine issues des résines terpéniques sont utilisées comme produits de revêtement ou de finition (solvant, adhésifs, polymères, émulsifiant etc.). Les vernis, laques, lasures et adhésifs sont des produits pouvant être obtenus à partir des extractibles du bois. Des activités anticancéreuses des triterpènes ont été aussi identifiées. Les terpènes ont été longtemps exploités comme fongicide, insecticide et ils sont même à la base de la durabilité naturelle de certains bois (*Taxus spp*) (Stevanovic 2008, Obst 1998).

Longtemps considérés comme des déchets dont l'arbre se débarrasserait en permanence, les extraits ont vite trouvé des emplois nobles. Ils attirent de plus en plus l'attention des industries et des chercheurs. Leurs domaines d'application sont de plus en plus diversifiés. Autrefois recherchés dans l'industrie de cuir (coloration et préservation des peaux), les tanins deviennent de plus en plus importants dans l'industrie des adhésifs pour la fabrication des contreplaqués et des panneaux de particules (Bowyer *et al* 2003). Aujourd'hui, ils servent aussi à la maturation et à l'amélioration de la qualité gustative du vin. On retrouve même des tanins dans l'industrie pharmaceutique. Les molécules végétales sont très importantes pour cette industrie, puisqu'un médicament sur deux provient des plantes. Concernant les terpènes, ils servent pour faire des hydrocarbures, d'origine végétale. L'isoprène rentre dans la constitution de caoutchouc de synthèse ou naturel. Quant à la gomme, elle faisait l'objet d'une récolte abondante dans les Landes au siècle dernier pour produire de l'essence de térébenthine et la colophane. Les extractibles, tels que ceux des légumineux du genre *Pterocarpus* en occurrence la santaline et la santarubine, les flavonoïdes et autres, sont largement utilisés dans la teinture du textile comme des colorants insolubles (Surowiec *et al* 2004) mais aussi en médecine moderne et traditionnelle comme des remèdes dans le traitement des diabètes, des diarrhées et dysenteries, du paludisme (Maurya *et al* 1984, Damintoti *et al* 2003). Les polyphénols confèrent aussi au bois de la durabilité vis-à-vis des insectes et des champignons. Les caractéristiques, telles la couleur, l'odeur et la durabilité du bois, sont ainsi directement liées aux extractibles.

2.4 Caractéristiques physiques et mécaniques du bois

2.4.1 Matériau orthotrope et anisotrope

Le bois à la différence des autres matériaux de construction résulte d'une activité biologique. Il se distingue principalement par son caractère anisotrope et orthotrope. C'est-à-dire qu'il présente trois directions principales (longitudinale L, radiale R et tangentielle T) qui forment trois plans d'observation RT, LR, LT bien définis (figure 18). Ceci exige une observation et une caractérisation du bois selon ces différents plans et directions.

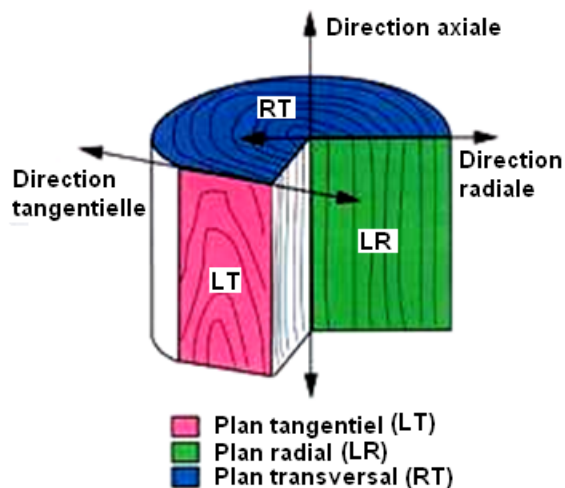


Figure 18. Schéma des axes et plans naturels d'observation du bois

2.4.2 Matériau hygroscopique

Par définition la teneur en eau ou humidité du bois, $H(\%)$ est la quantité d'eau qu'il renferme, exprimée en pourcentage de son poids à l'état anhydre. Au regard de la littérature la plupart des normes (Française NF B51-004 Internationale, ISO 3130) s'accordent à déterminer l'humidité comme la mesure par pesée de la variation de masse d'une éprouvette cubique de 20 mm de côté entre l'état humide et l'état anhydre en vue de déterminer le rapport ci-après :

$$H(\%) = \frac{M_h - M_0}{M_0} \times 100$$

Équation 1

Où M_h et M_0 sont respectivement la masse à l'état humide et la masse à l'état anhydre du bois.

Selon ces normes, le bois est considéré anhydre lorsqu'il a séjourné dans l'étuve à 103 °C jusqu'à masse constante. La masse est considérée constante, lorsque, entre deux mesures successives espacées de 4 heures, la variation de masse relative ne dépasse pas 0,5 %. Cette méthode est très précise mais destructive. Elle est toutefois entachée d'erreurs lorsque le bois a une teneur importante en extractibles. D'autres méthodes basées sur la distillation, la résistance et la capacitance électrique du bois sont également pratiquées.

Le bois sur pied ou venant d'être abattu (bois vert) peut renfermer une quantité d'eau considérable (figure 19) pouvant dépasser largement 100 % répartie :

en eau capillaire ou eau libre (retenue dans les lumens des cellules), la première à s'évacuer pendant le séchage du bois,

en eau liée (retenue dans les parois cellulaires) dont la variation entraîne des variations dimensionnelles du bois.

et en eau de constitution (faisant partie intégrante de la composition chimique du bois).

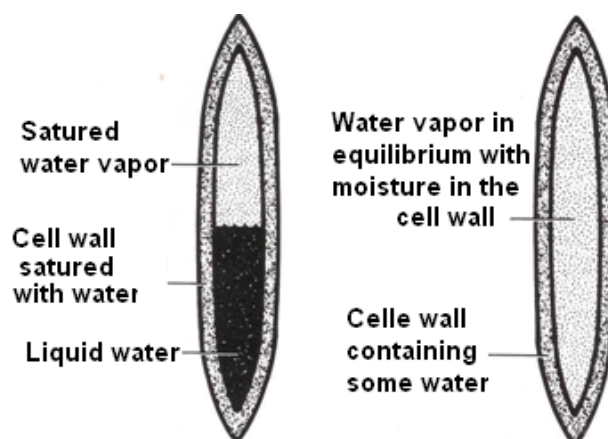


Figure 19. Type d'eau dans le bois (Bowyer et al 2007)

La teneur en eau du bois dépend de l'essence, de la saison, de la partie de l'arbre que l'on considère. En général, la teneur en eau est maximale dans les racines, moindre dans

les branches, minimale dans le tronc, avec une exception pour l'aubier, partie active du système vasculaire de l'arbre, où le bois est saturé d'eau. L'humidité limite à laquelle les parois cellulaires sont complètement saturées d'eau en absence de toute forme d'eau capillaire est dite point de saturation de la fibre (PSF). Il s'agit de l'humidité limite au delà de laquelle les dimensions du bois deviennent stables.

Il faut noter que le bois est un matériau qui dans ses divers usages est en perpétuelle interaction avec son environnement en modifiant constamment sa teneur en eau selon l'état hygrométrique de l'air. Il tend toujours à établir une teneur en eau en équilibre avec celui du milieu où il est exposé, il est alors dit hygroscopique et l'ensemble des phénomènes physico-chimiques d'adsorption et de désorption d'humidité est défini comme la sorption d'humidité. Ce phénomène s'explique par le fait que la cellulose (pour ses parties amorphes) et les hémicelluloses, deux composants structurels majeurs de la paroi cellulaire, comportent, des groupements hydroxyles (OH) libres qui sont capables de fixer par des liaisons hydrogènes ou de libérer des molécules d'eau. Ainsi, à tout changement des conditions hygrométriques (température et pression de vapeur d'eau) du milieu, il s'ensuit une variation d'humidité du bois. Cette variation d'humidité est alors associée à des variations dimensionnelles et de propriétés physico-mécaniques du bois (variation de densité et de résistance mécanique etc.) lorsqu'elle se produit au niveau de la paroi cellulaire (domaine hygroscopique). C'est pourquoi la relation bois – eau a longtemps été et reste encore aujourd'hui une préoccupation majeure des chercheurs (Barkas 1936, Goulet 1967 and 1968, Skaar 1988, Simpson and Barton 1991, Hernandez 1993a, Mantanis et al 1994, Almeida and Hernández 2006, Almeida *et al.* 2008).

En effet le bois, au fur et à mesure qu'il se dessèche (désorption), diminue de volume et de dimensions; on dit qu'il subit un retrait. Ce phénomène apparaît durant le séchage dès que commence l'élimination des molécules d'eau qui séparent les molécules de cellulose et d'hémicellulose. Il est donc engendré par le mouvement de l'eau dans la paroi cellulaire. En sens inverse, un bois déjà sec qui reprend de l'humidité (adsorption) augmente de volume et gonfle. Ainsi, quand on établit un graphique décrivant tous les équilibres possibles en adsorption (de l'état anhydre à l'état saturé) puis en désorption (de l'état saturé à l'état anhydre) pour des conditions isothermes, on obtient deux courbes qui forment une boucle fermée aux points correspondant à l'état complètement

anhydre et saturé (figure 20). Ce phénomène est connu sous le nom d'hystérèse de sorption. Le bois est donc un matériau ligno-cellulosique qui a la caractéristique d'atteindre pour des conditions hygrométriques égales, un équilibre hygrosopique qui diffère selon qu'il soit en adsorption ou en désorption.

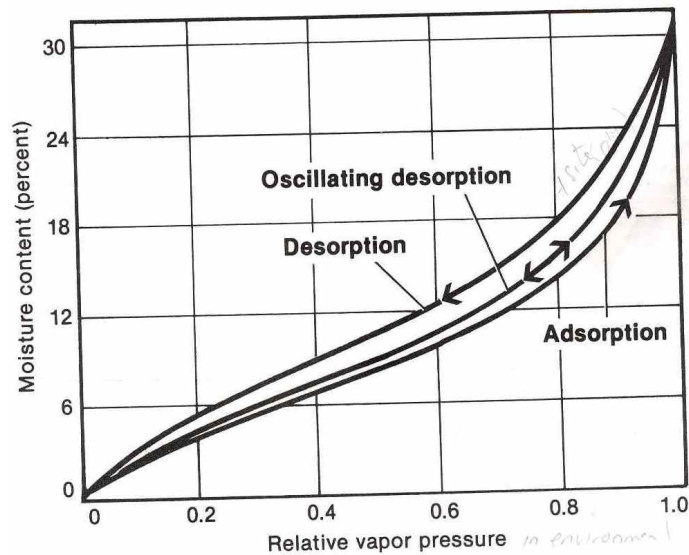


Figure 20. Isothermes de sorption d'humidité du bois (Bowyer et al 2007)

La définition de la teneur en eau est donc une étape essentielle non seulement lors de la caractérisation physico-mécanique du bois mais aussi et surtout pendant sa mise en œuvre car elle influence fortement ces propriétés si bien que pour des raisons de comparaison de résultats d'expériences, les normes d'essais exigent que le bois soit conditionné précisément à 12 %.

Dans l'objectif d'élargir les connaissances sur l'influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques, Almeida (2006) a montré que le retrait du bois peut commencer avant que le point de saturation des fibres (PSF) ne soit atteint. Ce qui signifie que la perte de l'eau liée a lieu en présence de l'eau liquide qui resterait emprisonnée principalement dans les éléments les moins perméables du bois en occurrence les rayons ligneux.

Les variations dimensionnelles et l'humidité à laquelle débute la perte de l'eau liée varient largement selon l'espèce de bois. Ainsi, à de fortes teneurs en humidité d'équilibre, les courbes de désorption varient largement selon les espèces. A masse volumique comparable, les espèces tropicales sont en général plus stables que les espèces des régions tempérées (Zobel and Buijtenen 1989 ; Almeida 2006). Si en région

tempérée, les bois durs et denses ont tendance à être plus nerveux que les bois légers et tendres, en région tropicale cette tendance n'est plus une évidence et en plus certains bois durs ont tendance à se distinguer par une stabilité accrue grâce à leur teneur élevée en substances extractibles.

D'une manière générale, le retrait ne se répartit pas d'une manière homogène. Il a été constaté en moyenne chez la plupart des espèces que :

- dans le sens du fil du bois (appelé retrait axial), les variations de dimensions sont très faibles et pratiquement négligeables: il est en général estimé nul, sauf pour le bois de réaction ;
- dans le sens tangentiel, les variations de dimensions sont plus fortes (environ 10 %);
- dans le sens perpendiculaire aux couches annuelles (appelé sens radial), les variations de dimensions sont plus faibles (environ 5 %).

La différence de variations dimensionnelles constatées selon la direction définit l'anisotropie du retrait. Cette dernière est l'un des paramètres importants pour évaluer la stabilité dimensionnelle du bois. Elle est généralement à l'origine des fentes et des variations de formes des sciages lors des opérations de séchage. Elle se définit comme étant le rapport du retrait tangentiel au retrait radial et plus cette valeur tend vers l'unité, moins le bois a tendance à se déformer quand sa teneur en eau varie. Les multiples études effectuées sur le retrait ont montré que la rétractibilité tangentielle est en moyenne de 1,5 à 2 à fois plus forte que la rétractibilité radiale.

2.4.3 Matériau dense et poreux

Par définition, la densité exprime le rapport du poids d'un volume de bois donné au poids du même volume d'eau (Zobel and Buijtenen 1989); ce qui correspond à son poids spécifique. Si le poids spécifique est exprimé en g/cm^3 , le poids spécifique et la densité sont des grandeurs exprimées par le même nombre (Dupont 1983). Dans le bois, comme la masse volumique de la paroi cellulaire est à peu près constante, la densité est inversement proportionnelle à la porosité qui est l'expression de la proportion de vide dans un matériau poreux.

En pratique, la masse volumique du bois est déterminée par le rapport entre la masse d'un échantillon de bois et son volume. Cela permet ensuite facilement de calculer la densité. La densité ainsi déterminée est dite apparente par le fait qu'elle tient compte de la porosité du matériau bois. Elle varie considérablement d'une espèce à l'autre, au sein d'une même espèce et surtout à l'intérieur d'un même individu (de bas en haut et du centre vers la périphérie) ; d'une provenance à l'autre et même à l'intérieur de la même provenance (Singh 1987, Nepveu 1994, Hernandez et Restrepo 1995, Lenger *et al* 1999). En revanche, la densité réelle de la matière ligneuse varie peu selon l'essence. Elle est fonction de la densité des macromolécules constitutives de la matière ligneuse (la cellulose 1,6 ; l'hémicellulose 1,4 et la lignine 1,5) et est estimée égale à 1,53.

Il est important de remarquer que le volume, via le retrait/gonflement et la masse d'un morceau de bois sont influencés par la teneur en eau. La densité est donc considérablement influencée par l'humidité.

La masse volumique d'une éprouvette M_v à un taux d'humidité donné, est estimée selon les protocoles fixés par les normes Française NF B51 005 et Internationale ISO 3131, comme le rapport de sa masse à son volume. La masse est déterminée par pesée sur une balance de précision de 0,001g et le volume à l'aide d'un volumétre à mercure.

$$M_v \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M}{V} \quad \text{Équation 2}$$

où M et V sont respectivement la masse et le volume de l'éprouvette à une humidité donnée.

Notons que pour des éprouvettes dont la taille est extrêmement réduite ou la forme ne correspond pas à une géométrie parfaite, la mesure du volume par cette méthode devient délicate. Dans ces conditions, le volume peut être alors déterminé par la technique de la pesée hydrostatique tout en prenant soin d'imperméabiliser les éprouvettes par une pellicule fine de paraffine si celles-ci ne sont pas saturées.

Il faut dire qu'en pratique l'industrie est le plus souvent intéressée par la masse volumique nominale qui détermine la quantité de matière sèche dans un volume de bois frais. Elle est égale au rapport de la masse anhydre et le volume à l'état frais.

$$M_{vn} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M_0}{V_h} \quad \text{Équation 3}$$

où M_0 et V_h sont respectivement la masse anhydre et le volume à l'état frais.

En revanche, dans la recherche scientifique, la quantité de matière sèche dans un volume de bois saturé appelé infradensité (densité basale) attire davantage l'attention des chercheurs. Ce paramètre est important à considérer car il représente, pour chaque échantillon, le rapport de deux valeurs constantes contrairement à la masse volumique, qui peut varier en fonction du taux d'humidité (Charron *et al*, 2003).

L'infradensité, ID ou densité basale, exprimée en kg/m^3 , est déterminée comme étant le rapport de la masse anhydre de l'éprouvette à son volume à l'état saturé. Pour des éprouvettes prises au dessus du point de saturation des fibres, la masse volumique nominale est égale à l'infra densité.

$$ID = \frac{M_0}{V_s} \quad \text{Équation 4}$$

où M_0 et V_s sont respectivement la masse anhydre et le volume à l'état saturé de l'éprouvette.

L'infradensité peut être également déterminée par la formule de Keylwerth. Ce principe part du fait que la masse volumique des tissus ligneux anhydres est constante. Le volume à l'état saturé est dans ce cas déduit à partir du volume des parois et de l'eau par la formule ci-après :

$$V_s = \frac{M_0}{1500} + \frac{M_s - M_0}{1000} \quad \text{Équation 5}$$

En appliquant la formule de l'infra densité, on obtient :

$$ID = \frac{M_0}{V_s} = \frac{M_0}{\frac{M_0}{1500} + \frac{M_s - M_0}{1000}} = \frac{1000}{\frac{1000}{1500} + \frac{M_s}{M_0} - 1} = \frac{1000}{\frac{M_s}{M_0} - 0,33} \quad \text{Équation 6}$$

Où M_s est la masse de l'échantillon saturé, M_0 la masse de l'échantillon anhydre.

Sur le plan anatomique, la densité est une mesure synthétique de la proportion des tissus cellulaires constitutifs du bois ; pour un même volume apparent de bois, la densité sera d'autant plus élevée que la proportion des cavités cellulaires est faible. Les arbres ayant une densité du bois intrinsèquement faible (c'est-à-dire indépendante de la croissance radiale) ont tendance à se distinguer soit par une proportion et des diamètres de vaisseaux du bois initial supérieurs à la moyenne ou soit par une faible proportion de fibres dans les bois initial et final (Guilley et Nepveu 2003).

C'est une caractéristique technologique de base, la première à déterminer pour qualifier le bois. Cette propriété est corrélée plus ou moins étroitement avec les principales propriétés physiques et mécaniques du bois. C'est la variable physique explicative majeure de la variabilité totale des caractéristiques technologiques du bois. En revanche elle est souvent considérée comme un indicateur médiocre au niveau interspécifique quant à la relation densité-propriétés mécaniques (Nepveu 1994). Cela résulte du fait que des espèces, à densité comparable, ont souvent une différence très significative au niveau de leurs propriétés mécaniques. Cette situation s'expliquerait par la différence de distribution, de proportion et de la dimension des tissus constitutifs du bois.

Une autre méthode d'étude de la densité est la microdensitométrie. Celle-ci, se basant sur une radiographie de barrette de bois d'épaisseur constante, permet de quantifier les variations locale de densité cerne après cerne. Cette technique permet d'apporter des informations allant des modalités de la croissance cambiale aux propriétés mécaniques du bois. Le principe repose sur le fait que l'absorption des rayons X par une couche de bois d'épaisseur uniforme ne dépend que de sa densité étant donné que le poids atomique des éléments constitutifs du bois est relativement constant. L'absorption des rayons X se traduit sur les radiographies par l'apparition des zones plus claires (rayon ligneux et plages de fibres) et des zones foncées (vaisseaux). L'analyse des radiographies permet ainsi de quantifier les variations de noircissement sous forme de profils de densité (Mothe *et al* 1998a). En plus de la chronologie de la production annuelle de masse ligneuse, l'analyse microdensitométrique apporte des informations précieuses sur l'organisation anatomique du bois (Mothé *et al* 1998). L'exploitation des profils densitométriques constitue l'une des voies d'accès à la compréhension des relations climat-croissance-structure du bois. Les profils de densité sont de meilleurs

enregistreurs de la répartition des précipitations et des événements climatiques ponctuels que ne le sont les épaisseurs de cernes. L'utilisation des profils de densité serait donc très utile pour l'interprétation des années caractéristiques dans les approches de type dendroécologiques (Nicault *et al* 2001).

2.4.4 Module d'élasticité du bois

Le module d'élasticité est l'une des propriétés mécaniques importantes pour caractériser un matériau. Il caractérise la proportionnalité entre la charge et la déformation et définit ainsi la rigidité du bois, son aptitude à résister à la déformation induite par un chargement.

Un corps soumis à des efforts externes de compression ou de traction etc., développe des contraintes internes σ qui s'accompagnent de changements de dimensions et de taille appelés déformations du corps ε . En nous limitant au cas monodimensionnel, nous obtenons des équations simples :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Équation 7}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad \text{Équation 8}$$

Où F - la force appliquée et A - la section d'application de la force ; L_0 - longueur initiale L_1 - longueur après application de la charge.

La loi de Hooke, qui décrit le comportement mécanique des matériaux, permet de relier la déformation à la contrainte par les expressions : $\sigma = E\varepsilon$ et $\varepsilon = S\sigma$ où E est le module d'élasticité et S le module de complaisance.

La contrainte σ et la déformation ε suivent une relation linéaire et proportionnelle qui caractérise le domaine élastique du matériau jusqu'à une contrainte limite (Figure 21) appelée « contrainte limite d'élasticité ». Ce domaine renseigne sur la quantité d'énergie que la pièce est capable d'absorber avant une quelconque altération dans sa structure interne. Dans ce domaine, elle est capable de reprendre sa forme initiale dès que la contrainte cesse. Au-delà du domaine élastique, la relation contrainte-déformation cesse

d'être linéaire. Il se produit alors une déformation résiduelle qui demeure permanente quand la contrainte cesse. Cette déformation permanente caractérise le comportement plastique du matériau appelé domaine plastique. Dans cette région, le matériau subit des altérations dans sa structure interne ce qui conduit à la rupture si le chargement continue au delà d'une contrainte limite dite contrainte limite de rupture. La contrainte élastique sépare ainsi la région élastique de la région plastique.

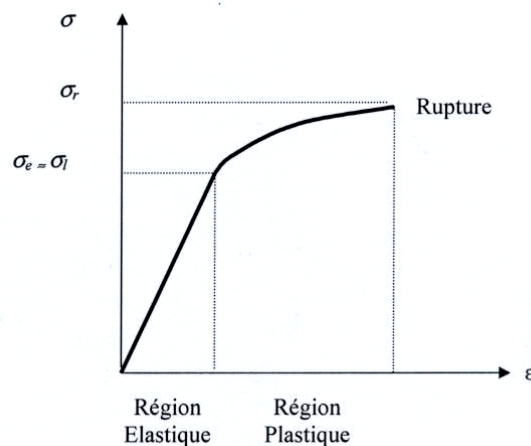


Figure 21. Courbe contrainte - déformation

Par opposition aux métaux et à d'autres matériaux isotropes, le bois, en raison de sa structure anatomique, de la composition et de l'organisation polymérique des parois, présente un comportement mécanique différent selon la direction longitudinale, radiale ou tangentielle. Il est alors considéré ainsi comme étant un matériau anisotrope localement orthotrope (Tsoumis 1991). L'axe longitudinal est le plus résistant, suivi de l'axe radial et de l'axe tangentiel. Le module d'Young (pour des efforts de traction ou de compression) se trouve ainsi plus élevé dans le sens du fil (direction longitudinale) que dans le sens perpendiculaire au fil (directions radiale et tangentielle). Ceci résulte du fait qu'environ 90% des cellules constitutives sont orientées verticalement et seule 10% sont horizontales (les cellules des rayons). Et du coup il se trouve plus renforcé dans le sens longitudinal que transverse. La rigidité du bois dans le sens longitudinale est cependant liée à l'angle des micro-fibrilles dans la paroi cellulaire et moins cet angle est important plus le bois est rigide. Les fibres et les trachéides constituent des éléments de renforcement suivant leur grand axe tandis que les cellules constituant les rayons ligneux induisent un renforcement dans le sens radial par rapport au sens tangentiel. Sous un effort tangentiel, les fibres longitudinales et les rayons ligneux sont sollicités

perpendiculairement aux grands axes des cellules, ce qui donne un module tangentiel plus faible : $E_L > E_R > E_T$ (Lenger et al 1999, Guitard 1994).

L'étude du comportement mécanique du bois est à la base de la mise en œuvre et l'utilisation rationnelle du bois notamment en termes de dimensionnement des éléments qui devront être soumis à des efforts statiques ou dynamiques. Les caractéristiques mécaniques du bois sont variables d'une espèce à l'autre et même à l'intérieur de l'espèce du centre vers la périphérie et de bas en haut. La provenance géographique, les conditions de croissance ainsi que le type de sylviculture pratiqué constituent également des sources de variabilité du comportement mécanique du bois. Machado et Cruz (2005) ont observé sur des grumes de Pin maritime une réduction des performances mécaniques du bas vers le haut. Par contre une nette augmentation de la résistance à la traction de 55 %, du module d'élasticité de 99 % et de la compression axiale de 44 % a été constatée de la moelle vers la périphérie. Hernandez (2006) constate des valeurs de résistance à la compression axiale plus élevées chez les bois tropicaux comparativement à ceux des régions tempérées.

Le module d'élasticité peut être évalué soit mécaniquement (méthode de référence) à l'aide d'une machine d'essai soit par la méthode acoustique dite non destructive. La méthode acoustique est basée sur le principe de propagation des ondes vibratoires et le module déterminé acquiert le nom de module dynamique d'élasticité.

2.4.5 Propriétés acoustiques du bois pour la facture d'instruments xylophones

Le bois est utilisé dans l'isolation acoustique. Il doit notamment cette aptitude à sa faible densité et à sa structure alvéolaire constituée de cavités microscopiques organisées en réseau. Celles-ci transforment l'énergie acoustique en chaleur et atténuent ainsi les sons. Il est ainsi capable d'amortir, voire confiner les ondes sonores. Si le bois est depuis longtemps utilisé pour ces propriétés dans l'isolation acoustique, il l'est également pour ses propriétés de résonance, qui sont étroitement liées à ses propriétés intrinsèques telle que son ultrastructure, son organisation structurelle, sa densité et sa teneur en métabolites extractibles, comme matériau de choix dans la fabrication des instruments à percussion comme les xylophones (Norimoto *et al* 1986; Matsunaga *et al*

1999; Obataya 2000; Bucur 2006; Bremaud 2006; Branchériaux *et al.* 2006). Le xylophone fait partie du groupe des idiophones qui accompagnent la plupart des cérémonies traditionnelles (mariages, baptêmes, récoltes, fêtes traditionnelles etc.) en Afrique et particulièrement en milieu sénoufo, malinké et bambara (ethnies maliennes) et draine ainsi la tradition à travers le temps. C'est un instrument de musique hautement professionnel dont la vibration est obtenue par percussion au moyen de maillets. Il se compose d'une série de lames de bois très soigneusement calibrées et disposées les unes à côté des autres par ordre de taille régulièrement croissante. Ces lames sont fixées sur un cadre par un système d'attache spécialement conçu pour permettre à chacune des lames de vibrer librement. Sous le cadre est disposée une série dealebasses (résonateur) de taille régulièrement croissante choisies pour amplifier au mieux le son de chacune des lames. Dans le présent travail, nous entendons par qualité acoustique l'ensemble des caractéristiques mécaniques qui conditionnent l'usage du bois de vène pour la facture d'instruments xylophone; en l'occurrence le module spécifique (module d'élasticité rapporté à la densité E_L/ρ) en réponse fréquentielle et le coefficient de frottement intérieur (ou coefficient d'amortissement) (Alléhaux 1999, Branchériaux *et al.* 2006).

2.4.5.1 Réponse fréquentielle et propriétés élastiques du bois

Le phénomène physique qui gouverne le fonctionnement d'un xylophone repose sur le fait que lorsqu'une structure en bois est soumise à un impact, elle vibre à une fréquence dite fréquence propre, variable selon l'essence et les dimensions. Suite à l'impact, plusieurs types d'ondes sont alors susceptibles de s'y propager. Il s'agit principalement d'ondes de flexion verticale et horizontale, d'ondes de torsion et d'ondes longitudinales (Bucur 2006). Mais le son généralement produit suite à une telle excitation est essentiellement dû aux ondes de flexion verticale.

Les fréquences propres sont fonction de la géométrie, des propriétés intrinsèques (liés aux matériaux constitutifs) de la structure en question ainsi que des conditions aux limites qui lui sont imposées. Plusieurs modèles théoriques de la vibration des poutres sont disponibles dans la littérature (Bourdonné 1989, Branchériaux 2002 etc.). Mais la fabrication d'une barre de xylophone suppose que les fibres sont orientées suivant la

direction longitudinale et que le rapport de la longueur à la largeur demeure très grand ($L/h \gg 1$). En conséquence, les modules dans le plan transverse du bois auraient peu d'influence sur le son rayonné. Ceci correspond ainsi à un modèle mécanique unidimensionnel qui ne dépend que du module d'élasticité longitudinal. Un tel modèle peut être décrit par l'équation d'Euler Bernoulli. Le modèle de Bernoulli et la solution qui en découle sont basés sur 3 hypothèses :

1 – L'élanement est très grand ($L/h \gg 1$) ; 2 – le cisaillement est négligé

3 – L'influence des appuis est négligée

L'équation du mouvement est donnée par la relation suivante :

$$EI \frac{\partial^4 y(x, y)}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Équation 9}$$

Où E est le module d'élasticité longitudinal, I le moment d'inertie, ρ la masse volumique et S la section de la structure.

La solution générale de cette équation est donnée par :

$$y(x, t) = \sum_1^n y_n(x) e^{i\gamma_n t} \quad \text{Équation 10}$$

Avec

$$y(x) = A \cosh(k_n x) + B \sinh(k_n x) + C \cos(k_n) + D \sin(k_n) \quad \text{Équation 11}$$

En introduisant l'équation 10 et 11 dans l'équation 9, on obtient:

$$\gamma_n = \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} k_n^2 \quad \text{Équation 12}$$

Les conditions aux limites étant égales à 0

$$\frac{\partial^2 Y(0)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 Y(L)}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 Y(0)}{\partial x^3} = \frac{\partial^3 Y(L)}{\partial x^3} = 0$$

D'où

$$k_n = (2n + 1) \frac{\pi}{2L} \quad \text{Équation 13}$$

En tenant compte du caractère viscoélastique du bois, E peut être considéré comme un module complexe par la relation :

$$E = E_d(1 + i\eta) \quad \text{Équation 14}$$

Où E_d est le module dynamique d'élasticité et η , un facteur non dimensionnel. En introduisant les équations 13 et 14 dans l'équation 12 et en supposant que $\eta \ll 1$ on obtient la relation suivante:

$$\gamma_n = \omega_n + i\alpha_n \quad \text{Équation 15}$$

Avec

$$\omega_n = \sqrt{\frac{E_d I}{\rho S}} (2n + 1)^2 \frac{\pi^2}{4L^2} \quad \text{et} \quad \alpha_n = \frac{\eta}{2} \omega_n \quad \text{Équation 16}$$

Ainsi, la relation 10 peut s'écrire de la manière suivante:

$$y(x, t) = \sum_1^n Y_n(x) e^{i\omega_n t} e^{-\alpha_n t} \quad \text{Équation 17}$$

Où α_n est le $n^{\text{ième}}$ amortissement temporel associé au $n^{\text{ième}}$ signal élémentaire.

Le signal émis suite à la vibration de la barre peut donc être défini comme étant la somme de signaux élémentaires dont la fréquence est inversement proportionnelle au carré de la longueur de la barre. D'après le modèle de Bernoulli, la fréquence propre (f_n) du $n^{\text{ième}}$ mode peut être exprimée en fonction du module d'Young (E) dans la direction considérée et de la masse volumique (ρ) selon la relation suivante :

$$f_n = \frac{m_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad \text{Équation 18}$$

Où : ρ est la masse volumique, S est l'aire de la section ; L est la longueur de la barre; I est le moment d'inertie ($I = bh^3/12$ pour une section rectangulaire de base b et de hauteur h). $m_1 = 4,730$; $m_2 = 7,853$; $m_3 = 10,996$

En résumé, la réponse en fréquence d'une structure homogène très élancée ($L/h \gg 1$) peut donc être raisonnablement prédite par le module spécifique correspondant à sa direction principale

Connaissant la fréquence f de vibration et son rang associé n on peut déterminer le module d'élasticité dynamique E par la relation :

$$E = 4\pi^2 \frac{\rho S L^2}{I} \frac{f^2}{m_n^4} \quad \text{Équation 19}$$

2.4.5.2 Notion d'amortissement des ondes vibratoires

Lorsqu'une pièce de bois est soumise à une force périodique, elle vibre. L'amplitude de la vibration dépend de la fréquence et de la force motrice. Elle atteint un niveau maximum à la fréquence de résonance. Mais lorsque la force périodique cesse d'agir, il s'en suit une diminution progressive des amplitudes successives. Ce phénomène est alors qualifié d'amortissement vibratoire ou décrétement logarithmique. L'amortissement ou la décroissance temporelle des vibrations libres d'une structure est un paramètre essentiel dans la caractérisation des bois pour la facture d'instrument de musique (Dunlop et Shaw 1991). Selon le type d'instrument, ce phénomène résulte de plusieurs mécanismes de dissipation d'énergie liée non seulement aux conditions environnementales sous forme de radiations sonores mais aussi aux propriétés intrinsèques du matériau sous forme de chaleur par friction interne des particules vibrantes. Pour des structures en bois, la dissipation d'énergie est principalement liée à son caractère viscoélastique. Ce qui suppose que lorsqu'on exerce une sollicitation sinusoïdale de faible amplitude σ_0 et de fréquence f (de pulsation $\omega = 2\pi f$), la réponse est également sinusoïdale, de même fréquence et déphasée d'un angle δ dont la tangente ($\tan \delta$) appelée « coefficient d'amortissement » (frottement interne) ou facteur de perte, caractérise le retard de la réponse par rapport à la sollicitation. Par définition, ce coefficient est le rapport de l'énergie dissipée au cours d'un cycle à l'énergie que possède le système du fait de son mouvement. Il définit ainsi le degré d'amortissement des vibrations (Bordonné 1989, Dunlop and Shaw 1991). Cette grandeur informe sur la rapidité avec laquelle une vibration s'amortit et sur le comportement viscoélastique du bois. Il quantifie la fraction de l'énergie de vibration qui se dissipe en chaleur au cours de chaque période (Bordonné 1989).

L'expression 17 montre que le signal sonore émis suite à la vibration de la barre, peut être décrit comme la somme de composants élémentaires de signaux monochromatiques exponentiellement amortis. Le coefficient d'amortissement peut alors être déterminé via l'amortissement temporel α_n associé à chaque signal temporel par la relation suivante :

$$\tan \delta = \frac{\alpha_n}{\pi f_n} \quad \text{Équation 20}$$

Par ailleurs on peut aussi montrer que $\tan \delta$ est relié à l'énergie dissipée au cours d'un cycle de vibrations forcées, ainsi qu'à l'amortissement de vibrations libres (figure 22 à gauche) via le décrément logarithmique λ selon la relation :

$$\tan \delta = \frac{\lambda}{\pi} = \frac{1}{\pi n} \ln\left(\frac{x_1}{x_{n+1}}\right) \quad \text{Équation 21}$$

Où x_n l'amplitude du $n^{\text{ième}}$ mode propre et λ le décrément logarithmique.

Dans le domaine fréquentiel, $\tan \delta$ est relié à la largeur de pic à demi puissance de l'amplitude à la fréquence de résonance à travers la grandeur Q^{-1} dite « facteur de qualité (inverse de $\tan \delta$ (figure 22 à droite).

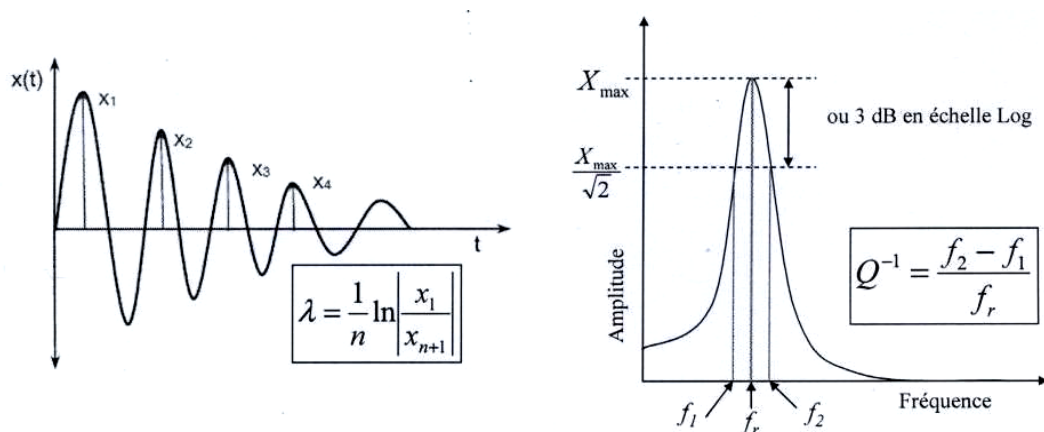


Figure 22. Expression du coefficient d'amortissement via: le decrement logarithmique (gauche) et le domaine fréquentiel (droite) (Bremaud 2006)

Les techniques de mesures sont ainsi basées sur le principe de propagation des ondes vibratoires. Ce qui laisse présager que toute modification anatomique (irrégularité des éléments, déviation de fibres, inclusions diverses etc.) ou physique (humidité etc.) qui

tend à réduire la vitesse de radiation des ondes, implique une augmentation des frottements intérieurs et aura pour effet une détérioration de la qualité acoustique du bois.

Les meilleurs bois de résonance pour la facture d'instrument sont ceux qui bénéficient d'un faible coefficient de frottement intérieur associé à un module spécifique élevé (Ono et Norimoto 1983 ; Ono and Norimoto 1983, Yano et al 1994). Selon Bremaud (2006), le module d'élasticité spécifique E_L/ρ et le coefficient d'amortissement sont directement liés aux propriétés de la paroi cellulaire. En effet ces grandeurs généralement bien corrélées entre elles (Norimoto et al 1986) sont considérablement influencées par l'humidité et l'angle des microfibrilles dans la sous couche S2 de la paroi secondaire (figure 23). Selon Bork (1985) et Holz (1996), les espèces destinées à la production des instruments xylophones sont généralement nanties d'une densité élevée d'environ 0,80 à 0,95 et d'un module d'élasticité élevé de l'ordre de 14 à 20 GPa. Elles sont généralement moins sensibles aux variations d'humidité et présentent de faibles valeurs de coefficient d'amortissement (Richter 1988, Bremaud 2006).

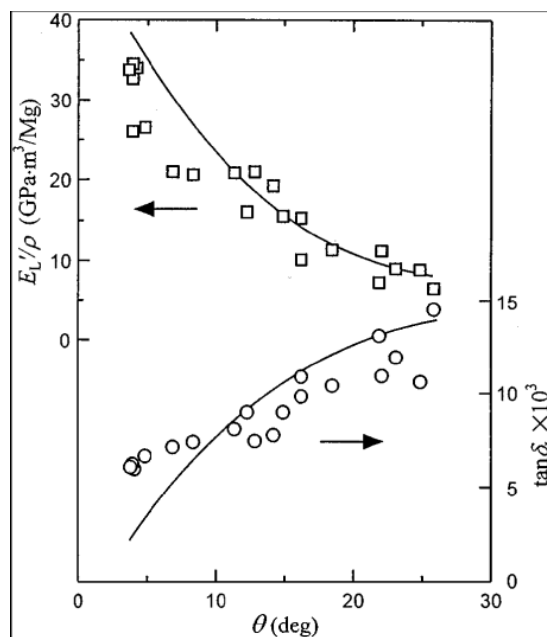


Figure 23. Le module spécifique et le coefficient d'amortissement vs. L'angle des microfibrille (Norimoto et al 1986).

Plusieurs espèces sont ainsi répertoriées et évaluées pour la facture d'instruments (Brancheriau et al 2006). On peut ainsi citer le bois de rose Honduras (*Dalbergia stevensonii*), *Betula schmidtii regel* du Japon (Bucur 2006), Palissandre de Madagascar,

Saint martin jaune de Guayane, Bintanga de Nouvelle Calédonie, Marupa d'Amazonie (Brancheriau et al 2006). En Amérique Centrale on note l'espèce de *Plalymiscium* (Salazar Salvatierra 1994;). En Afrique Centrale, 75% des xylophones sont fait en espèce *Pterocarpus* (Fabaceae : *P. soyauxii*, *luscens*, *tinctorius*, *angolensis* et spp). Mais au Mali, le vène (*Pterocarpus erinaceus*), dense et riche en extraits (Bremaud 2006), reste la principale source de production de ce type d'instrument. Cependant, au regard de la littérature très peu de travaux antérieurs sur l'acoustique du bois sont disponibles sur le genre *Pterocarpus* et en particulier sur le *Pterocarpus erinaceus*. Il convient donc d'étudier la qualité acoustique du bois de vène pour la facture d'instrument xylophone tant selon la provenance géographique que selon la position radiale dans l'arbre.

2.5 Etat de connaissance du vène (*P. erinaceus*)

2.5.1 Botanique

Le *Pterocarpus erinaceus*, communément appelée vène (ou Guéni en langue nationale Bambara), appartient à la famille des Fabaceae. Ce genre renferme plusieurs espèces : *Pterocarpus angolensis* ; *Pterocarpus erinaceus*, *Pterocarpus indicus*, *Pterocarpus macrocarpus*, *Pterocarpus santalinus*, *Pterocarpus soyauxii* etc. Ces espèces botaniques, très voisines, ont des aires naturelles de répartition qui correspondent à des exigences écologiques distinctes.

Le *Pterocarpus erinaceus* (figure 24) est un légumineux des savanes africaines qui se caractérise par des inflorescences jaunes couvrant l'arbre en une période où il est totalement défeuillé. Les fruits sont mono-graines, orbiculaires, indéhiscents et munis d'une large aile membraneuse circulaire. C'est un arbre au fût écailleux et noirâtre (Giffard 1971) de 12 à 15 m de haut avec un diamètre de 40-80 cm dans les zones plus sèches, mais des spécimens peuvent, dans les conditions favorables de précipitations et de sol, atteindre des dimensions beaucoup plus grandes. Des arbres particulièrement grands atteignant la taille de 35 m ont été rapportés (Maydell 1983).



Figure 24. Aspect du fût, des feuilles, des fleurs et fruits de *Pterocarpus erinaceus* Tiquet (Tervuren Xylarium Wood Database)

2.5.2 Phénologie

D'après des études phénologiques (Bonkougou 1998, Steven *et al* 1998 et Devineau 1999, Sandrine Petit 2000, Petit et Mallet 2001, Salifou et al 2007) effectuées en Afrique occidentale, le *Pterocarpus erinaceus* fait partie du groupe des espèces décidues qui observent dans l'année une courte période de défeuillaison pendant la saison sèche. Cette période est généralement de deux à trois mois selon la localisation, mais toujours entre décembre et février. Les premières fleurs jaunes apparaissent ainsi en janvier quand l'arbre est complètement dénudé. Quant à la feuillaison, elle va de mars à novembre et fait l'objet d'un émondage intense entre les mois de mars et mai.

2.5.3 Répartition géographique naturelle

Le *Pterocarpus erinaceus* est un légumineux des savanes africaines et des forêts sèches soudano-guinéennes avec des précipitations annuelles moyennes variant de 600-1500 mm et des températures annuelles moyennes variant de 15-35°. Cette espèce tolère des températures élevées atteignant 40°C. L'arbre se développe en basses altitudes (0-600 m) et prospère même sur des sols peu profonds. C'est un arbre qui résiste à la sécheresse et aux feux de brousses annuels. On pense que le *Pterocarpus erinaceus* est l'espèce de survie de l'ancienne forêt dense et sèche de la zone soudanienne (Aubreville 1950). Le

Pterocarpus erinaceus s'étend du sud du Sénégal jusqu'à l'Ouest de la République Centrafricaine (Giffard 1971). Il est distribué jusqu'au 14°N, mais à cette latitude, il devient très petit et une autre espèce, plus abondante le succède : le *Pterocarpus lucens*. Au sud, son domaine se prolonge jusqu'à la limite de la forêt humide de la Côte d'Ivoire et des savanes côtières humides de la Guinée, du Togo, et du Bénin.

2.5.4 Caractéristique structurelles du vène

2.5.4.1 Aspect macroscopique du vène

Du point de vue anatomique, l'espèce semble avoir été très peu étudiée et peu connue du monde de la recherche sur le bois pour n'avoir été présentée en dehors de sa région indigène. Elle provient des régions dont les bois ont fait rarement l'objet d'études approfondies. L'une des très rares études concernant l'anatomie de cette espèce a été effectuée en 1952 (Jardim e museu agricola do ultramar 1952) en Guinée Portugaise (actuelle Guinée Bissau territoire portugais d'outre-mer). De ces études il ressort que l'observation macroscopique en section transversale présente un aubier plus clair, très peu important (large de 5 à 10 cm) et bien distinct du duramen. Les limites de cerne sont peut différenciées et semblent correspondre à des alternances de zones intensément rouges, qui contrastent avec les autres plus claires. A ce sujet et après des études de périodicité sur des espèces provenant du Burkina Faso, Mariaux (1967) trouve la présence de cernes distincts qui n'est pas à confondre avec la présence de veines colorées. Ces dernières résulteraient des à-coups dans la progression du processus de duraminisation. Selon ces études, les limites de cernes sont identifiables à travers des alternances des bandes de parenchymes. Ces bandes sont plus épaisses, plus courtes, plus sinueuses et beaucoup plus interrompues en début d'accroissement qu'en fin d'accroissement où elles deviennent plus fines, plus serrées, plus rectilignes et plus nombreuses.

2.5.4.2 Aspect microscopique du vène

Les vaisseaux sont regroupés radialement par 2 à 4 (figure 25a). Les perforations sont de type unique. Les ponctuations intervasculaires sont disposées en files obliques. Des inclusions gommeuses sont souvent présentes.

Les rayons sont abondants, étagés, homogènes, uni- à bi- ou très rarement tri séries (figure 25 b). Quant au parenchyme axial, il est généralement formé d'une série de 2 à 4 cellules et se trouve associé aux vaisseaux en aliforme presque toujours conflue formant ainsi des bandes ondulées (figure 25 a et c). Ces cellules renferment souvent des cristaux d'oxalate de calcium.

Les fibres moyennement courtes, étroites et aux parois fines, sont de type libriformes simpliciponctuées (Jardim e museu agricola do ultramar 1952).

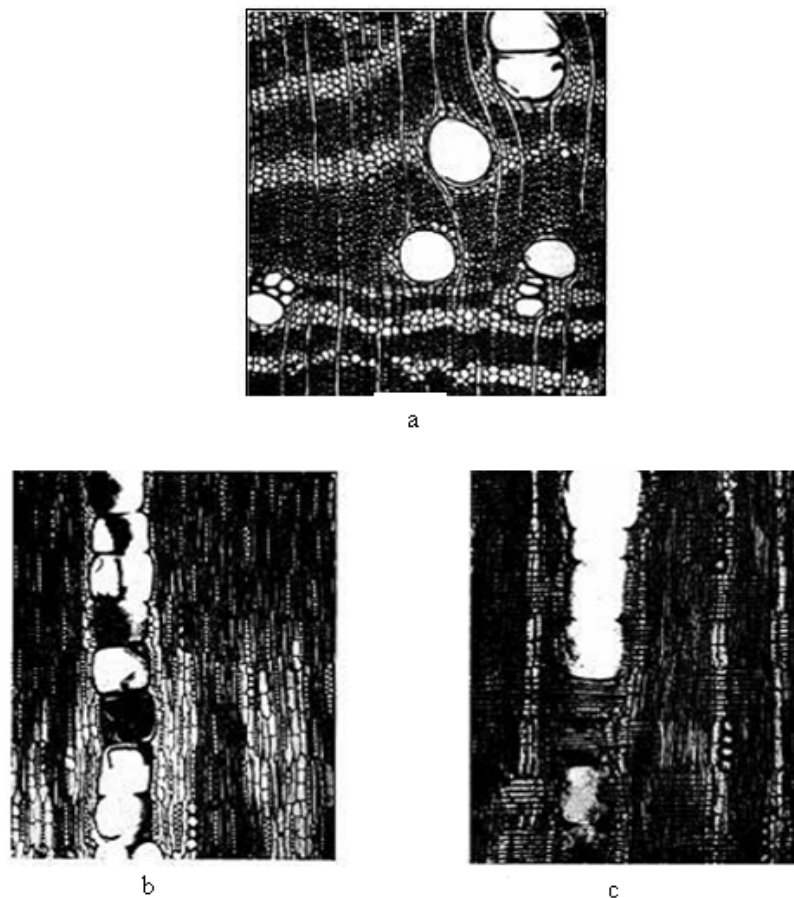


Figure 25. Caractères anatomiques du bois de vène : a- section transversale, b – section tangentielle, c – section radiale (Jardim e museu agricola do ultramar 1952).

2.5.5 Extractibles des espèces *Pterocarpus*

Bien que les investigations chimiques de l'espèce *Pterocarpus* aient débuté il y a plus de 100 ans, les études phytochimiques continuent, encore de nos jours, à découvrir de nouveaux composés extractibles. Bon nombre d'études phytochimiques des espèces *Pterocarpus* ont ainsi permis l'isolement de plusieurs composés extractibles qui diffèrent par la nature et la structure squelettique de base (Seshadri 1972, Maurya et al

1984, Barend et al 1987). Ces travaux soulignent l'importante teneur en extractible de l'espèce dont les principaux composés sont des polyphénols du groupe des flavonoïdes et d'isoflanoïdes avec une très grande variété de composés qui leur sont uniques. L'un des rares résultats des analyses chimiques qui provient de la base de données du CIRAD et des travaux de Rowe (1989) fait état de la présence chez l'espèce des composés polyphénoliques : muningin, prunetin, pseudobaptigenin. Dans la même famille botanique, Bremaud (2006) rapporte une teneur en extractibles plus élevée chez le vène comparativement aux autres genres de *Pterocarpus* (20 % contre 13 % pour le Padouk). Dans cette famille botanique, le Padouk (*P. soyauxii*) et les espèces asiatiques (*P. santalinus*, *P. indicus*, *P. marsupium* etc.) semblent, par contre, bénéficier de plus de recherche phytochimiques et de durabilité (Bremaud 2006). Selon Seshadri (1972), Jansen (2005) et Cardon (2006) cités par Bremaud (2006), le Padouk contient notamment des composés polyphénoliques du groupe des isoflavonoïdes, tels que des pterocarpanes, une isoflavane quinone, des isoflavanes et des biflavonoïdes, santaline et santarubines (structures dimériques associant isoflavonoïde-flavonoïde).

2.5.5.1 Composés phénoliques

2.5.5.1.1 Les flavonoïdes

Les flavonoïdes, les isoflavonoïdes et les néoflavonoïdes sont des produits naturels dérivés respectivement du 2-phenylchromen-4-1(flavone), du 3-phenylchromen-4-1 et du 4-phenylcoumarin (figure 26). Le terme de flavonoïde caractérise la classe de métabolites secondaires ayant la structure phénylbenzopyrone. Cette structure présente un squelette de base à 15 atomes de carbone, fait de deux cycles en C₆ reliés par une chaîne en C₃. Le pont à 3 carbones entre les deux phényles forme généralement un troisième cycle pyrone. Ces substances sont principalement connues pour leur activité antioxydante et antifongique. Les flavonoïdes polaires sont généralement accessibles par extraction à l'alcool, tandis que les composés lipophiles pouvant être extraits à l'éther, constituent la fraction volatile (Harborn 1989). Parmi les flavonoïdes, on peut distinguer notamment les flavones (2-phenylchromen-4-1), les flavonoïdes (2,3-dihydro-2-phenylchromen-4-1), les flavonols (3-hydroxy-2-phenylchromen-4-1).

Les isoflavonoïdes sont les constituants polyphénoliques majeurs du bois de *Pterocarpus*. Ils se présentent sous trois formes : les Pterocarpan, les isoflavones, le deoxybenzoin (Seshadri 1972).

- Les ptérocarpans (figure 27) sont des isoflavonoïdes ayant un condensé dihydrofurane entre l'anneau hétérocycle et l'anneau phényle. Ils sont présents chez la plupart des espèces *Pterocarpus* (Seshadri 1972).
- Les isoflavones sont les isoflavonoïdes les plus abondants que l'on rencontre chez l'espèce légumineuse (*Pterocarpus spp*) (figure 28 et 29). Le tableau 2 ci-dessous résume les différents composés isoflavones de *Pterocarpus* selon les substituants sur la structure squelettique principale (figure 28).

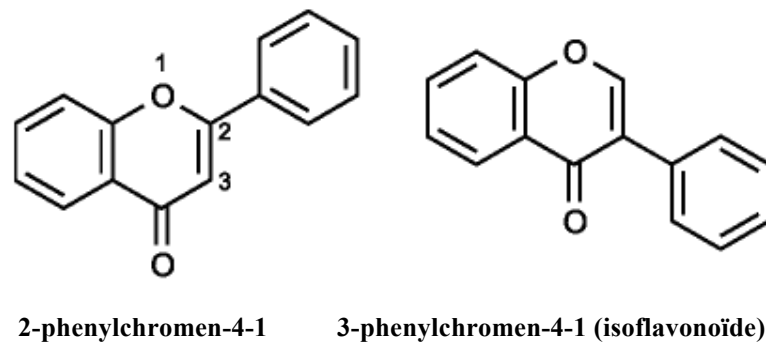


Figure 26. Squelette de base des flavonoïdes et isoflavonoïdes

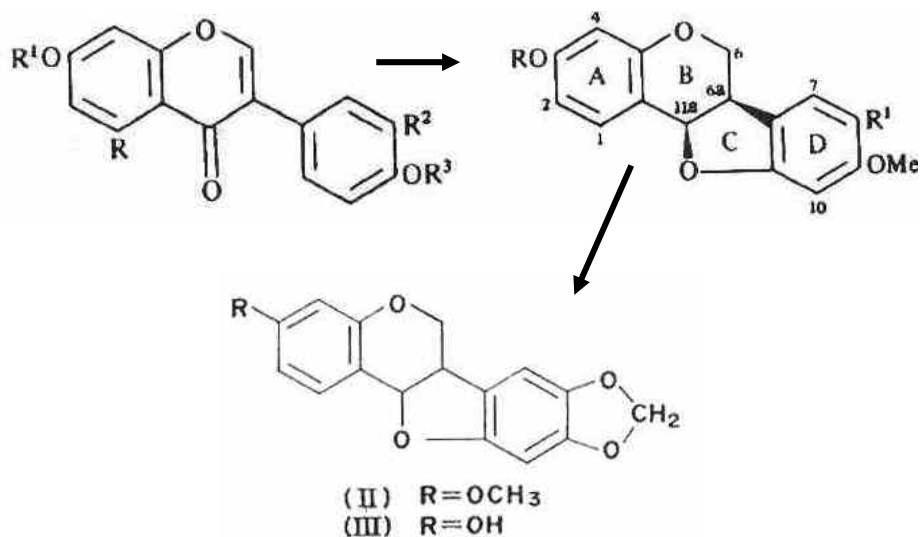


Figure 27. Pterocarpan de *Pterocarpus*

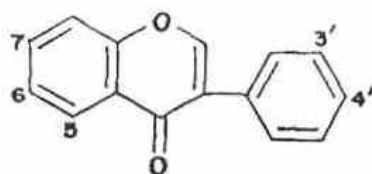


Figure 28. Structure squelettique des isoflavones de *Pterocarpus* (Seshadri 1972)

Tableau 2. Composés isoflavones de *Pterocarpus* suivant les substituants radicaux sur la structure squelettique (Seshadri 1972 ; Surowiec et al 2004)

Composés isoflavones de <i>Pterocarpus</i>	Substituant				
	7	6	5	4'	3'
Prunetin	OCH ₃	H	OH	OH	H
Muningin	OCH ₃	OH	OCH ₃	OH	H
Formononetin	OH	H	H	OCH ₃	H
Santal	OCH ₃	H	OH	OH	OH
7-O-Méthyltectoriginin	OCH ₃	OCH ₃	OH	OH	H
3'-Hydroxyformononetin	OH	H	H	OCH ₃	OH
Pseudobaptigenin	OH	H	H	—O—CH ₂ —O—	

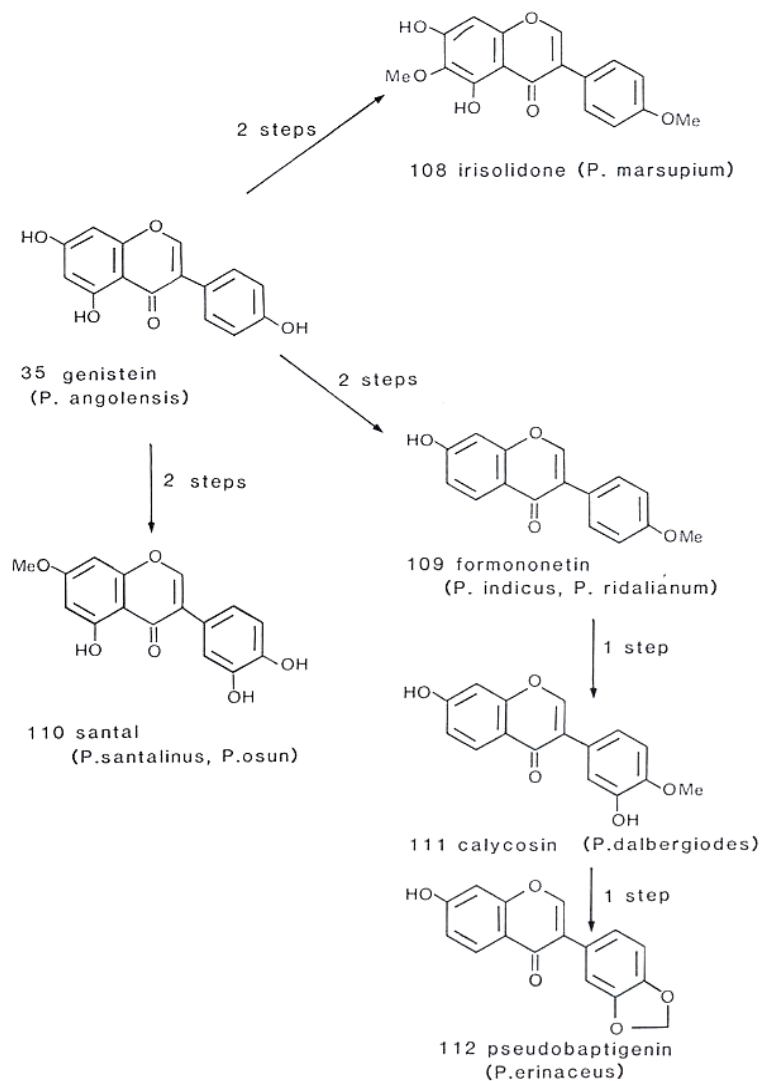


Figure 29. Biosynthèse et distribution des isoflavonoïdes de *Pterocarpus*(Rowe 1989)

Le déoxybenzoin de *Pterocarpus* appelé l'angolensin (figure 30) est issu de la structure 3-phénylchromen où le carbone 2 a été complètement réduit au groupe méthyle.

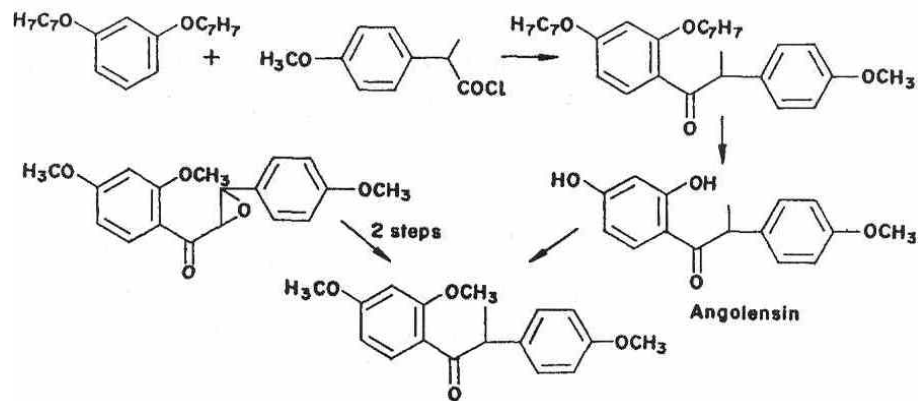


Figure 30. Angolensin de *Pterocarpus* (Seshadri 1972)

2.5.5.1.2 Les stilbènes

Le stilbène isolé chez *Pterocarpus* (*santalinus* et *marsupium*) est le ptérostilbène (figure 31). Ce composé possède un potentiel insecticide, antidiabétique et antioxydant (Seshadri 1972). Il est par contre absent chez d'autres espèces comme *P. indicus*, *angolensis* etc.

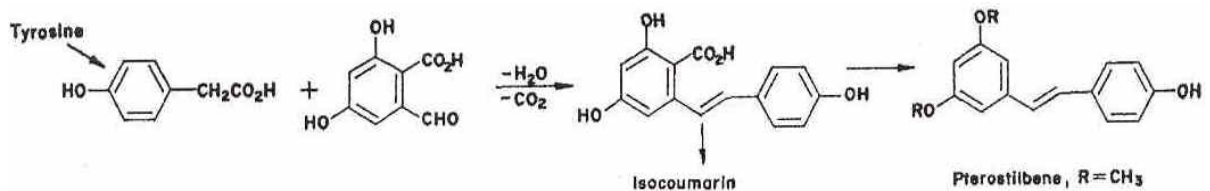


Figure 31. Pterostilbène (Seshadri 1972)

2.5.5.2 Les Composés terpéniques

Les composés terpéniques présents chez le *Pterocarpus* sont essentiellement le triterpène acide et l'acide acetyloleanolique. Cependant, l'agréable odeur aromatique que l'on peut sentir sur le bois issus des espèces *Pterocarpus* pourrait signifier la présence de composés volatiles tels les terpènes. On note des terpenoïdes comme le β -eudesmol chez *P. indicus* et le pterocarpol chez *P. macrocarpus* (figure 32)

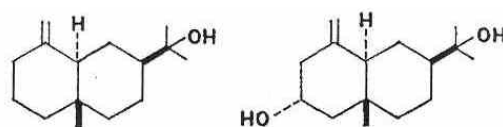


Figure 32. Terpenoïdes de *Pterocarpus* (Seshadri 1972)

2.5.6 Caractéristiques physico-mécaniques du bois de vène

Selon des études effectuées par le CIRAD sur quelques échantillons, le *Pterocarpus erinaceus* possède des caractéristiques physiques et mécaniques remarquables (tableau 3). La densité est de l'ordre de 0,89 avec un retrait linéaire très faible (3,2 % dans le sens radial et 5,9 dans le sens tangentiel) associé à un point de saturation très bas (21 %). Le séchage du bois est lent et n'occasionne pratiquement pas de défauts (déformation de collapse de cémentation et de fente). C'est donc un bois stable avec une anisotropie de retrait inférieure à 2. Les contraintes moyennes de rupture en compression axiale et en flexion statique sont respectivement 76 et 130 MPa. Le module d'élasticité est de 15670 MPa. C'est une espèce mécaniquement très résistante. Le bois de duramen ne peut être imprégné mais reste très durable et ne nécessite pas de traitement de préservation contre l'attaque des insectes.

Tableau 3. Propriétés physiques et mécaniques du bois de vène

Caractéristiques du bois	Moyenne	Ecart type
Densité	0,89	0,05
Dureté Monin	9,5	1,8
Coefficient de retractsibilité volumique (%)	0,34	0,05
Retrait tangentiel (%)	5,9	1,1
Retrait radial (%)	3,2	0,4
Contrainte de rupture en compression (MPa)	76	3
Contrainte rupture en flexion statique 4pts (MPa)	130	14
Module d'élasticité longitudinale 4pts (MPa)	15670	1260
Point de saturation de la fibre (%)		21%

Source CIRAD 2003 fiche technique N°210

2.5.7 Caractéristiques technologiques du bois de vène

Le bois présente un effet désaffutant assez important et nécessite l'usage de dentures stellitées pour le sciage et des outils au carbure de tungstène pour l'usinage. L'aptitude au tranchage est bonne tandis que le déroulage reste sans intérêt compte tenu du caractère décoratif en ébénisterie (CIRAD 2003). Il permet une bonne tenue des clous et le vissage exige des avant-trous. Le collage et la finition sont souvent difficiles à cause des teneurs souvent élevées en extraits.

2.5.8 Usage du vène

Pratiquement inconnu dans le commerce en dehors de sa gamme indigène, le *Pterocarpus erinaceus* fournit l'un des bois les plus beaux des forêts sèches de la région. Il est recherché aussi bien pour la fabrication des meubles, des portes que pour la facture d'instruments xylophones (figure 33a et b). L'espèce est en outre sollicitée en pharmacopée et surtout comme aliments pour le bétail en fin de saison sèche lorsque le couvert herbacé devient indisponible. Les éleveurs ont le plus souvent recours à l'émondage du *Pterocarpus erinaceus* pour l'alimentation des bovins. C'est le meilleur arbre fourrager des zones soudaniennes et guinéennes. Son fourrage permettrait selon certains éleveurs le rétablissement d'animaux faibles ou malades.



a - Instrument xylophone en bois de vène b- Lit en bois de vène
<http://harvardmagazine.com/2006/01/the-genius-of-the-balafo.html>

Figure 33. Quelques usages du bois de vène.

2.5.9 Sylviculture du vène

Peu de données sont disponibles sur la sylviculture du *Pterocarpus erinaceus*. Dans le cadre du Programme d'appuis à la Foresterie au Mali et en vue d'utiliser les espèces forestières locales dans les actions de régénérations artificielles, des essais en pépinière, réalisés à Farako, Koutiala et Bougouni par l'Opération Aménagement et Reboisement de Sikasso, indiquent une faible croissance de cette essence (Diallo 1992). Par contre, dans le cadre de l'identification des méthodes efficace de reconstitution artificielle des

formations forestières naturelles, Kelly(1995) a, après des tests d'enrichissement en troué, établi, chez *Pterocarpus erinaceus*, un bon taux de survie (71 %) suivant les années de plantation et le mode d'installation (en pots ou en racines nues). Selon ces études, la croissance en hauteur est modeste pendant les premières années de plantation (figure 34). Mais après les deuxième et troisième années, l'espèce réagit fortement et obtient alors une bonne croissance en hauteur (plantation de Zangasso et de Zamblara). Par ailleurs, dans la région de Korhogo (Côte d'Ivoire), ville située en zone soudano-guinéenne, des essais de croissance en plantation (parcelles de 1,56 m² et comptant 228 plantes : 8 lignes de 28 plantes à écartement de 3,5 x 2,0 m²), montrent une croissance non négligeable des espèces locales y compris *Pterocarpus erinceus* (Louppe et Ouattara 1993). Selon ces travaux la grande variabilité intraspécifique laisse penser qu'une amélioration peut être obtenue rapidement soit par sélection massale (forte densité de plantation et fortes éclaircies sélectives) soit par un programme d'amélioration strictement génétique.



Figure 34. Pied de *Pterocarpus erinaceus* en plantation

2.6 Variabilité structurelle et impact sur la qualité du bois

2.6.1 Introduction

Par son origine biologique, le bois est un matériau très variable, c'est-à-dire que ses caractéristiques varient aussi bien entre les espèces, dans la même espèce et à l'intérieur de l'arbre. Cette variabilité rend l'utilisation du bois plus complexe. La variabilité de la qualité du bois a plusieurs origines que l'on peut classer en deux catégories :

- Variabilité liée aux facteurs intrinsèques,
- Variabilité liée aux facteurs externes.

Les facteurs externes représentent toutes les variations du milieu qui induisent des modifications dans les modalités de la croissance d'un peuplement ou d'un individu dans l'espace (par les variations macro-climatiques et édaphiques qui s'exercent sur l'aire de répartition naturelle ou artificielle d'une espèce) et dans le temps (par les variations climatiques annuelles locales et l'évolution des peuplements).

Quant aux facteurs intrinsèques ils peuvent se diviser en deux catégories: l'anisotropie du bois et le caractère génétique.

Mais quelle que soit la source de variabilité, la densité, expression de la structure anatomique (proportion et densité des tissus ligneux du bois) est en générale considérée comme la variable physique explicative majeure de la qualité du bois. Elle est d'une manière générale corrélée plus ou moins étroitement avec les principales propriétés physiques et mécaniques du bois. L'origine végétale du bois explique donc ses particularités, mais aussi sa richesse et sa variabilité en tant que matériaux de construction. Il se distingue sur ce plan des autres matériaux utilisés dans la construction : brique, ardoise, béton, acier, PVC, etc.

2.6.2 Variations des propriétés liées aux conditions du milieu

Les conditions stationnelles ne se marquent pas directement sur les caractéristiques du bois mais ne se manifestent qu'à travers leur impact sur la vitesse de croissance et par là sur les propriétés technologiques du matériau produit (Hebert et al 2002). La largeur de

cerne est sous la dépendance de multiples facteurs. Elle traduit la fertilité de la station, la longueur de la période de végétation et évolue avec l'âge de l'arbre (Chanson 1988).

Selon Nicault et al (2001), la construction du cerne dépend des précipitations qui renouvellent le stock d'eau dans le sol, de l'intensité de l'évapotranspiration déterminée par les températures et des caractéristiques édaphiques du sol, notamment la réserve utile. Le stress hydrique serait un déclencheur de la transition bois initial-bois final (Nicault et al 2001).

Keller et al (1976) soulignent un effet stationnel très net sur la densité du bois de hêtre. Selon cet auteur tous les facteurs écologiques qui diminuent la fertilité des stations, diminuent également la densité.

Leclercq (1982), rapporte que l'effet du milieu à savoir le type d'humus et la classe de drainage du sol se marque essentiellement sur les caractéristiques transversales des fibres et des vaisseaux. La vitesse d'humidification tend à entraîner la formation de fibres plus longues, à lumen plus large et à parois plus minces et de vaisseaux plus larges et plus longs, alors que la vitesse de drainage du sol conduit à la formation de fibres plus courtes, à lumen étroit, à parois épaisses et de vaisseaux plus courts et plus étroits. Le milieu influence ainsi la qualité du bois à la fois par sa fertilité et par les conditions de drainage du sol. D'une manière générale, les propriétés du bois s'améliorent avec la fraîcheur et la richesse chimique du sol qui conditionnent ensemble le niveau de qualité dans un site donné (Leclercq 1979).

A en juger par la largeur des accroissements, Polge (1973) trouve que ce n'est pas la richesse du sol qui est en cause, mais sa structure physique. Selon cet auteur, les pluies d'automne notamment seraient plus bénéfiques sur le sol sableux que sur le sol argileux, d'une part par ce que dans le premier, le tissu racinaire a plus de facilité pour se développer, d'autre part par ce que, sur le sol argileux, les premières pluies faisant suite à la sécheresse estivale peuvent se perdre en partie par ruissellement et par reimbibition de l'argile.

Sur des sujets âgé de 21 et 65 ans, Bhat and Priya (2004) rapportent l'influence significative de la variation de provenance sur les propriétés du teck en Inde. Les tecks provenant du nord Kanara auraient en général une croissance lente et présenteraient des caractéristiques mécaniques inférieures à celles provenant de Malabar (Nilambur). Ces travaux soulignent également une tendance croissante du module d'élasticité, de l'effort

maximum de rupture du bois et du pourcentage de parois cellulaires hautement lignifiées, du nord vers le sud, en dépit d'une croissance plus faible et d'une porosité bien définie avec des bandes de parenchymes du bois initial plus larges.

Piedra and Zobel (1986) rapportent une variation de densité de 0,51 à 0,56 avec une tendance croissante de l'Ouest vers l'Est chez *Pinus tecunumanii* du Guatemala.

Hernandez and Restrepo (1995) trouvent selon la provenance géographique, des variations considérables de densité et de complaisance élastique (de l'ordre de 314 kg/m³ à 409 kg/m³ et de 91x10⁻⁶ MPa⁻¹ à 136x10⁻⁶MPa⁻¹ respectivement) chez *Alnus acuminata* H.B.K. de Colombie.

Wilkins et Sabine (1989) soulignent chez *Acacia melanoxylon* une relation entre la latitude et la variation des caractères anatomique. En effet la longueur des vaisseaux, la proportion des fibres, la proportion des rayons multisériés, sont positivement liées à la latitude tandis que la fréquence des vaisseaux, le diamètre des vaisseaux et l'abondance des cristaux minéraux ainsi que la proportion des rayons unisériés, des vaisseaux, et du parenchyme axial le sont négativement.

Tsoumis et Panagiotidis (1980) ont étudié l'effet des conditions de croissance sur la qualité du bois de pin noir (*Pinus nigra* Arn.) de Grèce. Ces travaux soulignent d'une part des longueurs de trachéides plus élevées chez les arbres dominant poussant au nord sur des sites de qualité moyenne, tandis qu'au sud, les arbres dominés sur la même qualité de sol présentaient des proportions de bois final plus importantes et d'autre part une densité du bois en hausse sur les sites de meilleure qualité au sud.

Noshiro et al (1994), observent chez *Alnus nepalensis* une large contribution de l'altitude qu'il considère comme un effet indirect de la température. La variabilité intraarbre des caractéristiques anatomiques est d'autant plus élevée que l'écart en altitude est plus élevé (Noshiro et Suzuki 1995).

Selon Rodriguez et al (2006), la température en dessous de zéro ou le manque de précipitations pendant plusieurs mois entraîneraient une variabilité de porosité chez *Buddleja cordata* du Mexique, ce qui n'a pas de rapport avec la phénologie puisque l'espèce possède des feuilles persistantes. Cependant, l'auteur rapporte que les caractéristiques des éléments tels que les perforations, les épaissements spiralés, le

type de ponctuation, le type de parenchyme paratrachéal et le type de rayon ne sont pas corrélés avec la taille de l'espèce, le climat et les caractéristiques du sol.

La structure qui résulte de l'activité cambiale peut être considérée tributaire d'un ensemble de facteurs qui englobent les conditions climatiques annuelles, le sol, le traitement sylvicole et le patrimoine génétique individuel dont l'influence cumulée se marque globalement sur l'épaisseur de l'accroissement (Leclercq 1977).

L'influence des conditions de croissance sur les propriétés du bois de mélèze du japon (*Larix kaempferi*) a été étudiée par Zhu et al (1998). Ces travaux rapportent une différence significative de densité de cerne et de proportion de bois final entre des arbres de croissance faible et vigoureuse.

2.6.3 Variations des propriétés liées aux tissus constitutifs

Il est généralement admis que la propriété physique qui affecte le plus les propriétés mécaniques est la masse volumique du bois et cela tant au niveau intra-spécifique qu'au niveau inter-spécifique bien qu'à ce niveau des réserves sont faites par certains travaux (Nepveu 1994, Leclercq 1981). Les propriétés mécaniques s'améliorent avec une augmentation de la masse volumique du bois.

Beery *et al* (1983) ont effectué une étude reliant l'anatomie quantitative du bois et son comportement mécanique en traction transverse. De ces travaux il ressort que, le module d'élasticité et l'effort maximum de rupture sont plus étroitement liés à la densité qu'à l'anatomie du bois toutefois il a été observé une relation entre les faibles valeurs des caractéristiques mesurées et les caractéristiques anatomiques correspondantes. Les proportions de vaisseaux du bois initial influencent négativement la contrainte et l'effort maximum de rupture tandis que les largeurs de rayons sont positivement corrélées aux propriétés. Leclercq (1981) constate par contre que la masse volumique n'est pas un critère suffisant pour estimer avec précision les propriétés du bois puisqu'une même masse volumique peut correspondre à des échantillons de structure anatomique différente qui présentent des propriétés mécaniques différentes. Cet auteur trouve toute l'explication au niveau des éléments cellulaires (la proportion des différents éléments anatomiques, principalement les fibres et les éléments de vaisseaux, ainsi que

l'épaisseur propre de leur paroi (de 1,5 μm chez le balsa, à plus de 10 μm chez l'azobé). Après une étude effectuée sur le rôle des éléments anatomiques sur la résistance mécanique du bois de hêtre, l'auteur constate que la résistance à la compression axiale est influencée positivement par la proportion, la longueur et l'épaisseur des parois des fibres les moins poreuses et négativement par le diamètre des fibres. La proportion des fibres les moins poreuses conditionne la résistance finale du bois sous l'effort.

Selon Courtney (2000) dont fait état Müller *et al* (2003) le comportement en compression des solides cellulaires comme le bois est gouverné par l'épaisseur des parois cellulaires, la forme des cellules, les lumens des cellules, la densité de distribution des éléments et les propriétés des substances composant les parois.

Tabarsa and Chui (2000) rapportent que les premiers phénomènes de collapse de la structure cellulaire en compression transversale, apparaissent au niveau des parois cellulaires les moins épaisses et moins denses.

Sharp *et al* (1999) trouvent que la différence de mode de rupture des espèces est à attribuer à la différence de structure anatomique qui les caractérise.

Selon Rao *et al* (2002), la fréquence et le diamètre des vaisseaux ainsi que leur longueur varient significativement dans l'arbre de la base vers le sommet tandis que la proportion des tissus varie peu. Quant à la densité, l'auteur trouve d'une part, une corrélation positive avec la proportion des rayons ainsi que des fibres et d'une part, une corrélation négative avec la proportion des vaisseaux.

Huang *et al* (2003) rapportent que l'angle des microfibrilles affecte la résistance mécanique et la stabilité dimensionnelle du bois.

Selon Kojima and Yamamoto (2004), la magnitude de la déformation en traction longitudinale augmente avec l'angle des microfibrilles. Il estime que chaque paramètre du comportement viscoélastique du bois est affecté par l'angle des microfibrilles.

Kojima and Yamamoto (2005) révèlent un effet très significatif de l'humidité sur le comportement mécanique du bois lié à l'angle de microfibrilles. A angle de microfibrilles donné la résistance mécanique du bois est d'autant plus faible que l'humidité est élevée.

La masse volumique, critère largement utilisé par les technologues pour évaluer les propriétés physiques et mécaniques du bois est le rapport du poids au volume apparent, ce qui signifie que, pour un même volume apparent de bois, l'accroissement du volume poreux conditionné par la proportion des cavités cellulaires entraîne automatiquement la diminution du volume de matière ligneuse défini par la proportion des parois cellulaires.

Selon Hannrup et al (2001), la proportion des trachéides du bois final et le diamètre radial des trachéides du bois initial sont les plus importants prédicateurs de la densité du bois. Il s'ensuit que la porosité du matériau et, en particulier, la proportion des fibres à large lumen et les vaisseaux contribuent directement à la diminution de la masse volumique. La densité du bois est donc strictement liée à l'épaisseur des parois cellulaires. Il apparaît donc évident que la densité ainsi que les performances mécaniques du bois se renforcent avec l'épaississement des parois des fibres, les propriétés et la résistance mécanique desquelles provient de l'organisation des polymères cellulosiques (des macromolécules) qui les composent (Thomas 1981, Bergander et Salmén (2002)).

Fahlén et Salmén (2003) estiment que la compréhension de l'arrangement des polymères dans la paroi cellulaire permet de comprendre le comportement mécanique de la paroi. La cellulose, par son orientation linéaire et les fortes liaisons covalentes et hydrogènes intra et intermaillons (unités) de glucose, renforcerait le bois dans le sens longitudinal. En revanche la faible résistance du bois en sens transverse est relativement liée à la faible résistance mécanique des macromolécules hémicellulosique constituant la lamelle moyenne et leur faible liaison hydrogène latérale avec les molécules de cellulose. Le dépôt de lignine sur les surfaces extérieure des microfibrilles et entre les parois confère au bois la rigidité nécessaire au soutien de l'arbre sur pied. En outre l'épaisseur et l'angle des microfibrilles dans la couche S1 et S3 influence également les propriétés transversales de la paroi cellulaire (Thomas (1981), Bergander et Salmén (2002)).

Selon Kollmann (1959, 1982) dont fait état Müller et al (2003), la résistance à la compression transversale est définie par l'effort critique de chaque parois cellulaire. Müller et al (2003) rapportent que les différences dans la structure anatomique et dans la microstructure des parois cellulaires entre les espèces (l'épicéa, le chêne et le hêtre) expliquent la différence de comportement mécanique en compression transversale

(chargement perpendiculaire aux fibres). On peut donc considérer que les propriétés physiques, mécaniques et même chimiques du bois (performance en service, comportements vis-à-vis des agents chimiques et de l'attaque microbologique) qui déterminent ses applications sont imputables à sa structure et à sa nature à l'échelle nanométrique c'est-à-dire directement liées au comportement des constituants macromoléculaire des parois cellulaires.

En effet les arbres ayant une densité du bois intrinsèquement faible (c'est-à-dire indépendante de la croissance radiale) ont tendance à se distinguer soit par une proportion et des diamètres de vaisseaux du bois initial supérieurs à la moyenne soit par une faible proportion de fibres dans les bois initial et final ou soit par une densité faible du parenchyme axial du bois final (Guilley et Nepveu 2003). Les modifications anatomiques (variabilité des proportions et dimensions des cellules constitutives) liées aux conditions de croissance (nature du sol et les changements climatiques qui s'opèrent pendant la saison de végétation) et dont la conséquence majeure est l'hétérogénéité dans la distribution de largeur de cerne, sont à l'origine de la variabilité des propriétés physico-mécaniques du bois. Le comportement mécanique du bois résulterait directement de l'organisation structurale de la matière ligneuse ; mais chaque essence est caractérisée par son plan ligneux et chaque individu présente une expression particulière de ce plan ligneux. En conséquence il est légitime de rechercher les raisons de la variabilité à l'échelle anatomique (Badel et Perre 1999).

Keunecke et al (2006) rapportent que les caractéristiques anatomiques telles que l'angle des microfibrilles, le pourcentage des rayons et la grande quantité des extraits jouent un rôle important dans le comportement viscoélastique du bois.

Le retrait, particulièrement lié à l'anisotropie de la structure cellulaire dont l'orientation dominante est verticale, est le phénomène qui résulte du séchage par un rapprochement des molécules de cellulose des microfibrilles disposées verticalement dans la paroi cellulaire. Il s'ensuit qu'un épaissement de la paroi entraînera un accroissement de la quantité de cellulose par unité de volume et par conséquent accentuera le retrait transversal.

Quant à la longueur des fibres, elle a un effet positif sur le retrait transversal et les performances mécaniques du bois à travers un angle de microfibrilles réduit.

Almeida (2006) a étudié l'influence de la structure du bois sur les propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées. Ces travaux ont permis de préciser, l'influence des éléments anatomiques d'une part sur les paramètres de stabilité dimensionnelle et d'autre part sur le comportement en sorption du bois. De ces travaux il ressort que la teneur en humidité d'équilibre à laquelle le retrait commence est positivement corrélée à la proportion des rayons, que le retrait différentiel est inversement proportionnel au plus petit diamètre des lumens des fibres et que les espèces à grands vaisseaux ont un facteur de retrait plus faible. L'effet des éléments anatomiques sur la teneur en humidité d'équilibre pour de fortes valeurs d'humidité relative diffère fortement d'une espèce à l'autre. L'auteur trouve que les paramètres des vaisseaux associés à la masse volumique, sont corrélés négativement avec la valeur d'humidité d'équilibre du bois. Le rapport de sorption dépend de la masse volumique du bois, les espèces plus denses ayant une meilleure stabilité hygroscopique. Le PSF décroît également quand la masse volumique augmente.

Arevalo (2002) a trouvé chez l'Acajou que le paramètre anatomique qui affecte le plus le gonflement radial et tangentiel du bois est la forme des rayons et des vaisseaux.

2.6.4 Variations de propriétés liées à l'accroissement annuel

En fonction des caractéristiques de chaque saison végétale (ensoleillement, nature et fertilité du sol, réserve en eau, altitude, température ambiante, pollution atmosphérique, concurrence entre arbre, vieillissement de l'arbre etc.) auxquelles il est sensible, le cambium dose l'intensité de ces divisions cellulaires. Ceci se traduit par une variation de la distribution de largeur de cernes et une variation de la proportion des tissus issues chaque année de l'assise cambiale. Par définition, la largeur de cerne ou l'accroissement annuel correspond à l'épaisseur de la couche de bois produite par le cambium au cours d'une année de végétation. Elle permet d'estimer la vitesse de croissance radiale de l'arbre et sa régularité constitue un caractère déterminant pour l'homogénéité et la qualité du bois. Il faut rappeler que la valeur de l'accroissement annuel, informe sur le temps nécessaire à l'espèce pour atteindre le diamètre d'exploitation. Il reflète aussi visuellement les conditions environnementales du développement de l'arbre et permet ainsi de contrôler indirectement la qualité du bois produit. Ce paramètre est fondamental

dans le cadre de l'aménagement et de la gestion durable d'une forêt. C'est le paramètre sur la base duquel on peut fixer les délais de la rotation des interventions, déterminer le volume maximum exploitable sans risque d'appauvrissement du peuplement et d'ajuster ainsi la coupe du bois aux capacités des peuplements. La compréhension de la relation entre le taux de croissance et les propriétés du bois est importante pour maximiser et maintenir la production de bois massif et de fibres (Lei et al.1997). C'est pourquoi la périodicité et l'analyse des cernes ont depuis des décennies été une préoccupation de nombreux chercheurs (Détienne 1989, Détienne et al 1998). Les cernes peuvent, en plus de la datation de l'âge du bois, permettre de tracer leur histoire. Le vieillissement du cambium et la distribution des largeurs de cernes associés à la densité (proportion) des cellules constitutives accumulées chaque année marquent définitivement la croissance de l'arbre et révèlent en grande partie les qualités propres du bois.

Selon Owoundi (1992), la largeur de cerne est la première caractéristique de croissance sur laquelle le forestier, par le biais des techniques sylvicoles, peut agir. Ceci signifie que le traitement sylvicole est en fait le seul moyen dont dispose le sylviculteur pour tenter d'améliorer la qualité du bois puisque le niveau des propriétés est tributaire de l'épaisseur des cernes et que l'homogénéité de ces mêmes propriétés dépend de leur régularité. Dans un peuplement donné, l'épaisseur et la régularité des cernes sont en générale fonction du régime et plus particulièrement de la périodicité des éclaircies effectuées (Leclercq 1980).

Leclercq (1980) estime qu'en réalité, le mécanisme régulateur de la croissance radiale se situe au niveau du houppier dont le développement harmonieux sur le pourtour entier de l'arbre est la condition essentielle pour obtenir une croissance régulière. La régularité des accroissements annuels, sous l'emprise du développement harmonieux du houppier des arbres conditionne ainsi l'homogénéité de la qualité du bois au sein de l'individu (Leclercq et Jourez 1992).

En général, la sylviculture et l'amélioration génétique ont pour objet majeur d'accroître la vitesse de croissance des arbres et de diminuer les révolutions pour répondre efficacement aux besoins des populations et des industries en bois de feu, de trituration et d'œuvre. Mais la conséquence majeure reste une forte hétérogénéité des produits de première transformation due aux fortes variations spatiales des propriétés du bois à l'intérieur de l'arbre.

Face aux suspicions des milieux professionnels sur la qualité du bois issus des plantations, de nombreux travaux (Leclercq 1977, Hock et Mariaux 1984, Nepveu 1994, Degron 1994, Guilley 1997, Hebert et al 2002, Guilley et Nepveu 2003 etc.) ont été effectués pour la plupart des cas sur des espèces des régions tempérées afin de maîtriser la relation croissance et qualité du bois. Ces différents travaux soulignent l'importance de la distribution de largeur de cernes dans l'appréciation de la qualité du bois. En effet, que ce soit pour des bois issus des plantations ou des formations naturelles, ces études montrent que le caractère largeur de cerne peut être considéré non seulement comme une source de variation ou caractéristique de qualité du bois mais aussi et surtout comme un indicateur des conditions de croissances (fertilité de la station, condition climatique, techniques sylvicoles etc.).

Leclercq (1985) rapporte que la vitesse de croissance est un critère probant de la qualité du bois mais uniquement au niveau individuel car il perd de sa signification dans les comparaisons entre arbres issus d'un même site et à fortiori entre arbres originaires de sites différents.

Till (1986) estime que parmi les facteurs écologiques le climat, l'altitude et le substrat influencent le plus les variations spatiales et temporelles de l'épaisseur des cernes.

Classiquement on distingue à l'intérieur du cerne un bois initial peu dense et un bois final beaucoup plus dense. Les proportions relatives de l'un et de l'autre dans le cerne, variables à l'intérieur d'un même individu, affectent directement les propriétés du bois en occurrence la couleur, le grain, la texture, la densité, le retrait, l'aptitude au séchage, à l'usinage, à la finition etc. Dans l'arbre, le niveau le plus fin de la variabilité de la qualité du bois se situe ainsi au niveau du cerne. C'est à ce niveau que l'on rencontre les écarts les plus élevés de densité (Jodin 1994). Chez les feuillus à zone initiale poreuse, l'augmentation de largeur de cerne ne se reporte quasi intégralement que sur la largeur du bois final. Le bois comporte alors plus de fibre et devient donc plus dense et plus sombre comparativement à des bois à croissance lente. Quant aux feuillus à pores diffus ou sémi-poreux l'effet de la largeur de cerne semble encore être très peu élucidé.

Leclercq (1977) souligne chez le hêtre une augmentation de la masse volumique qui va de pair avec une accélération de la croissance c'est-à-dire avec des vaisseaux peu nombreux, longs, étroits et des fibres longues à lumen réduit.

Koubaa *et al* (2000) trouvent chez l'épinette noire une corrélation hautement significative entre les composantes densitométriques et la largeur de cerne: la densité est corrélée négativement à la largeur du bois initial et positivement à la largeur du bois final.

Contrairement à l'idée généralement admise suivant laquelle la qualité du bois de hêtre augmenterait toujours avec la largeur des cernes, Polge (1972) a montré l'indépendance à peu près complète entre critères de qualité et critères de vigueur chez des hêtraies poussant sur des sols riches frais et profonds.

Lenger *et al* (1999) indiquent que les arbres qui échappent à la concurrence de leurs voisins (arbres d'alignement ou à houppier étendu) grossissent vite et donnent naissance à un bois plus tendre moins nerveux, plus clair et plus beau que celui des arbres qui ont été dominés ou dont la croissance a été plus ou moins entravée. Dans ce dernier cas les cernes sont plus fins mais le bois est plus fibreux, plus coloré et plus dense.

Par contre Leclercq et Jourez (1992) trouvent que la largeur des cernes ne compromet pas nécessairement la qualité du bois en s'accroissant mais qu'en pareil cas, le matériau peut être doté d'une résistance mécanique légèrement plus faible et se voir en revanche nanti d'une meilleure stabilité dimensionnelle.

Selon Leclercq (1983), l'accélération de la croissance engendre sur le plan qualitatif, une diminution de longueur des fibres et des vaisseaux, un accroissement du lumen des fibres et des vaisseaux ainsi qu'une réduction de l'épaisseur des parois des fibres alors que sur le plan quantitatif elle réduit la porosité (par une diminution du nombre des vaisseaux par unité de surface) et une augmentation de la proportion des fibres. On obtient ainsi un bois à faible retrait avec une amélioration de la résistance mécanique. D'où l'apanage du bois de hêtre de qualité suite à une croissance rapide et soutenue. Polge et Keller (1973) rapportent par contre qu'à chaque fois que se produit une accélération de la croissance chez le chêne, la qualité du bois se dégrade, ce qui implique un risque certain à faire pousser plus vite cette essence par des moyens culturels.

Selon Leclercq (1981), l'analyse qualitative et quantitative de la structure anatomique explicite d'une manière très satisfaisante la variabilité des propriétés du bois quelle que

soit l'influence du milieu du traitement sylvicole, du patrimoine génétique ou des conditions climatiques. Ces travaux montrent que le retrait volumique total s'accroît avec la proportion des fibres à faible lumen et diminue avec l'accroissement du diamètre des fibres à lumen plus large. Selon l'auteur, la liaison retrait-épaisseur des parois explique aussi la liaison observée entre la masse volumique et le retrait.

L'analyse des cernes associée à la décomposition fine des cellules constitutives permet ainsi de comprendre chez bon nombre d'espèces la relation croissance et qualité du bois. Selon des études effectuées sur le chêne, la croissance rapide se traduit par une proportion et une densité plus élevée de fibres dans le bois final par rapport au bois initial.

Nepveu et Tran Ngoc (1984) trouvent par exemple que l'état de surface est lié, à l'échelle intra (en passant d'un cerne à l'autre) et interindividuel, aux composantes densitométriques. La densité minimum de cerne est un critère déterminant pour expliquer la rugosité ; on estime qu'un gain de 65 kg/m^3 pour la densité peut améliorer la rugosité de 40 % chez le bois de douglas (*Pseudotsuga menziesii*).

S'il est donc communément admis chez bon nombre d'essences feuillues des régions tempérées que l'élargissement des accroissements entraîne une certaine amélioration des performances mécaniques, des études similaires effectuées sur quelques bois tropicaux (Hock et Mariaux 1984) montrent que non seulement cela n'apparaît pas comme une loi générale mais la tendance serait plutôt beaucoup plus variable d'une espèce à l'autre. Ce qui laisse envisager des études similaires propres à chaque espèce afin de déterminer l'effet de la largeur de cerne sur la qualité du bois. Des essais effectués sur des Limbas d'origine géographiques différentes en Côte d'Ivoire montrent très clairement qu'une croissance rapide donne des bois à plus faible retrait, léger et dont l'anisotropie de retrait s'est accrue. Le Teck par contre montre une indifférence totale de ses propriétés à la croissance (Hock et Mariaux 1984). Il convient donc de continuer les recherches sur les essences tropicales du moins celles qui intéressent les sylviculteurs en utilisant des dispositifs plus modernes afin de mieux comprendre la relation croissance et propriétés du bois.

2.6.5 Variations de propriétés liées à l'âge cambial

Par définition, l'âge cambial correspond à l'âge de cerne compté depuis la moelle à un niveau de hauteur dans l'arbre considéré. Un cerne de 10 ans dans un arbre vieux de 100 ans correspond au cerne mis en place par le cambium il y a 90 ans ; en d'autre terme il s'agit du cerne formé à la dixième année de vie de l'arbre. Dans une certaine mesure, le tronc d'un gros arbre peut normalement renfermer toute la gamme des variations de structure de l'essence. Ainsi, on distingue deux états de maturité du bois à l'intérieur d'un individu : le bois juvénile et le bois adulte dit mature (figure 35). Selon Polge (1964) dont fait état Jodin (1994) et Hebert (2002), l'ensemble des cernes proches de la moelle de bas en haut de l'arbre constitue le bois juvénile en d'autres termes il s'agit du bois formé dans la cime vivante. Ce bois constitué de cernes plus jeunes présente ainsi chez toutes les espèces des caractéristiques singulières (rayons plus hétérocellulaires et du parenchyme axial plus abondant, fibres courtes, angle des microfibrilles plus fort, faibles performances mécaniques etc.) par rapport au bois dit adulte formé de cernes plus âgés (figure 36) (Zobel et Sprague 1998 ; Bowyer et al. 2007) et qui forme chez des individus très âgés la masse essentielle du tronc. Ce dernier présente des modifications qui reflètent plus les conditions du milieu que les caractères héréditaires.

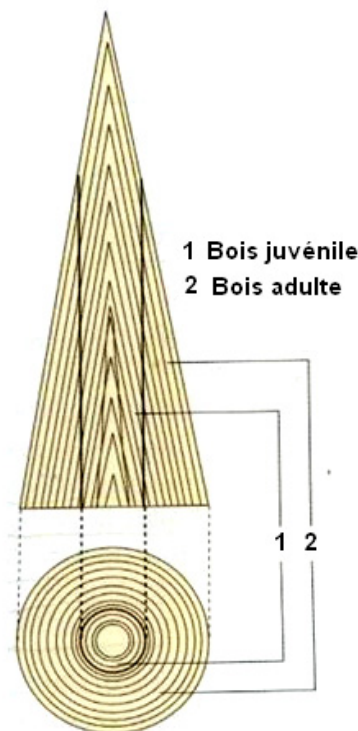


Figure 35. Bois juvénile - bois adulte (Hébert et al. 2002)

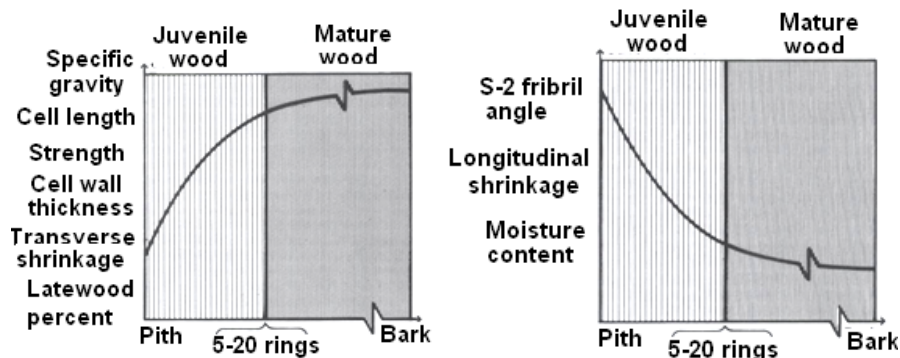


Figure 36. Variation radiale des propriétés du bois (Bowyer et al. 2007).

Afin d'atteindre le plus vite possible des diamètres d'exploitation, les producteurs de bois ont le plus souvent tendance à pratiquer une sylviculture intense marquée par une augmentation de la vitesse de croissance des arbres. Ceci a pour conséquence la production d'une quantité importante de bois juvénile considéré préjudiciable à la qualité du bois. D'où toute l'importance de la maîtrise de la notion bois juvénile et adulte tant chez les espèces des régions tempérées que chez celles des régions tropicales.

Selon Nepveu (1994), Zobel et Sprague (1998), la proportion du bois juvénile et les fluctuations de largeurs de cerne sont liées à l'effet conjoint de l'arbre, des facteurs environnementaux et des pratiques sylvicoles mises en œuvre (place disponible autour de l'arbre, éclaircies etc.). Ces facteurs influencent la structure anatomique du bois à travers les dimensions des cellules, la distribution et la proportion par unité de surface des différents éléments constitutifs formés pendant l'activité cambiale.

A partir d'une étude réalisée sur l'épinette noire, Alteyrac et al (2006) montre que la transition du bois juvénile au bois adulte se produit après 12 ans voir plus tard dans les peuplements plus denses. Chez les feuillus l'âge de transition reste difficile à déterminer mais la limite semble s'établir à des âges encore plus avancés (20 à 40 ans). La transition se produit sur plusieurs années, et plus probablement il existe un bois de transition entre le bois juvénile et le bois adulte. Le passage entre les deux zones de bois semble être progressif et la délimitation repose sur une étude de l'évolution radiale des propriétés marqueurs de l'état juvénile. Ces dernières sont reconnues être peu sensibles à l'effet largeur de cerne ; il s'agit principalement de l'angle des microfibrilles, du retrait longitudinal et de la longueur des fibres (Keller 1994, Bowyer et al 2007, Zobel et Sprague 1998). En général, la différence entre le bois juvénile et le bois mature est

relativement faible pour le bois à pores diffus, comparé au bois à zones poreuses et surtout au bois des conifères (Zobel et Sprague 1998). Le bois juvénile se caractérise par des fibres plus courtes, un angle de microfibrilles et un retrait longitudinal plus important (Jodin 1994, Bowyer et al 2007). Le retrait longitudinal est associé à l'angle des microfibrilles et plus cet angle est élevé plus le retrait longitudinal devient important. De même il ressort des études effectuées par Zahlberg et al (1997) dont fait état Huang et al (2003) que les propriétés mécaniques du bois sont étroitement liées à l'angle des microfibrilles et plus celui-ci est important plus le bois affiche de faibles valeurs de propriétés mécaniques. Ce qui explique les faibles valeurs de module d'élasticité constatées dans le bois juvénile et le bois de réaction.

Borgin et al (1975) ont étudié sur des échantillons feuillus âgés de 900 à 4400 ans l'effet de l'âge sur l'ultrastructure du bois. Ces travaux, par une analyse du mécanisme de fracture, des fissures, des cassures et du décollement au niveau ultrastructure révèlent que le bois juvénile est plus affecté par ces défauts comparativement au bois adulte. Alors que la longueur des fibres croît de la moelle vers l'écorce, l'angle des microfibrilles et le retrait longitudinal diminue (Jodin 1994, Zobel et Sprague 1998). Il faut donc noter qu'au delà de la transition bois juvénile-bois adulte, les transformations morphologiques des éléments anatomiques se poursuivent à un rythme moins marquée.

Plusieurs auteurs (Leclercq 1979 ; Jodin 1994 ; Guilley et al 1999 ; Guilley et Nepveu 2003 ; Berges 1998 ; Rao et al 1997 ; Degron et Nepveu 1996) révèlent bien un effet âge dans la variabilité inter cerne à l'intérieur de l'arbre. Dans un même contexte environnemental donné ceci s'expliquerait par le vieillissement du cambium. La largeur des cernes diminue avec l'âge de l'arbre ; ce qui a pour conséquence la formation des cernes plus denses vers la moelle chez les feuillus et vers la périphérie chez les résineux (Nepveu 1994). Selon ces travaux la variation des proportions et des caractéristiques des tissus constitutifs (proportion des fibres, diamètre et nombre des vaisseaux ; taille et nombre de rayons ligneux ; épaisseur des parois) du cerne au fur et à mesure que l'arbre vieillit expliqueraient cette tendance.

Zhu et al (1998) observent au environ de la moelle une diminution de la densité du cerne avec la largeur de cerne alors qu'en périphérie cette tendance n'apparaît pas. Par contre en périphérie on observe une diminution de la largeur de bois final avec

l'augmentation de la largeur de cerne pendant qu'au environ de la moelle ce rapport est constant.

Parker et al (1978) observent chez l'aulne, une diminution de la largeur de cerne de la moelle vers la périphérie mais ne trouve pas une relation constante en la densité et la largeur de cerne. En revanche le pourcentage de fibres dans le cerne diminue avec l'âge chez les espèces à zone initial poreuse.

Sur trois groupes d'âge (3 ; 5 et 9 ans) d'*Eucalyptus grandis* de l'inde, Bhat et al (1990) constatent une augmentation significative de la longueur des fibres avec l'âge et une très faible variation de la densité. Le diamètre des lumens des vaisseaux du bois initial augmente alors que le nombre de vaisseaux par unité de surface diminue.

Selon des études effectuées sur la variation radiale des caractéristiques anatomiques et de la densité du bois de clones d'*Eucalyptus camaldulensis*, Teera Veenin et al (2005) trouvent que la densité des vaisseaux diminue rapidement dans les 2 – 4 cm en partant de la moelle alors que la longueur des fibres croît faiblement.

Selon Huber F. (1993), la surface des vaisseaux est peut modifiée par l'environnement. A la lumière de ces travaux, la surface des vaisseaux ne demeure pas constante tout au long de la vie de l'arbre. Elle évolue très sensiblement en fonction de l'âge cambial dans la phase juvénile de l'arbre. Cependant, cette évolution est sans doute due à une programmation endogène difficile à contrecarrer.

Cinotti (1991) a trouvé qu'une forte surface des vaisseaux est un caractère prédisposant à la gélivure. Il indique également que la texture, la largeur de cerne et le nombre de rayons ligneux par unité de longueur serait plus élevé chez les sujets gélivés.

Outre ces modifications anatomiques radiales, les couches de bois les plus anciennement formées, subissent avec le temps une série de modification chimique due au processus de duraminisation. Ce qui entraîne non seulement la mort complète des cellules restées encore actives mais aussi et surtout une obstruction plus ou moins importante des vaisseaux et l'imprégnation des tissus par les métabolites secondaires appelées extractibles. La variabilité totale de la qualité intraarbre du bois trouve donc toute son explication dans les modifications anatomiques et chimiques liées au vieillissement de l'arbre et à la variation de largeur de cernes.

Selon Guilley et Nepveu (2003), la diminution de densité du bois de chêne consécutive au vieillissement du cambium s'explique en grande partie par des diminutions de la texture et de la proportion des fibres dans le bois final tandis que celle consécutive au ralentissement de la croissance radiale a principalement pour origine une diminution de la texture.

2.6.6 Propriétés structurelles et qualité acoustique du bois

Il est généralement admis que pour des bois de résonance destinés à la fabrication du violon, une augmentation de la densité du bois entraîne une diminution de la vitesse de propagation des ondes sonores et par conséquent nuirait considérablement la qualité acoustique de l'instrument (Bucur 2006). Si chez le violon cela semble être une règle générale, les espèces destinées à la confection des xylophones possèdent en règle générale une densité élevée de l'ordre de 0,80-1,20. Elles sont généralement stables et possèdent le plus souvent une faible sensibilité aux variations d'humidité et un faible facteur de perte dus aux taux relativement élevés en substance extractibles (Richter 1988, Bremaud 2006). Bucur (2006) rapporte également l'effet de la vitesse de croissance et l'âge des cernes sur la qualité acoustique du bois d'épicéa de résonance. Selon ces travaux, la vitesse des ultrasons diminuerait avec l'augmentation des largeurs de cernes, tandis que les valeurs du module d'Young ont été trouvées légèrement supérieures dans le bois mature. Selon cet auteur, la qualité acoustique des instruments de musique dépend également des conditions environnementales : la température (l'amortissement étant d'autant plus élevé que la température est basse) et l'humidité relative de l'air (une température normale de chambre (20 °C), 60 à 65 % d'humidité relative de l'air et environ 8 à 10 % d'humidité du bois sont en général conseillées). L'amortissement de la vibration acoustique est aussi lié à la fréquence de vibration et à la composition chimique du bois en métabolites extractibles.

La variabilité entre essences de la qualité du bois pour la facture d'instrument de musique est l'homogénéité, la régularité de la structure anatomique et l'organisation cellulaire du plan ligneux (Bucur 1995, Brancheriau *et al* 2006). Selon Brancheriau *et al* (2006), les vaisseaux et la morphologie des fibres ne semblent pas avoir d'impact sur la qualité acoustique du bois. Cependant, la qualité acoustique peut être améliorée quand

les fibres possèdent une haute flexibilité et que les vaisseaux restent peu nombreux. En revanche les parenchymes axial et radial seraient les composants essentiels influant la performance acoustique. Des parenchymes axiaux de type paratrachéal, moins abondant et des rayons courts, moins nombreux et homogènes constitueraient des caractères de qualité acoustique du bois. L'évaluation des qualités acoustiques relève donc de la mise en commun de plusieurs domaines de compétence; d'une part les luthiers apportent un savoir empirique très précieux qui permet le choix des meilleurs essences et d'autre part, les connaissances en mécanique et en anatomie du bois permettent une meilleure compréhension de l'origine de ces qualités (Brancheriau et Détienne 2006).

2.7 Influence des métabolites secondaires sur la qualité du bois

Considérées comme des composés non structurels, les métabolites secondaires rentrent très généralement en ligne de compte dans la science du bois lorsqu'on parle de durabilité naturelle, de couleur, d'odeur et de saveur du bois. Le plus souvent toxiques, elles confèrent ainsi au bois une durabilité naturelle élevée à l'égard des organismes lignivores et particulièrement les champignons de pourriture (Deon et al Hart 1989; Hwang et al 2007). La couleur, l'odeur du bois sont des caractéristiques très utiles, non seulement pour l'aspect esthétique, mais aussi et surtout, pour l'identification du bois. Mais aujourd'hui l'aspect de plus en plus abordé par de nombreux chercheurs est l'influence que ces substances extractibles pourraient avoir sur les caractéristiques physico-mécaniques et technologiques du bois. Ces substances exerceraient une influence considérable sur de nombreuses propriétés du bois. La teneur et la nature des métabolites secondaires sont ainsi considérées comme des caractéristiques de qualité qui affectent la mise en œuvre du bois (Hillis 1971). De nombreux travaux font ainsi état de l'effet des extractibles sur les propriétés du bois (Narayanamurti 1957 ; Rowe 1989 ; Hernandez 1989; Obataya et al 1999 ; Matsunaga 2000 ; Arevalo 2002etc.). Au regard de ces travaux, la densité, la résistance mécanique, la perméabilité, l'hygroscopicité, l'inflammabilité ainsi que les propriétés technologiques (l'usinage, le séchage, le collage, la finition etc.) du bois seraient ainsi fortement affectées par les extractibles.

A densité égale, les bois tropicaux présenteraient une meilleure stabilité dimensionnelle que les bois tempérés. Ceci serait lié aux fort taux d'extractibles des bois tropicaux par rapport aux bois tempérés (Choong et Achmadi 1991). Il faut rappeler que la teneur en extractibles varie à l'intérieur de l'arbre. Il est très faible dans l'aubier, maximum dans la zone de transition et diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche de la moelle (Imamura 1989, Nepveu 1994, Holmbolm 1999, Polman et al 1999, Gominho et al 2001). Cette variabilité de la teneur en extractibles dans l'arbre aurait un effet direct sur la variabilité de la stabilité dimensionnelle en fonction de la position radiale (Kuo and Arganbright 1980). A cause de sa forte teneur en extractibles, le duramen de certaines espèces contient moins d'eau que l'aubier (peu d'extraits bloquant les sites de sorption) et par conséquent le retrait volumique de l'aubier est significativement plus élevé que celui du duramen (Choong and Fogg 1989). En effet, la présence des extraits renforcerait notamment la stabilité du bois par la réduction de la sensibilité aux variations thermodynamiques de l'environnement, une réduction du retrait, de l'humidité d'équilibre et du point de saturation de la fibre. Elle affecte ainsi le comportement hygroscopique général du bois (Wangaard and Granados 1967; Stamm 1971; Skaar 1988; Hernández R. 1989; Mantanis *et al* 1995; Torelli *et al* 2006) et les espèces à haute teneur en extractibles se caractérisent par de faibles coefficients de rétractibilité. Le taux d'extractibles exerce un effet inversement proportionnel sur le PSF.

Stamm (1971) et Skaar (1988) rapportent que le domaine hygroscopique est affecté par les extraits qui peuvent se comporter, soit comme des entités hygroscopique et hydrophobique, soit comme des entités neutres. Wangaard et Granados (1967) constatent chez des espèces tropicales (Sangare (*Pterocarpus vernalis*), Mahogany (*Swietenia macrophylla*) *etc*), une variation de point de saturation de la fibre de l'ordre de 20,5 à 32,8 % avant extraction à 30,4 à 38,0 après extraction. Ils observent que les espèces présentant des valeurs élevées du point de saturation de la fibre après extraction avaient des valeurs initialement faibles avant extraction et vice versa. Hernandez (2007) a aussi trouvé une forte corrélation négative entre le point de saturation de la fibre et la fraction d'extraits soluble dans l'acétone ainsi qu'entre le point de saturation de la fibre et la densité du bois. Les extractibles agiraient comme charge ou agents de remplissage des pores et même de blocage des voies d'accès à l'intérieur des membranes et leur

présence dans les parois cellulaires limite le retrait et augmente ainsi la stabilité dimensionnelle du bois (Hernández 1989; Arévalo 2002).

L'influence des extraits sur le mouvement de l'eau dans le bois a été étudiée par Chen et Choong (1994). De ces travaux il ressort que l'élimination des extraits augmente le coefficient de diffusion et par conséquent augmente significativement le rythme de séchage. Les auteurs révèlent que cet état de fait est en partie tributaire des extraits solubles dans l'eau chaude. Hernandez (1989) trouve chez les bois tropicaux que les extraits solubles dans le méthanol et l'acétone ont un effet bénéfique sur la stabilité dimensionnelle. Il trouve qu'en général, les extraits solubles dans l'acétone seraient localisés principalement dans les parois cellulaires et réduiraient l'humidité d'équilibre du bois. Ces composés apparaissent comme directement responsables des variations de l'humidité d'équilibre de même que du gonflement radial tandis que les extraits solubles dans le cyclohexane ont très peu d'influence sur l'humidité d'équilibre du bois (Hernandez 2007a, 2007b).

Suite à une étude de l'influence des extraits sur la sorption et le retrait sur 60 espèces tropicales de l'Indonésie, Choong et Achmadi (1991) soulignent qu'à des humidités élevées, le bois extrait montre une humidité d'équilibre plus élevée comparativement au bois non extrait ; cependant, les isothermes de sorption et désorption des deux états du bois (extrait et non extrait) coïncident à l'humidité située au dessus de 70 %. Selon l'auteur, ce phénomène indique que l'hygroscopicité du bois à des humidités élevées est affectée par les extraits contenus dans les régions amorphes de la paroi cellulaire. L'élimination des extraits à l'eau chaude et aux solvants organiques augmente considérablement le retrait. Par contre, leur présence dans les échantillons testés entraîne du collapse partiel indiquant ainsi, selon l'auteur, une plastification des extraits lors du séchage à haute température et à une humidité élevée de la paroi cellulaire. Chafe (1987) rapporte que le phénomène de collapse est, positivement corrélé avec les extraits et négativement lié à la présence des polysaccharides des parois cellulaires mais qu'en revanche le retrait volumique est positivement relié aux polysaccharides et négativement corrélé à la lignine et aux extraits. Adamopoulos (2002) trouve que le retrait radial et tangential de *Robinia pseudoacacia L.* augmente respectivement de 29 % et 28 % après extraction à l'eau chaude.

Nzokou and Kamdem (2003) ont étudié l'influence des extraits sur la sorption d'humidité et la mouillabilité chez le bois de chêne rouge, de merisier et du pin. Selon ces travaux les échantillons extraits absorbent plus d'eau que ceux non extraits et l'angle de contact aussi diminue avec l'extraction accrue à l'eau chaude.

Venäläinen *et al* (2006) rapportent chez le mélèze de Sibérie (*Larix sibirica* Lebed.), un effet non significatif de l'extrait le plus abondant (l'arabinogalactan) sur la résistance à la pourriture mais trouve par contre qu'une concentration de ce dernier est positivement corrélée ($r=0,736$ $p = 0,002$) avec la capacité du bois à absorber de l'eau.

Nzokou *et al* (2006) rapportent que la décoloration du bois exposé à la lumière est peu significative après l'extraction aux solvants organiques, mais elle devient significative quand l'extraction aux solvants organique est suivie de l'extraction à l'eau chaude. Ces résultats confirment l'hypothèse que certains extraits contenus dans le bois agissent comme antioxydants et peuvent assurer une certaine protection des surfaces du matériau contre la dégradation liée la lumière.

Les dépôts chimiques, tels que les extraits, affectent considérablement la densité et la qualité finale du bois (Zobel and Buijtenen 1989). Jodin (1994) souligne qu'un taux d'extraits élevé contribue à gonfler les valeurs de la densité, ce qui a tendance à troubler les corrélations densité-propriétés mécaniques du bois. Thor (1964) trouve que la densité après extraction est de 2 à 20 % inférieure que celle avant extraction chez *Pinus virginiana*. Grabner *et al* (2005) observent sur des échantillons provenant de 100 mélèzes d'Europe une relation étroite entre la quantité de matières extractibles à l'eau chaude et la perte de densité due au processus d'extraction. Le contenu en matières extractibles élevé va de pair avec une densité plus élevée du bois. L'auteur trouve que la densité diminuait à la limite entre l'aubier et le duramen, mais que cette diminution n'était plus apparente après une extraction à l'eau chaude et l'acétone.

Du moment où ils sont présents dans la structure et affectent les propriétés hydriques du bois, les extraits pourraient donc, dans une certaine mesure, indirectement avoir une influence sur le comportement mécanique du bois.

Arevalo (2002) trouve sur des échantillons de bois d'acajou provenant du Pérou que les extraits affectent la compression tangentielle. Hernandez (2007) rapporte qu'en compression tangentielle et axial, les extractibles solubles dans le méthanol ont un effet

positif sur le coefficient de complaisance S11 et un effet négatif sur le coefficient de complaisance tangentiel S33. Par contre les extraits au cyclohexane et à l'acétone sont sans effets sur la variabilité de la résistance à la compression axiale. Chez le bois de mélèze, Grabner et al (2005) rapportent un effet significatif des extraits à l'eau chaude sur la compression transversale. Il conclut qu'une augmentation des extraits à l'eau va de paire avec une amélioration des performances mécaniques dans la direction transversale. Ajoung and Breese (1997) ont examiné l'influence des extraits résidant dans les lumens et dans la paroi cellulaire sur le comportement au fluage en compression axiale chez le bois d'*Azelia africana* Smith. Les résultats de ces travaux montrent qu'à court terme les extraits résidant dans les lumens des cellules n'ont pas d'effets significatifs sur le fluage, alors que l'élimination de ceux des parois cellulaires accentue et accélère le développement du fluage.

Quant aux propriétés acoustiques, Yano (1994) a trouvé, chez le thuya géant de Californie (*Thuja plicata* Donn. Ex. D. Don.), que le bois d'aubier qui contient peu d'extraits présentait un coefficient d'amortissement $\tan\delta$ plus élevé que le bois de duramen qui contient une quantité importante d'extractibles. Cependant, après extraction au méthanol, $\tan\delta$ augmente dans les deux types de bois. L'élimination des extractibles provoquerait une augmentation du coefficient d'amortissement du bois (Yano 1994 ; Yano et al 1995). Matsunaga et al (1996) trouvent qu'une teneur élevée des extraits conduit à réduire $\tan\delta$, confère de la plasticité et réduit ainsi la température de ramollissement du bois. L'auteur estime que la quantité des extraits, leur nature chimique et leur localisation dans la structure du bois ont des effets différents sur le facteur de perte $\tan\delta$. Selon Obataya (2000), la condition requise pour une excellente qualité sonore est un faible angle des microfibrilles de la paroi cellulaire. En effet, bien que le coefficient d'amortissement $\tan\delta$ puisse varier avec l'angle des microfibrilles, les extractibles seraient le facteur le plus significatif (Matsunaga et al 1999). En revanche, Obataya et al (1999) trouvent que les extraits solubles dans l'eau influencent les propriétés acoustiques chez *l'Arundo donax* L. L'extraction à l'eau, dont les composés solubles sont en majorité les sucres, contribuerait à accroître le module spécifique et le frottement intérieur $\tan\delta$. Bremaud (2006) a étudié sur du bois natif (éprouvette de 15x12x2 LxRxT) le taux et l'influence des composés secondaires sur les propriétés acoustiques (module d'élasticité spécifique et coefficient d'amortissement) du bois de vène du Sénégal et du Padouk du Cameroun. Ces travaux confirment le rôle majeur

qu'ont les extractibles sur le caractère moins amortissant et moins hygroscopique du bois des espèces *P. erinaceus* et *soyauxii*. Mais ils soulignent plus l'évidence de l'implication de la nature chimique du composé que la dimension strictement quantitative de la teneur globale en extractibles. Par exemple des faibles teneurs de 2 à 3 % sont capables déjà de diminuer significativement l'amortissement. Ce qui démontre une dépendance des caractéristiques physico-mécaniques des composés caractéristiques de l'espèce. Selon ces travaux, les composés les plus efficaces sur une réduction du coefficient d'amortissement, le sont moins sur la réduction de la teneur en eau d'équilibre et inversement. Cela traduirait un caractère plus ou moins hydrophile et la capacité à établir un réseau de liaisons faibles renforçant la matrice viscoélastique et/ou limitant le glissement moléculaire vis-à-vis des microfibrilles élastiques. Sur le vène, les extractibles les plus efficaces sur $\tan\delta$ comme sur l'humidité d'équilibre sont ceux solubles dans le méthanol et dans le dichloroéthane pendant que ceux solubles dans l'acétone le sont moins. Les rendements de l'extraction alcool-benzène (17,92 %) sont plus faibles que l'extraction au méthanol (20,46 %) et à l'acétone (20,05 %), ce qui peut être attribué à une plus courte durée d'extraction.

Cette étude montre aussi que la densité des deux bois est comparable si l'on retire les extractibles. L'auteur rapporte également que les feuillus tropicaux à taux d'extraits élevé ont des amortissements intrinsèques inférieurs d'un tiers en moyenne aux bois de la zone tempérée.

Certaines applications industrielles et mises en œuvre du bois sont le plus souvent significativement affectées par la présence des extractibles (Mark 1981). L'influence des extraits est soulignée sur la qualité du collage et de la finition. En effet, la migration des extraits en surface altère la qualité du collage et de la finition. Ils réduisent l'adhérence des produits de collage et de finition et, par conséquent, diminuent la performance mécanique des joints. Ils peuvent aussi retarder le séchage des couches de finition ou provoquer une décoloration des films de finition (Hse et Kuo 1988 ; Yoshimoto 1989 ; APA 1997). En revanche, certains extraits peuvent contribuer à améliorer la durabilité des surfaces finies (Yun Hse and Lin Kuo (1988) ; APA (1997)).

2.8 Conclusion

Au regard de ce parcours bibliographique, on peut conclure que le bois est un matériau d'origine biologique dont les propriétés physico-mécaniques sont extrêmement variables, selon la station, entre les espèces, dans une même espèce et à l'intérieur d'un même arbre. Mais cette variabilité est étroitement liée à la variation des propriétés structurelles et chimiques tant au niveau macroscopique que nanoscopique ; ce qui rend l'utilisation du bois très complexe. La connaissance de ces propriétés ainsi que la quantification de leur variabilité sont donc très importantes et même indispensables pour une valorisation rationnelle et adéquate du bois. Cependant, la quasi-totalité de ces travaux antérieurs ne portent que sur des bois des régions tempérées et tropicales humides. Ainsi, bien que les études sur le matériau bois soient nombreuses et diverses, bon nombre d'espèces tel que le *Pterocarpus erinaceus* des milieux tropicaux secs et semi-humides en Afrique de l'Ouest et en particulier au Mali sont encore très peu connues et restent par conséquent moins bien valorisées et très peu introduite dans les programmes de reboisement. Pourtant celles-ci retrouvent dans ces milieux les conditions favorables à leur développement.

2.9 Problématique et hypothèses de l'étude

Les aspects et problématiques de cette étude peuvent se résumer comme suite :

- la dynamique du *Pterocarpus erinaceus*, qui s'exprime par la distribution de la largeur de cerne, est complètement inconnu quelles que soient les conditions de croissance ; ce qui n'incite pas les forestiers à intégrer l'espèce dans les programmes de reboisement. Ce paramètre est d'autant plus important, qu'il permet une prédiction fiable des délais de rotation et des volumes maximum exploitables sans risque d'appauvrissement des peuplements reconstitués. Il reste aussi le seul moyen par le biais duquel les techniques sylvicoles peuvent influencer la qualité du bois en ce sens que les effets environnementaux ne se marquent pas directement sur les caractéristiques du bois mais qu'ils ne se manifestent qu'à travers leur impact sur la vitesse de croissance et par là sur les propriétés technologiques du matériau produit (Hebert *et al* 2002),

- l'absence d'une variabilité quantifiée de la qualité du bois selon la zone géographique ne favorise pas l'option d'une sylviculture qui voudrait intégrer la dimension qualité du bois afin de prendre en compte l'usage final du bois,

Les hypothèses et questions de recherche qui en résultent sont alors les suivantes:

- la dynamique et les caractéristiques structurelles du bois de *Pterocarpus erinaceus* Poir ainsi que les propriétés physico-mécaniques qui en résultent sont variables selon la zone climatique de provenance au Mali,
- La qualité du bois pour les emplois désirés varie en fonction de la structure anatomique et de la teneur en extractibles,
- la forte stabilité dimensionnelle du bois de *Pterocarpus erinaceus* est liée en partie à la nature et la teneur en extractibles.

2.10 Objectifs du travail

2.10.1 Objectif général

Vu l'intérêt que le vène suscite auprès des consommateurs locaux pour ses multiples usages, le présent travail est entrepris en vue de contribuer à une meilleure compréhension de la qualité du bois tant au niveau intraarbre qu'au niveau station ainsi que l'influence des facteurs de variation de qualité liées à l'anatomie et aux métabolites extractibles. En raison de la forte stabilité dimensionnelle de ce bois et l'intérêt qu'il suscite pour la facture d'instrument xylophone, un accent est mis sur la variabilité des propriétés acoustiques et le comportement hygroscopique à l'échelle microscopique en relation avec la nature des composés extractibles.

2.10.2 Objectifs spécifiques

Afin de vérifier les hypothèses et répondre aux questions de recherche ci-dessus mentionnées, le présent travail de recherche s'est fixé les objectifs spécifiques suivants :

- déterminer la variabilité des caractéristiques physico-mécaniques (le retrait, l'infradensité (densité basale), le module d'élasticité, la qualité acoustique pour la facture d'instrument xylophone) en relation avec la provenance et la position radiale dans l'arbre ;

- déterminer la variabilité des propriétés structurelles (l'accroissement annuel, les caractères anatomiques tant au niveau macroscopique que microscopique) et de la teneur en métabolites extractibles selon la provenance et la localisation radiale dans l'arbre ;
- déterminer l'influence de la structure anatomique et des métabolites extractibles sur les propriétés physiques et mécaniques du bois de vène ;
- déterminer à l'échelle des minuscules échantillons, l'influence de la nature des métabolites extractibles sur le comportement hygroscopique du bois de vène.

3 Matériel et méthode

3.1 Le milieu d'étude

3.1.1 . Aperçu sur le Mali

Le Mali se situe en Afrique de l'Ouest où il partage les frontières avec huit pays limitrophes (en occurrence le Sénégal, la Mauritanie, l'Algérie, le Niger, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et la Guinée) (figure 37). Il s'étend entre le 10^{ème} et le 25^{ème} degré de latitude Nord et entre le 4^{ème} degré de longitude Est et le 12^{ème} degré de longitude Ouest et couvre une superficie de 1 241 138 km² avec une population d'environ 11 000 000 d'habitants (Coulibaly 2003).

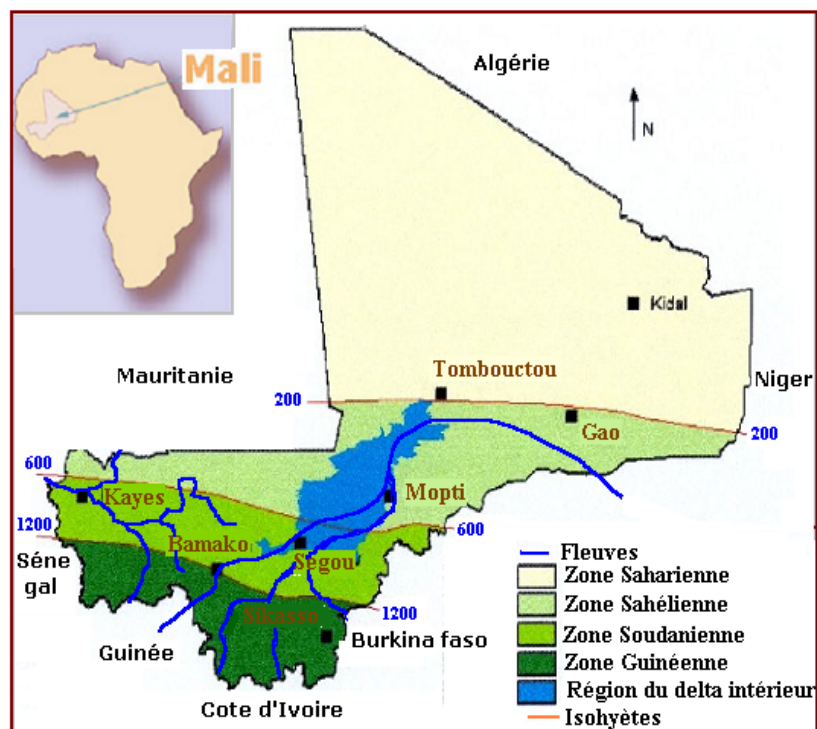


Figure 37. Carte du Mali : Zone bioclimatiques (construite à partir de Coulibaly 2003)

Sur le plan relief, le Pays de l'intérieur est assez vallonné et on distingue :

- Le plateau manding au sud-ouest (400 à 800 m) se terminant à l'ouest par les falaises du Tambaoura et les étendues de plaines de la Falémé et du Diourou qui se prolonge à son tour par le Kaarta.
- A l'est, les falaises de Bandiagara et le plateau dogon qui se jonchent depuis les basses terres du Macina jusqu'au mont Hombori

- Au nord et au nord-ouest, de grands ergs couvrent les plateaux et les plaines de la boucle du Niger. A l'extrême nord du pays, un manteau de sable succède aux plaines.

Sur le plan hydrographique, le pays est irrigué par deux grands fleuves et leurs affluents. Il s'agit du fleuve Sénégal long de 1800 km dont près de la moitié au Mali, et du fleuve Niger (4700 km dont 1780 km au Mali) qui est navigable sur 1308 km. Le Delta intérieur dans le Macina est inondé de septembre à décembre. Cette plaine de 20.000 km² devient, à la décrue, une immense prairie parsemée de lacs : lac Débo, lac Galado, lac Faguibine. Malgré les aléas climatiques, le Mali possède d'importantes ressources en eaux de surface et souterraines. Le réseau hydrographique comporte ainsi des bassins fluviaux du Niger qui s'étend sur 300 000 km² et du Sénégal à l'Ouest sur 155 000 km². Ces deux fleuves ont un potentiel d'écoulement annuel respectif de 46 milliards de m³ à Koulikoro et 10 milliards de m³ à Kayes (CNRST, 2000 ; MDRE, 2002).

Quant au climat, il varie peu d'Est en Ouest et les isohyètes ont la même direction générale que les parallèles géographiques. En revanche, la variation climatique est rapidement sensible sur l'axe Nord-Sud définissant ainsi quatre zones bioclimatiques : la zone saharienne, la zone sahélienne, la zone soudanienne et la zone guinéenne ou pré-guinéenne (figure 37) (Guy Neuvy, 1993).

3.1.2 . Caractéristiques de la zone d'étude

Au Mali deux principales zones climatiques sont favorables à une végétation pérenne : la zone guinéenne et la zone soudanienne. Cependant, les formations forestières dans ces régions sont souvent l'objet de mauvais traitements liés à l'action de l'homme tel que les feux de brousse, les pâtures et émondages etc.

3.1.2.1 La zone guinéenne

La zone guinéenne, située à l'extrême sud du pays, se caractérise par un niveau relativement élevé des précipitations, une saison sèche plus réduite et par un couvert végétal beaucoup plus fermé (Aubreville 1938). Cette région est caractérisée par des précipitations annuelles moyennes de 1100 à 1500 mm (FAO/SMIAR 2004). C'est la zone la plus humide du pays. La saison pluvieuse dure 6 à 7 mois et la température

moyenne annuelle est comprise entre 26 et 28°C (Nasi et Sabatier 1988). Les sols, essentiellement ferralitiques (ou ultisols PIRT 1983 figure 38), sont d'origine colluviale et alluviale ou colluvio-alluviale (Coulibaly 2003).

3.1.2.2 La zone soudanienne

Dans la zone soudanienne, on observe un changement de physionomie de la formation forestière qui se traduit par un couvert végétal de plus en plus ouvert en allant vers le nord. Dans ce domaine climatique, les formations naturelles se présentent sous forme de galeries forestières, de forêts denses sèches et de forêts claires (Nasi et Sebatier 1988). Au fur et à mesure que l'on monte en altitude, une mosaïque de forêts claires évolue vers une savane arborée où le besoin en terres cultivées devient plus important (Guy Neuvy 1993). La zone Soudanienne comprise entre les isohyètes 600 et 1100 mm est soumise à un climat de type subhumide à semi-aride. La saison pluvieuse est longue de 4 à 5 mois dans le Nord, et 5 à 6 mois dans le Sud. Les sols de types ferrugineux (alfisols PIRT 1983 figure 38) sont alluvionnaires à alluvio-colluvionnaires. Ils sont moyennement profonds à profonds, limoneux, limono-sableux à limono-argileux à fertilité naturelle moyenne,

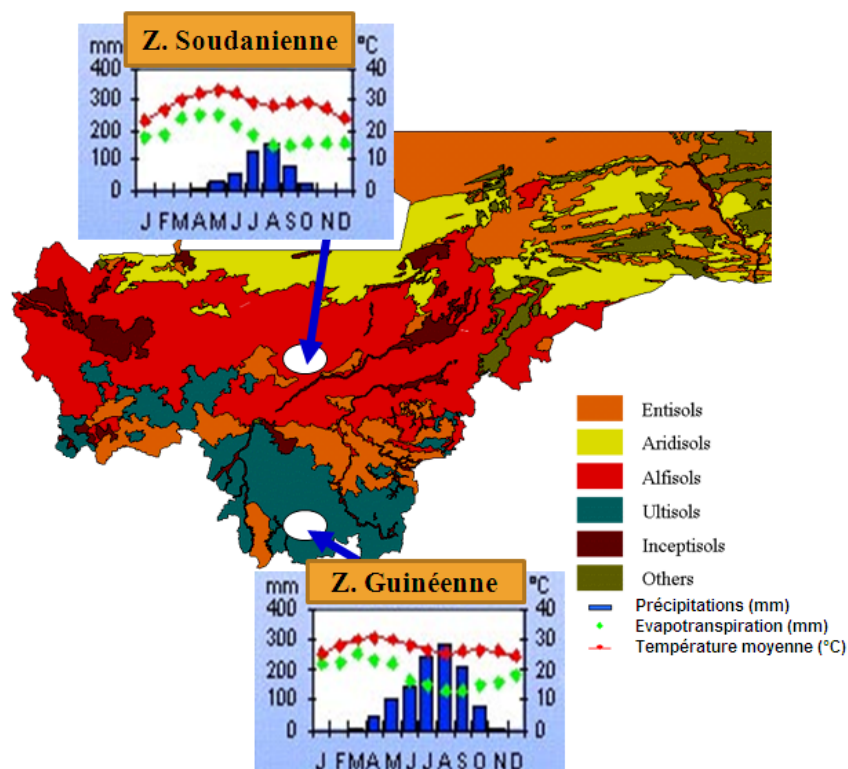


Figure 38. Carte des sols et profil météorologique proche (PIRT 1983; FAO)

3.2 Matériel expérimental

La technique de prélèvement du matériel expérimental adoptée dans ce travail correspond à celle prescrite par les normes française NF B51-003 et internationale ISO 3129. Celles-ci représentent les méthodes normalisées de prélèvement des échantillons de bois pour effectuer des essais de propriétés physico-mécaniques. La méthode implique l'abattage des arbres échantillonnés et leur transformation pour évaluer directement les propriétés du bois. Les arbres destinés à la présente étude proviennent des formations naturelles de la région climatique soudanienne et guinéenne du Mali. Un total de 5 arbres par région (dont un en réserve qui, par la suite, a été introduit dans les mesures) bien conformés, exempts de tout défaut d'altération externe et ayant atteint l'âge d'exploitation (diamètre à hauteur de poitrine (1,30 m), comprise entre 45 et 55 cm) (figure 39). Le diamètre maximum fixé à 55 cm s'explique par le fait qu'au delà de ce chiffre les individus présentaient de défauts importants au niveau du cœur (cadratures). En revanche le minimum a été fixé à 45 cm dans le souci de réduire le risque d'avoir une proportion importante de bois juvénile. Un total de 10 arbres a ainsi été prélevé à une hauteur de 0,5 m au dessus de l'empatement.



Figure 39. Mesure de la circonférence à hauteur de poitrine

Sur chaque individu un billon de 1,50 m de long a été découpé à partir du gros bout (figure 40). Cette longueur permet le passage du billon sur les appuis du chariot entraîneur de la scie à ruban. Chaque billon est alors caractérisé essentiellement par son diamètre et un numéro d'identification.



Figure 40. Découpe et transport des billons

Les billons ont été ensuite débités à la scie à ruban et à la tronçonneuse en plateaux de 40 cm d'épaisseur. Le débit est effectué sur quartier de manière à avoir un plateau central contenant la moelle et deux demi-plateaux symétriquement perpendiculaires à celui du centre (figure 41). Les plateaux ont été sciés dans la meilleure direction de manière à éviter la présence de défaut majeur.



Figure 41. Débit des plateaux

Les plateaux ont été d'abord soumis à deux mois de séchage naturel. Après ce premier séchage des plateaux longs de 50 cm ont été découpés à partir de la base. Ces derniers ont été ensuite empilés dans une caisse faite en panneau multiplis de 10 mm et expédiés par avion vers le LERMAB (à Nancy, France) où un nouveau séchage naturel sous abri a été appliqué.

En l'absence d'une délimitation précise de la zone de bois juvénile et adulte, il a été convenu de considérer sur le plateau trois secteurs dans la direction radiale : une zone proche de la moelle dite duramen interne (DI), une zone intermédiaire dite duramen médian (DM), une zone couvrant la zone de transition duramen-aubier dite duramen

externe (DE) et l'aubier (AU). Un bloc radial de 10 cm a d'abord été prélevé sur chaque plateau entier en vue de l'analyse de cerne. Trois barrettes radiales épaisses de 1,6 mm (L), larges de 2,5 mm (T) et longues de 400 à 500 mm (R) ont été prélevées sur chaque bloc radial. Chaque barrette a ensuite été découpée en deux à partir de la moelle ; ce qui permet d'obtenir des longueurs en direction radiale allant de 200 à 250 mm (selon le diamètre de l'arbre en question) convenables à la longueur de la cassette dans laquelle les barrettes seraient placées en vue de l'analyse microdensitométrique aux rayons X. Le reste du plateau central long d'environ 40 cm et les demi-plateaux ont été ensuite usinés et débités tangentiellement aux cernes de la moelle vers l'écorce en barreaux de $360 \times 15 \times 30 \text{ mm}^3$ (L×R×T) et de manière à avoir 2 barreaux par secteur (position de localisation radiale) sur chaque rayon. Ce mode de débit répond aux exigences de la norme ISO 3129. En raison de sa faible largeur, la portion d'aubier n'a pas permis l'obtention de barreaux de dimension suffisante pour les mesures des caractéristiques mécaniques et a été réservée pour l'analyse chimique et le comportement hygroscopique à l'échelle des minuscules échantillons du bois.

Au total, 240 barreaux (à raison de 80 barreaux par position de localisation radiale pour l'ensemble des arbres) ont été conditionnées en ambiance contrôlée à $65 \pm 5 \%$ d'humidité relative et $20 \pm 2^\circ \text{C}$ durant 4 semaines afin d'homogénéiser le taux d'humidité à 12 %. Dans le but de suivre l'évolution de l'humidité du bois dans la chambre climatisée, des contrôles d'humidité par pesée ont été effectués toutes les semaines sur des échantillons témoins insérés parmi les barreaux. Mais afin de les maintenir au taux d'humidité de 12 % durant la période des essais mécaniques, les barreaux ont été conservés dans des sachets plastiques et l'essai a été réalisé dans une salle où les conditions atmosphériques sont presque similaires à celles de la chambre climatisée (température de 20°C pour une humidité relative de 65 %). A l'issue des essais mécanique, on a procédé à la mesure des caractéristiques physiques sur des échantillons issus des mêmes barreaux ainsi qu'à l'analyse qualitative et quantitative de la structure anatomique et à l'analyse quantitative des extraits. Cependant, l'influence de la nature des extraits sur le comportement hygroscopique du bois de vène n'a été testée que sur le DE issus des spécimens de la région climatique guinéenne (en raison de la plus forte teneur en extrait). La figure 42 résume le protocole général d'échantillonnage.

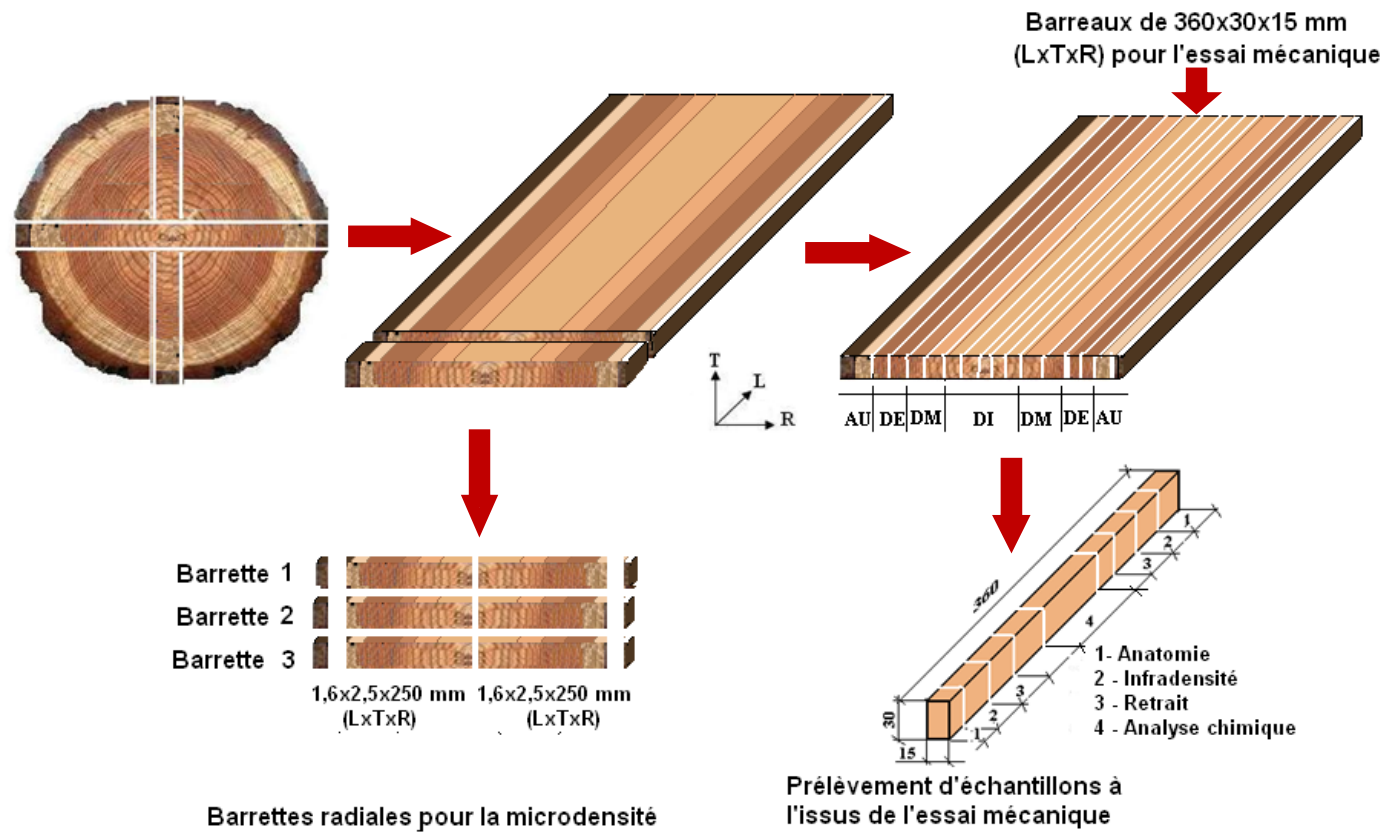


Figure 42. Schéma du Protocole de prélèvement du matériel expérimental

3.3 Méthodes d'études

Les objectifs du présent travail peuvent être regroupés en 3 volets. Le premier volet vise à mettre en évidence l'impact de la variabilité structurelle et chimique sur les propriétés physiques et mécaniques du bois. Il a ainsi consisté à déterminer dans un premier temps la variabilité des caractéristiques physiques et mécaniques sur des barreaux longs de $360 \times 30 \times 15 \text{ mm}^3$ et par la suite à déterminer sur des éprouvettes issus des mêmes barreaux, les caractères anatomiques et le taux des extraits. La qualité du bois étant définie par son adéquation à l'usage désiré, les critères de qualité du bois de vène sont celles qui définissent ses principaux usages (l'ameublement, la menuiserie, la fabrication des xylophones); il s'agit entre autres du retrait, de la densité et des propriétés mécaniques en occurrence le module d'élasticité et les caractéristiques acoustiques (le module spécifique et le coefficient d'amortissement). Le second volet des objectifs vise à déterminer par analyse des cernes la variabilité de l'accroissement annuel et des composantes densitométriques du bois de vène aussi bien selon la provenance que dans l'arbre. Quant au troisième volet, il a consisté à mettre en évidence l'influence de la nature des composés extractibles sur le comportement hygroscopique du bois.

3.3.1 Mesure des caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques ont été déterminées selon la technique de la vibration libre sur poutres flottantes par usage du dispositif appelé « Bing » (figure 43). Ce dispositif a été développé au CIRAD de Montpellier pour la caractérisation de routine du module d'élasticité longitudinal et des propriétés acoustique du bois. Son principe repose sur l'acquisition et l'analyse du spectre des fréquences propres de vibration (Figure 44 et 45) suite à la soumission du barreau de bois à un mouvement périodique non entretenue en vue de déterminer les fréquences propres, le module d'élasticité, le module spécifique et le coefficient d'amortissement $\tan \delta$, le dispositif se compose d'un filtre amplificateur, d'un support-échantillon, d'un microphone, d'un convertisseur de signal analogique en signal numérique, d'un maillet et d'un PC de traitement et d'acquisition des données.

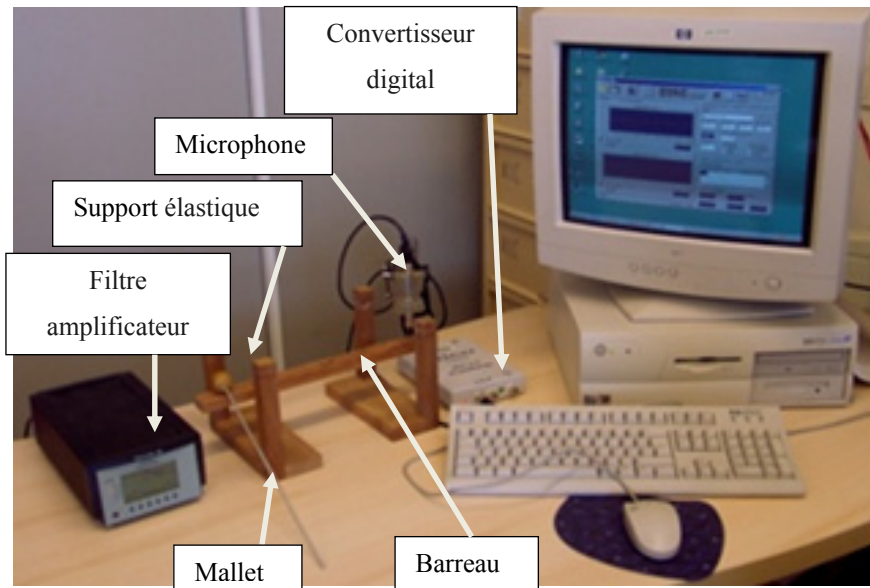


Figure 43. Dispositif du Bing

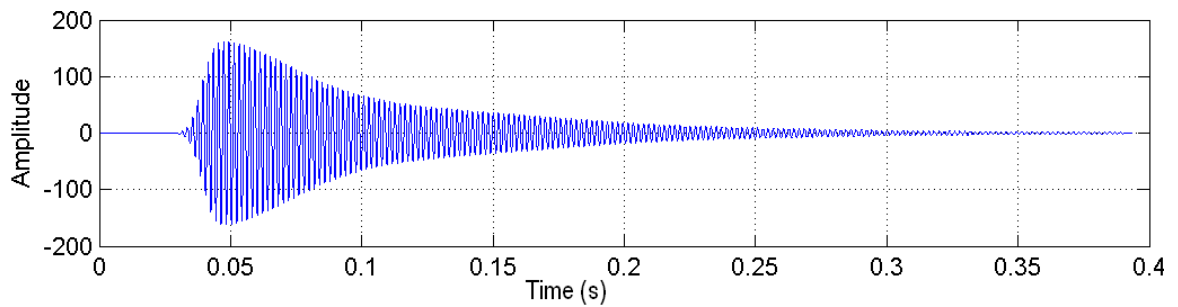


Figure 44. Magnitude de la transformée de Fourier

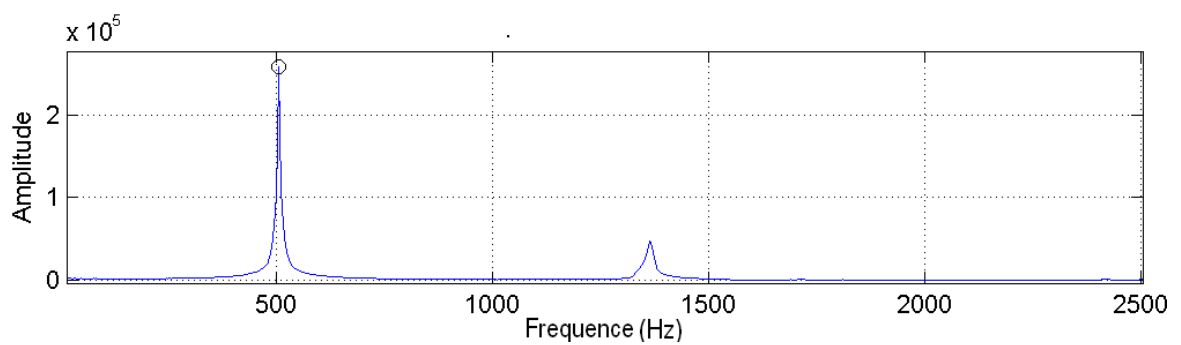


Figure 45. Signal analytique associé aux modes de frequence

Le mode opératoire se divise en 3 principales phases : la détermination de la masse volumique, la détermination du module d'élasticité et du module spécifique et la détermination du coefficient d'amortissement.

3.3.1.1 Détermination de la masse volumique

La masse volumique, simple à déterminer, est fréquemment considérée comme le critère le plus important lors de l'appréciation des propriétés mécaniques d'une essence (Nepveu, 1994). La détermination de la masse volumique de l'éprouvette est d'autant plus importante qu'elle intervient dans la mesure des fréquences propres et le calcul du module d'élasticité. Elle est déterminée par le rapport entre la masse et le volume de l'éprouvette et exprimée en kilogramme par mètre cube (kg/m^3). La masse de l'éprouvette (barreau) est déterminée sur une balance de résolution 0.01g (Marque Mettler, modèle PM2000) et les dimensions permettant de calculer son volume sont mesurées avec une précision ± 0.02 mm à l'aide du pied à coulisse de marque « Mitutoyo » modèle « DIGIMATIC ABSOLU » muni d'une sortie digitale des données (figure 46). Les mesures de largeur et d'épaisseur sont faites en 3 points différents le long de l'éprouvette, tandis que la longueur est mesurée une seule fois avec une règle millimétrée.

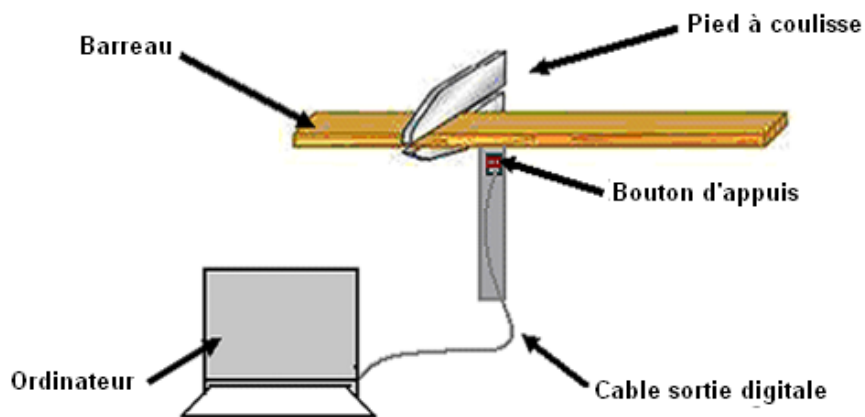


Figure 46. Schéma de mesure des dimensions de l'échantillon

3.3.1.2 Détermination du module d'élasticité et du module spécifique

- Après la détermination de la masse volumique, l'éprouvette est suspendu sur ses deux extrémités par deux supports élastiques très fin et mise en vibration de flexion par percussion sur l'une des extrémités de l'éprouvette, en prenant soin que l'impulsion soit bien verticale,
- Le microphone placé à l'autre extrémité, enregistre les variations de pression,

- Le signal électrique résultant est ensuite amplifié et filtré, puis échantillonné et enregistré sur un PC via le convertisseur de signal analogique en signal numérique ;
- Une transformée rapide de fourrier (fast fourrier transform - FFT) du signal est effectuée pour la détermination des fréquences propres ;
- Une interface permet de visualiser sur l'écran de l'ordinateur les pics correspondant aux fréquences propres et de les sélectionner.
- Un programme écrit en Matlab permet de déterminer et de sauvegarder les modules d'élasticité à partir des fréquences propres, des masses et des dimensions (précédemment enregistrées) suivant le modèle théorique de Bernoulli par l'expression ci-dessous. Dans le cadre du présent travail seul le premier mode de fréquence a été considéré en raison de son énergie élevée pour déterminer le module d'élasticité.

$$f_1 = \frac{3,56}{L^2} \sqrt{\frac{IE_L}{S\rho}} \quad \text{Équation 22}$$

Où S est la section du barreau, ρ est la masse volumique du barreau (à 12 % d'humidité), I est le moment d'inertie et L est la longueur du barreau. Les données sauvegardées pour chaque essai comprennent ainsi: la masse, les dimensions, la masse volumique, la fréquence propre, le module d'élasticité et l'amortissement temporel associé à la fréquence propre.

- Le module spécifique est alors déterminé par le rapport du module d'élasticité à la masse volumique.

3.3.1.3 Détermination du coefficient d'amortissement

Le signal sonore émis suite à la vibration de la barre est décrit comme la somme de composants élémentaires de signaux monochromatiques exponentiellement amortis (Aramakia *et al* 2007)

$$S(x, t) = \theta(t) \sum_{n=1}^N A_n(x) \sin(\omega_n t) e^{-\alpha_n t} \quad \text{Équation 23}$$

Où N est le nombre de composants élémentaire de signaux, $\theta(t)$ est la fonction de Heaviside, A_n est l'amplitude, ω_n est la pulsation et α_n est l'amortissement temporel associé au $n^{\text{ième}}$ composant.

Ainsi, l'utilisation combinée de la synthèse additive du modèle décrit par Aramkia *et al* (2007) et la synthèse de guide d'ondes permet de déterminer le coefficient de frottement interne ($\tan \delta$) via l'amortissement temporel α_1 associé au premier mode de fréquence propre par la relation :

$$\tan \delta = \frac{\alpha_1}{\pi f_1} \quad \text{Équation 24}$$

Où α_1 est l'amortissement temporel associé au premier mode de fréquence f_1

3.3.2 Mesure de l'infradensité

Par définition l'infradensité est le rapport de la masse à l'état anhydre au volume à l'état saturé d'une éprouvette de bois donnée. La méthode de mesure de l'infradensité adoptée dans le présent travail est celle décrite par la norme française et internationale (NF B51 005, et ISO 3131). L'essai a consisté à déterminer le volume à l'état saturé et la masse à l'état anhydre de l'échantillon de $15 \times 30 \times 20$ prélevé sur les barreaux à l'issue des essais mécaniques comme le montre la figure 42. La détermination du volume à l'état saturé fait ici référence à la loi d'Archimède (figure 47) selon laquelle la différence entre le poids d'un échantillon suspendu dans l'eau et le poids de l'eau, est égale au volume d'eau déplacé multiplié par la masse volumique de l'eau. Cette méthode a surtout l'avantage d'être simple, pratique et moins onéreuse. Elle permet de déterminer le volume quelle que soit la forme géométrique d'un échantillon de bois, pourvu qu'il soit au préalable saturé d'eau.

3.3.2.1 Appareillage

L'appareillage est simple (figure 47). Il se compose essentiellement :

- d'un dispositif de saturation composé d'une pompe à vide raccordée à une cloche et dont l'objectif est de permettre la saturation de l'échantillon.

- d'une balance de précision à 0,001 g près (1).
- d'un b cher rempli au 2/3 par de l'eau glacée (2).
- d'un bras horizontal mobile en hauteur (3) et fixée sur une tige verticale (4) permettant de suspendre l'échantillon.
- d'une pointe métallique (5) destinée à retenir l'échantillon en suspension dans l'eau.

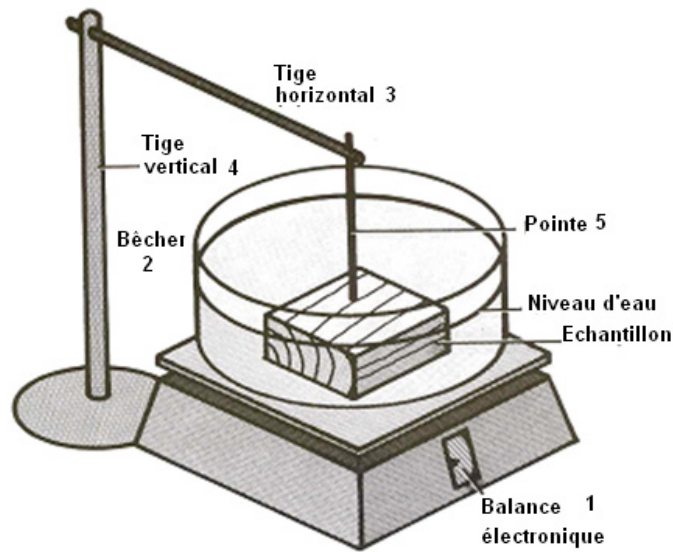


Figure 47. Dispositif de la pesée hydrostatique (Bowyer et al 2007)

3.3.2.2 Mode opératoire

- Premièrement les échantillons ont été introduits dans un b cher d'eau glacée de manière à ce que chaque échantillon soit entièrement immergé. L'ensemble a été soumis à un cycle de vide et pression en vue d'éliminer l'air contenu dans le bois et d'accélérer ainsi le processus de saturation. L'usage de l'eau glacée a pour objet d'éviter une dissolution importante des extractibles durant la saturation ;
- La pointe métallique a d'abord été suspendue à vide dans l'eau contenue dans le b cher (rempli au 2/3) puis l'ensemble a été posé sur la balance et taré   zéro,
- L'échantillon saturé a été ensuite porté sur la pointe puis immergé dans l'eau contenue dans le b cher,

- Le chiffre indiqué sur la balance donne la masse d'eau déplacée par l'échantillon. Ce qui correspond au volume de l'échantillon (V_s),
- Les éprouvettes sont ensuite déshydratées en étuve à 103 °C en vue de déterminer la masse à l'état anhydre M_o ,
- L'infradensité a par la suite été exprimée par l'expression de la masse anhydre de l'éprouvette à son volume à l'état saturé.

3.3.3 Mesure du retrait à l'échelle macroscopique

Dans le présent travail, l'essai de retrait macroscopique a consisté à mesurer au pied à coulisse (de marque « Mitutoyo » modèle « DIGIMATIC ABSOLU » précise à ± 0.02 mm près) les dimensions radiale tangentielle et axiale d'échantillons de $15 \times 30 \times 20$ mm³ (R×T×L) à l'état saturé et anhydre respectivement. Ces échantillons ont été prélevés sur les barreaux à l'issus de l'essai mécanique (figure 42).

3.3.3.1 Mode opératoire

- Les échantillons ont été saturés selon le même principe que la mesure de l'infradensité;
- Les échantillons ont été considérés saturés lorsqu'ils ne flottaient plus et quand la différence entre deux mesures successives du volume ne dépassait pas 0,02 mm³ (NF B51-006);
- Les dimensions des échantillons ont été mesurées au pied à coulisse en longitudinal, radial et tangentiel suivant un repère matérialisé par le point d'intersection des deux droites diagonales de la section correspondante ;
- Les échantillons ont ensuite été amenés à l'état anhydre par dessiccation à l'étuve ventilée à 103 °C durant 48 heures. Ils ont été considérés anhydres lorsque la variation de masse entre deux pesées successives effectuées à 4 heures d'intervalle était inférieure ou égale à 0,5 % (NF B51-004).

- Immédiatement après la sortie de l'étuve, les échantillons ont été refroidis dans un dessiccateur et les dimensions de l'éprouvette ont à nouveau été mesurées. Les retraits linéaires sont alors déterminés par les expressions suivantes:

$$\beta_t(\%) = \frac{T_s - T_0}{T_s} \times 100 \quad \text{Équation 25}$$

$$\beta_r(\%) = \frac{R_s - R_0}{R_s} \times 100 \quad \text{Équation 26}$$

$$\beta_l(\%) = \frac{L_s - L_0}{L_s} \times 100 \quad \text{Équation 27}$$

Où β_t , β_r , β_l sont respectivement le retrait tangentiel, radial et longitudinal ; T_s , R_s , L_s sont respectivement les dimensions à l'état saturé exprimées en mm dans la direction tangentielle, radiale et longitudinale de l'éprouvette tandis que T_0 , R_0 , L_0 sont respectivement les dimensions à l'état anhydre exprimées en mm dans la direction tangentielle, radiale et longitudinale.

Mais en raison des valeurs très faibles en direction longitudinale (0,3 % à 0,5 %), le retrait dans cette direction a été négligé et le retrait volumique β_v a ainsi été déterminé comme étant la somme du retrait tangentiel et radial.

$$\beta_v(\%) = \beta_t(\%) + \beta_r(\%) \quad \text{Équation 28}$$

Quant à l'anisotropie du retrait qui est l'un des paramètres important pour évaluer la stabilité dimensionnelle du bois, elle a été déterminée par le rapport du retrait tangentiel au retrait radial β_t / β_r .

3.3.4 Analyse de cerne

Dans le cadre du présent travail l'analyse de cerne a été effectuée suivant deux objectifs. Le premier objectif vise à déterminer l'accroissement annuel et les variations locales de densité de cerne après cerne et le deuxième objectif vise à déterminer la largeur de cerne en relation avec les propriétés physico-mécaniques. Dans le premier cas, l'analyse est effectuée par observation à la loupe et par usage des rayons X. Quant au second cas, la

largeur moyenne de cernes est déterminée sur chaque barreau comme étant le quotient de deux fois la largeur du barreau par le nombre total de cernes comptés sur les deux faces transversales.

3.3.4.1 Analyse des cernes par observation à la loupe

Le dispositif utilisé (figure 48) comprend une loupe binoculaire connectée à une caméra et un ordinateur. L'analyse est effectuée par comptage et mesure des largeurs de cerne sur les deux rayons opposés du barreau radial. Pour cela, la section transversale des barreaux est soumise à un long ponçage successif avec du papier sable aux grains progressivement fin (120, 240, 320, 600, 1200 etc.). Cette opération a pour but de rendre visible les limites de cernes. Une règle graduée, placée sur la section transversale (perpendiculairement aux cernes), permet de déterminer aisément sous la loupe et sur l'écran du PC les limites et la largeur des cernes (figure 48). L'accroissement moyen de l'individu est établi sur l'ensemble des cernes comptés depuis la moelle vers l'écorce.

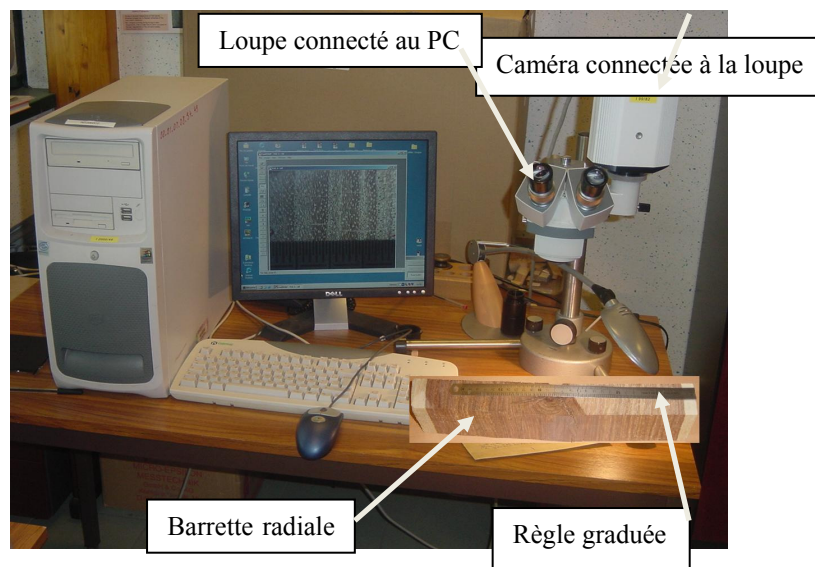


Figure 48. Dispositif de d'analyse de cerne

3.3.4.2 Analyse des cernes par microdensitométrie

La microdensitométrie est une technique d'analyse de cerne basée sur la radiographie de barrette d'épaisseur uniforme. Elle permet de quantifier les variations locale de densité cerne après cerne. L'appareil utilisé dans le présent travail est l'analyseur de cerne QTRS-01X (figure 49) qui fonctionne par la mesure de l'atténuation des rayons passant à travers l'échantillon. Son principe repose sur le fait que l'absorption des rayons X par

une couche de bois d'épaisseur uniforme ne dépend que de sa densité étant donné que le poids atomique des éléments constitutifs du bois est relativement constant. Des barrettes radiales épaisses de 1,6 mm, large de 2,5 mm et long de 200 à 250mm ont été soigneusement découpées du barreau radial à l'issus de l'analyse des cernes à la loupe (à raison de 3 barrettes par barreau) puis conditionnées à 12 %. La barrette a été ensuite placée dans une cassette et l'ensemble a été introduit dans l'analyseur. Un ordinateur relié à l'analyseur permet à l'opérateur d'introduire d'abord les paramètres de la barrette (épaisseur, masse, densité, longueur etc.) et puis de lancer l'opération. La cassette alors animée par un mouvement de translation se déplace lentement devant le faisceau lumineux du rayon X. Le profil de radiographie et le profil densitométrique issus de l'absorption des rayons X permettent à l'opérateur d'ajuster les limites de cerne. Les données collectées par le PC se composent essentiellement de la largeur de cerne, de la proportion du bois final, de la densité du bois initial, de la densité du bois final et de la densité moyenne de cerne.

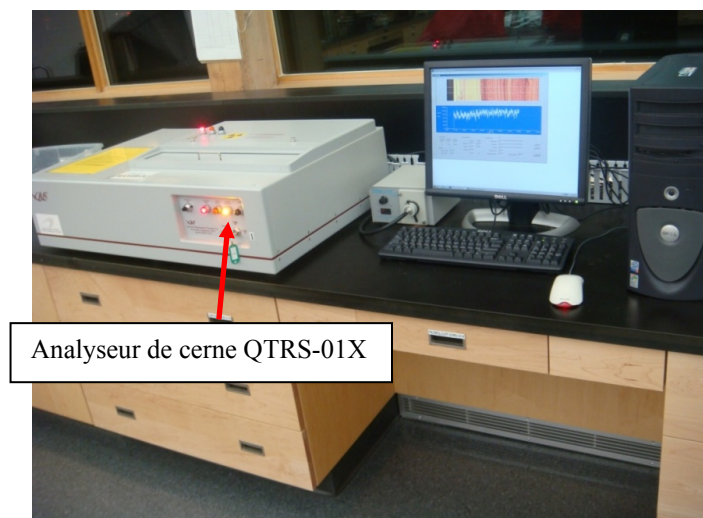


Figure 49. Microdensitométrie à l'aide de l'analyseur de cerne QTRS-01X

3.3.5 Etudes anatomique du bois de vène

La caractérisation anatomique a été effectuée à l'issu des essais mécaniques. Ainsi, dans chaque secteur de l'arbre, trois barreaux représentatifs ont été sélectionnés sur la base des valeurs de module d'élasticité (qui est fortement corrélé avec la densité, le module spécifique et le coefficient d'amortissement) de manière à couvrir la plage de variabilité des caractères anatomiques de chaque secteur: un barreau présentant la valeur de module d'élasticité la plus élevée, un barreau présentant la valeur de module d'élasticité

la plus faible et un barreau présentant la valeur de module d'élasticité la plus proche possible de la valeur moyenne du secteur en question. Deux échantillons de $20 \times 20 \times 15$ mm³ (L×T×R) correspondant aux 3 principaux plans d'observation (transversale, radiale et tangentielle) ont été prélevés sur chacun des 3 barreaux (comme indiqué sur le schéma du protocole de prélèvement du matériel expérimental (figure 42)). L'analyse anatomique a été effectuée sur chacun des échantillons et la valeur moyenne a été considérée comme la vraie valeur du secteur. Un total de 90 échantillons par provenance a été ainsi découpé et répertorié en fonction de la localisation radiale: secteur I-proche de la moelle (Duramen interne DI) ; secteur II-zone médiane (duramen médian DM) et secteur III-zone externe (duramen externe DE). Dans un premier temps, il a été procédé à une description macroscopique et dans un second temps à l'analyse qualitative et quantitative de la structure microscopique puis à la description anatomique générale du bois de vène. L'analyse qualitative et quantitative a été établie sur la base de la valeur moyenne obtenue par secteur sur l'ensemble des arbres selon la provenance. Ceci a permis de mettre clairement en évidence les variations de structure liées à la provenance et à la position radiale de localisation sur l'ensemble des arbres. Quant à la description générale, elle a été effectuée sur la base de la moyenne des trois secteurs sur l'ensemble des 10 arbres.

3.3.5.1 Études macroscopiques

Pour la caractérisation macroscopiques les coupes ont été bien poncées afin d'obtenir un bon état de surface. Les observations ont été effectuées à l'œil nu et à la loupe avec un grossissement de 10 x.

3.3.5.2 Études microscopiques

A l'issue de la description macroscopique, les échantillons de $20 \times 20 \times 15$ mm³ (L×T×R) ainsi issus des barreaux ayant servi à la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques ont été d'abord ramollis. Et compte tenu de la densité relativement élevée de ce bois (environ 0,9) nous avons, après plusieurs tentatives sans succès de ramollissement par la méthode standard, recouru à une méthode de ramollissement appropriée pour les bois durs décrite par Kukachka (1976). Ainsi, après ramollissement, une lamelle de 15-20 μm a été découpée sur chacun des 3 échantillons à l'aide d'un microtome suivant les trois principaux plans d'observation (transversal RT, radial LR et

tangentiel LT). Les coupes ont été blanchies à l'eau de javel puis rincées à l'eau distillée. Elles ont été ensuite colorées à la safranine, rincées à l'eau distillée et déshydraté à l'alcool éthylique (à concentration croissante de 50 %, 80 % et 100 %) et au toluène pur. Le montage a été effectué à l'aide du permount sur des lamelles et séché pendant 48 heures. La description du plan ligneux effectué conformément à IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification (1996) a été couplée avec l'analyse qualitative et quantitative de la structure anatomique.

3.3.5.2.1. Analyse qualitative de la structure anatomique

L'analyse qualitative a consisté à préciser les dimensions des éléments constitutifs à l'aide du microscope en éclairage à transmission. Il a principalement porté sur, la longueur, l'épaisseur et le diamètre des lumens des fibres, la longueur et le diamètre tangentiel des vaisseaux ainsi que la hauteur des rayons.

La mesure du diamètre tangentiel des vaisseaux a été effectuée sur un total de 50 vaisseaux par coupe microscopique alors qu'un total de 50 fibres par coupe ont fait l'objet de mesure de l'épaisseur et du diamètre des lumens. Ainsi, 150 mesures de vaisseaux, d'épaisseur et de lumens de fibres ont été effectuées sur chacune des positions de localisation radiale sur chaque arbre. La hauteur des rayons a été mesurée en section tangentielle le long de l'axe vertical du rayon sur un nombre total de 50 rayons par coupe ; c'est-à-dire 150 mesures par secteur de l'arbre.

Quant à la longueur des fibres et des vaisseaux, leur mensuration a été effectuée au moyen du logiciel WinCELL après macération à chaud des petits éclipses de bois par la méthode de Franklin. La méthode Franklin consiste à faire macérer des petites éclipses de bois dans une solution à parts égales (en volume) de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) (à 20 % en volume) et d'acide acétique pur cristallisable (CH_3COOH). L'ensemble (solution et éclisses) a été porté à ébullition dans un condenseur Liebig. Le traitement se poursuit jusqu'à ce que les cubes de bois deviennent blanchâtres. Les éclipses sont ensuite lavées et bien rincées à l'eau distillée. Des éclisses sont déposées sur une lamelle et les éléments sont séparés soigneusement à l'aide de pincettes. Des images microscopiques ont d'abord été capturées au moyen d'une caméra associée à un PC et à un logiciel d'acquisition d'image dite « Pixeling ». Le traitement d'image a été réalisé à l'aide du logiciel de traitement d'image Adobe Photoshop Elements 2.0. La mesure

a été effectuée sur un total de 50 fibres et 50 vaisseaux par image (soit 150 mesures par secteur).

3.3.5.2.2. Analyse quantitative de la structure anatomique

L'analyse quantitative a porté essentiellement sur le nombre de vaisseaux par mm^2 , la proportion des fibres, des vaisseaux et du parenchyme axial et le nombre de rayon/mm.

La mesure du nombre de vaisseaux par mm^2 a été basée sur le comptage individuel de tous les vaisseaux par unité de surface. Dans ce contexte des vaisseaux par exemple accolés radialement en 4 sont comptés comme 4 vaisseaux. Pour la répétition, 10 unités de surface par coupe (champs entiers vus par l'objectif du microscope avec un grossissement 100x) ont été examinées. Ce qui fait en tout 30 unités de surface par secteur dans l'arbre. Le nombre de rayon par mm a été déterminé en section tangentielle par comptage des rayons le long d'une ligne perpendiculaire à l'axe du rayon (à raison de 10 lignes par coupe). Quant à la proportion des fibres, des vaisseaux et du parenchyme axial, elle a été déterminée en section transversale. Pour cela, des images microscopiques ont été d'abord capturées au moyen d'une caméra associée à un PC et au logiciel d'acquisition d'image « Pixeling ». Un traitement d'image préalable a été réalisé à l'aide du logiciel de traitement d'image Adobe Photoshop (Elements 2.0.) puis, en utilisant un logiciel d'analyse d'image nommé WinCELL (WinCELL pro 2004a), chacun des tissus a d'abord été isolé par une coloration bien distincte et en suite la proportion de chaque tissu a été définie comme étant la fraction de surface qu'elle occupe par rapport à la surface totale analysée.

3.3.6 La teneur en extractibles du bois de vène

La quantification des extraits a été effectuée à l'issue des essais mécaniques par extraction consécutives conformément à la norme ASTM D1105 (1996) sur du matériel broyé issu de quatre positions radiales dans l'arbre : le duramen interne (DI), le duramen médian (DM), le duramen externe (DE) et l'aubier (AU). Comme l'analyse anatomique, des échantillons de $150 \times 30 \times 15$ mm ont été découpés sur chacun des barreaux ayant présenté la valeur la plus élevée, la valeur la plus proche de la valeur moyenne du module d'élasticité et la valeur la plus faible de module d'élasticité. Les échantillons ont d'abord été réduits en lamelles de 2 mm d'épaisseur, 2 cm de largeur et 5 à 8 cm de long à l'aide d'une scie à ruban afin d'éviter un éventuel surchauffe de la

machine à broyer lors du broyage. Les lamelles ont été ensuite réduites en état de sciure à l'aide de la machine à broyer. Un triage a été ensuite effectué à l'aide d'un tamis à secousse afin d'obtenir des fractions de sciure fine de 40 mesh (425 microns). Ce qui correspond aux exigences de la norme ASTM D1105 (1996) en termes de granulométrie pour quantifier le taux d'extrait du bois. Les extractibles ont été quantifiée par extraction totale selon la norme ASTM D1105 (1996) sur chacun des échantillons et la valeur moyenne à été considéré comme la vrai valeur du secteur dans le duramen de l'arbre. Les extractibles de la portion d'aubier correspondant à chaque arbre ont aussi été quantifiées. L'extraction totale a consisté à extraire la sciure en 3 étapes consécutives; d'abord à l'éthanol-toluène durant 6 heures puis à l'éthanol à 95 % durant 4 heures et ensuite à l'eau chaude durant 3 heures. La somme des taux obtenu après chaque étape est le taux de l'extraction totale. Le mélange éthanol-toluène est obtenu par un rapport de 1000 ml d'éthanol pour 427 ml de toluène correspondant ainsi au niveau azéotrope de ce mélange.

Comme tout autre solvant organique l'extraction selon la norme ASTM D1105 (1996) exige l'usage du soxhlet (figure 50a). Cet appareil en verre est composé d'un système de réfrigérant à reflux et d'un système de siphonage. Une cartouche contenant 5 g de sciure est placée dans le soxhlet. Ce dernier est placé sur un ballon contenant 150 ml du solvant ; la masse du ballon à l'état vide ayant été au préalable déterminée. L'ensemble placé sous la hotte est ensuite porté à ébullition à 60°C. Le principe repose sur l'action d'une force motrice liée à la différence de concentration entre les extractibles dans la sciure et le solvant. Ainsi, sous l'effet de la chaleur le solvant s'évapore du ballon puis se condense au niveau du réfrigérant à reflux et tombe à compte goutte sur la sciure engageant aussitôt un équilibre de niveau de solvant liquide avec le siphon. La dernière goutte, qui va rompre cet équilibre, entraîne automatiquement vers le ballon tout le solvant avec les extraits dissous. Le solvant, qui est de nouveau redevenu pur par évaporation, se condense une nouvelle fois au niveau du réfrigérant et le cycle recommence. La durée de l'opération a été de 6 heures pour le mélange éthanol-toluène et 4 heures pour l'éthanol à 95 % à compter du premier siphonage. Ce dernier est réalisé toutes les 15 minutes pendant toute la durée de l'opération de manière à régulariser l'extraction. A la fin de l'opération, le ballon contenant les extraits dissous dans le solvant est placé dans un évaporateur rotatif sous vide (figure 50b). Le solvant est ainsi évaporé et les extraits restent collés sur la paroi interne du ballon. Après

passage du ballon à l'étuve durant 24 heures suivi de 20 minutes de refroidissement dans le dessiccateur, la masse du ballon avec extraits est déterminée. Ainsi, connaissant la masse du ballon vide et celle avec les extraits, il est possible de calculer la masse des extraits ainsi que leur taux par rapport à la masse de (5 g) de sciure anhydre du départ.

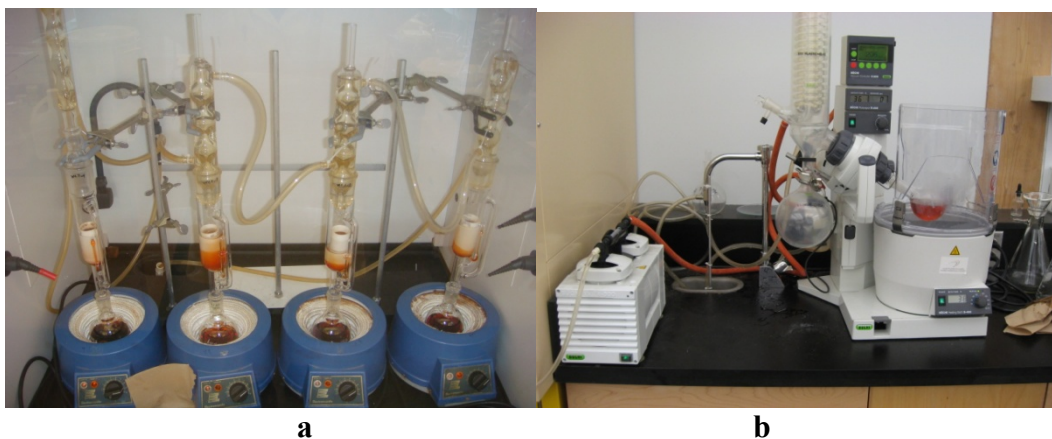


Figure 50. Extraction à l'éthanol-toluène : a) dispositif du soxhlet, b) évaporateur rotatif sous vide

Quant à l'extraction à l'eau chaude, elle a pour objet de dissoudre les produits solubles dans l'eau ; il s'agit en principe de certains tannins et matières colorantes et des sucres du bois. Deux grammes de sciure sèche issus de celles extraites précédemment (à l'éthanol-toluène suivie de l'éthanol à 95%) sont portés à ébullition dans un ballon contenant 100 ml d'eau distillée. Le ballon relié à un réfrigérant à reflux est disposé sur un chauffe-ballon. Au bout de 3 heures d'extraction, le contenu du ballon est filtré sur un creuset de porosité « C » préalablement étuvé et taré à vide. Après lavage de la sciure avec au moins 600 ml d'eau bouillante, le creuset contenant la sciure est placé dans l'étuve à 102 °C pendant 24 heures. Le taux d'extrait est déterminé par la différence de masse avant et après extraction rapporté à la masse anhydre de sciure.

Il est important que l'humidité de la sciure soit déterminée à chaque lancement d'une opération d'extraction afin de pouvoir calculer avec précision les taux des extraits en fin d'opération en retranchant la portion d'eau pouvant subsister dans la sciure au début de l'opération d'extraction (correction de la masse anhydre de la sciure).

3.3.7 Effet des extraits sur le comportement hygroscopique du bois de vène à l'échelle des micro-échantillons

En règle générale, la stabilité dimensionnelle du bois est évaluée à travers l'évolution des dimensions d'un échantillon de bois vert au cours de son séchage et ce jusqu'à l'état anhydre ce qui permet de caractériser son retrait total. Il est bien connu que les cycles de sorption répétés affectent considérablement le comportement hygroscopique général du bois (Goulet 1968; Hernandez 1993a). La première désorption du bois vert présente toujours des humidités d'équilibre supérieures à celles des autres cycles successives de sorption où elles restent plus ou moins stables. Ainsi, afin d'éviter la première désorption caractérisée par une perte irréversible de l'hygroscopicité, l'essai a été effectué après le séchage initial du bois vert.

Il faut dire qu'en général les mesures du retrait sont faites à l'échelle macroscopique. Dans ces conditions il ressort un comportement hygroscopique moyen du bois où toutes les hétérogénéités structurelles ainsi que leurs interactions interviennent. Ainsi, afin de mieux comprendre le comportement hygroscopique exact du bois, il est indispensable d'évaluer ses propriétés hygroscopiques à l'échelle de la structure fine en utilisant des minuscules échantillons très fins. Dans ce cas la finesse de l'échantillon peut permettre à l'humidité du bois d'être presque uniforme dans la masse du bois durant l'essai de sorption. Pour cela un dispositif a été conçu au LERMaB pour des mesures du retrait à l'échelle microscopique dont l'épaisseur de l'échantillon peut descendre jusqu'à 0,3 mm (Perré 2007). En plus, contrairement à la méthode classique où la mesure du retrait/gonflement est effectuée à l'échelle macroscopique (cube de 20 mm de côté), la finesse de l'échantillon offre un avantage considérable lorsqu'il s'agit d'étudier l'influence des extraits sur le comportement hygroscopique du bois ; l'extraction est en effet d'autant plus efficace que la taille de l'échantillon est plus petite. Cependant, il a été constaté que le risque de casse et de fente augmentent pour des échantillons très fins.

Dans ce travail, l'influence des extraits sur le comportement hygroscopique du bois de vène a été déterminé en comparant les courbes de sorption, les valeurs du retrait (radial et tangentiel), de l'anisotropie du retrait et du point de saturation des fibres sur des

micro-échantillons (d'aubier et de duramen) non extraits et extrait en parallèle à différents solvants : l'éthanol-toluène suivie de l'eau chaude, l'eau chaude, l'acétone et l'hexane. L'extraction a été effectuée au soxhlet. Le retrait et le point de saturation de la fibre sont déterminé respectivement (à partir des courbes de sortie issus des données collectées par le balayage laser) par le point d'intersection du prolongement de la pente avec l'axe des ordonnées et avec l'axe des abscisses.

3.3.7.1 Choix de l'épaisseur du micro-échantillon

Le choix de l'épaisseur a été guidé par deux considérations : 1) la difficile manipulation et le risque que l'échantillon se brise ou se fende durant la manipulation si son épaisseur est trop petite et 2) l'extraction devient très partielle si l'échantillon est épais. Une première étude a été effectuée dans l'objectif de trouver le meilleur compromis permettant d'obtenir une extraction aussi complète que possible tout en procurant une maniabilité aisée (figure 52). Ainsi, sur trois barreaux de duramen externe (zone de transition) provenant de différents arbres, trois séries (jumelés longitudinalement par barreau) d'épaisseurs de 0,5, 1, 2 et 4 mm (figure 52) ont été prélevées à l'aide d'une scie à fil diamanté (figure 51). Ces micro-échantillons ont été totalement extraits (à l'éthanol-toluène plus à l'eau chaude) et les taux d'extraits ont été comparés à celui obtenu selon la norme ASTM D1105 (1996) sur de la sciure fine (40 mesh) provenant respectivement de ces mêmes barreaux.

Les résultats obtenus ont confirmée une diminution sensible de taux d'extraits au fur et mesure que l'épaisseur augmente (voir l'histogramme de la figure 52). L'analyse des résultats montre que les épaisseurs 0,5 et 1 mm qui n'ont montré aucune différence significative (figure 52), ont des taux d'extraits très proches de ceux obtenus par extraction sur la poudre (20,25 et 19,65 contre 21,27%). Il a été alors convenu pour les raisons évoquées ci-dessus de choisir l'épaisseur de 1 mm pour la suite des analyses de l'effet des extraits sur la stabilité dimensionnelle du bois de *P. erinaceus*. Ainsi, il a été procédé à la découpe de 3 séries de 5 échantillons de $1 \times 10 \times 12 \text{ mm}^3$ (LRT) le long du barreau de duramen externe. Chaque série est composée des échantillons correspondant aux 5 traitements sélectionnés, référence et 4 modalités d'extraction (figure 53) :

- Le duramen non traité i.e. le témoin,
- Le duramen extrait à l'éthanol-toluène suivi de l'eau chaude (extraction totale),

- Le duramen extrait à l'eau chaude,
- Le duramen extrait à l'acétone (solvant polaire),
- Le duramen extrait à l'hexane (solvant apolaire),
- Des échantillons ont aussi été prélevés sur l'aubier correspondant.

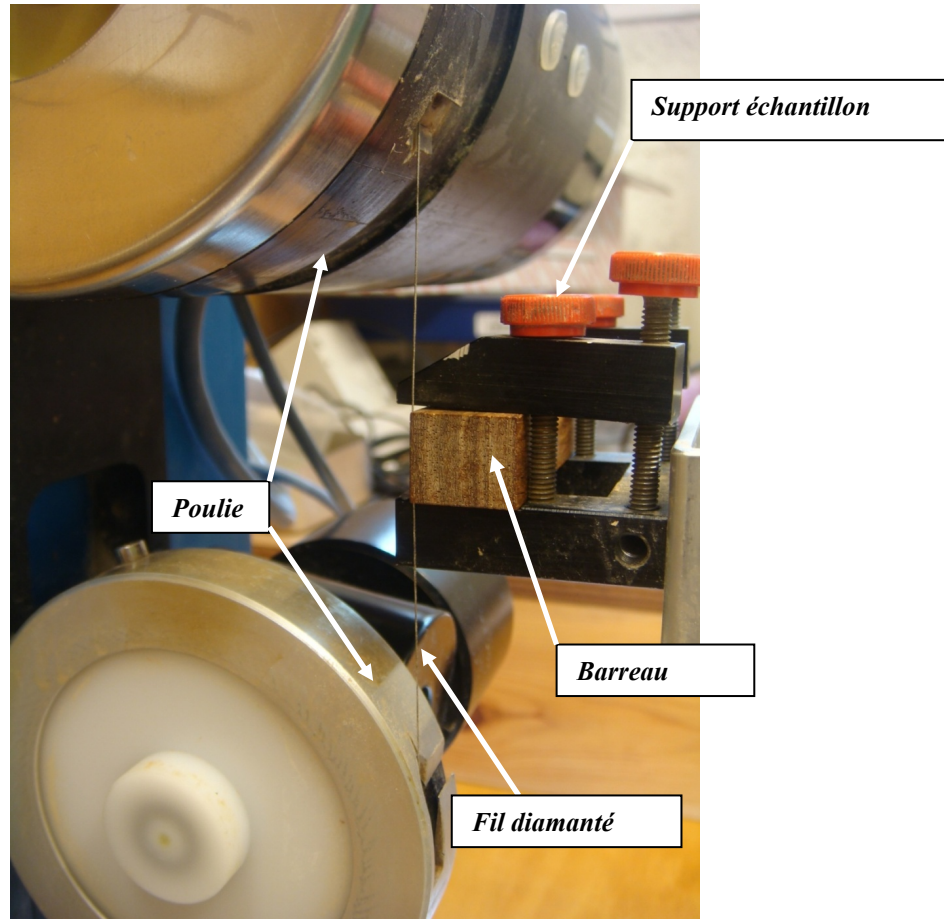


Figure 51. Sie à fil diamanté

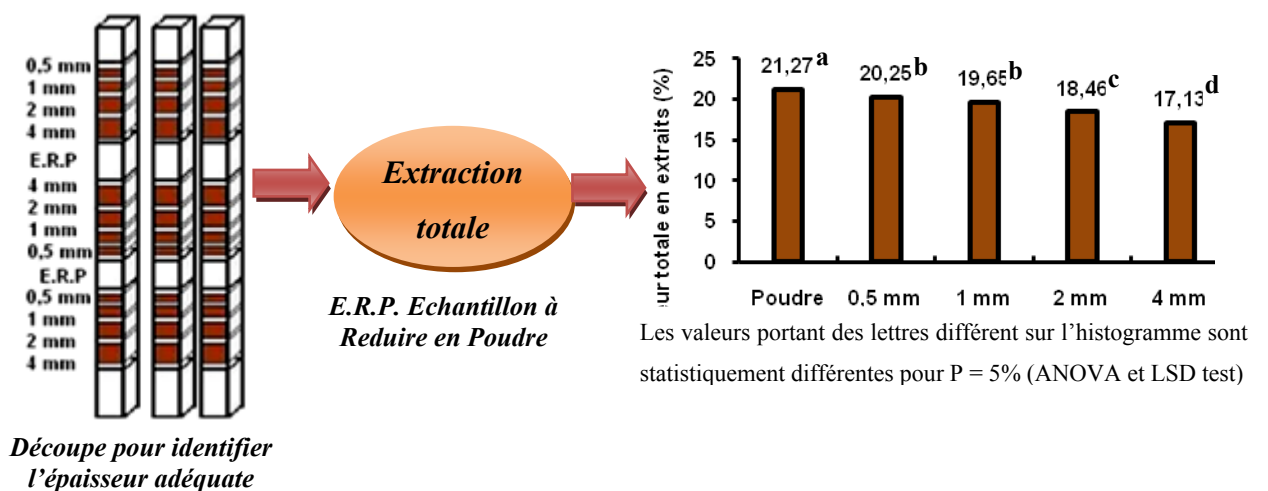


Figure 52. Protocole du choix de l'épaisseur adéquate

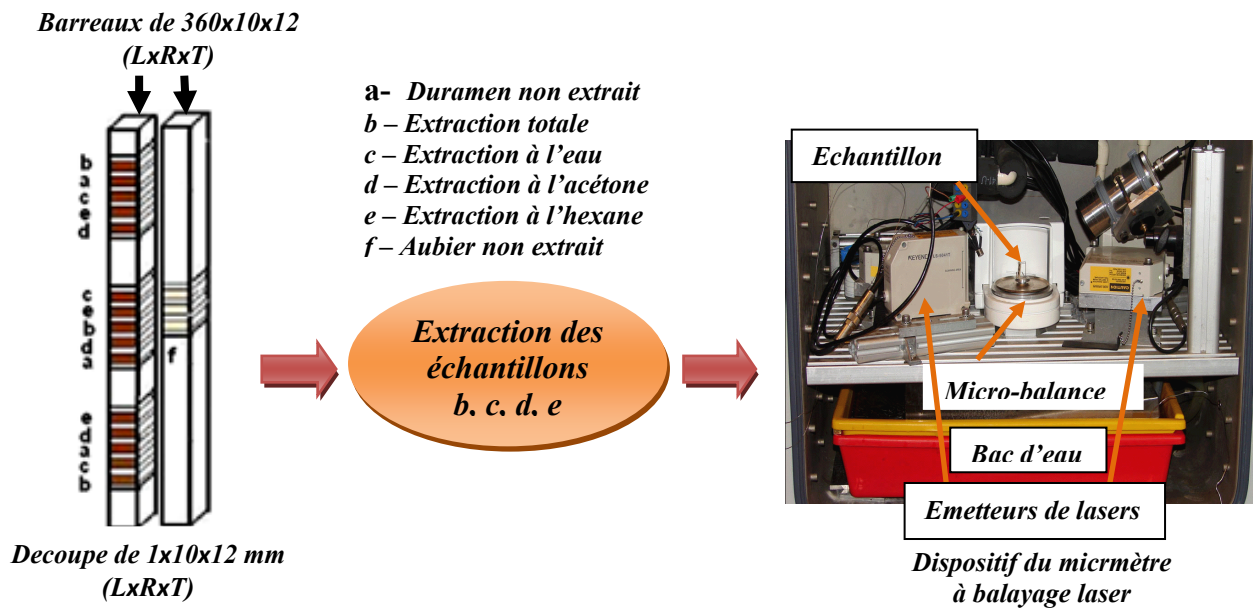


Figure 53. Decoupe et mesure du retrait suivant chacun des traitements

3.3.7.2 Le micromètre à balayage laser

Le micromètre à balayage laser est un dispositif expérimental conçu au LERMaB (Perré 2007) pour la détermination précise des relations bois/eau sur des mini-échantillons découpés à la scie à fil diamanté (figure 51). C'est un outil adapté pour étudier l'interaction dynamique entre l'humidité relative, l'humidité du bois, et le retrait/gonflement. Le principe a le grand avantage de mesurer sans contact, simultanément et de façon continue, la perte de masse, le retrait de l'échantillon et les conditions hygrothermiques du milieu ambiant. La perte de masse de l'échantillon est mesurée avec une microbalance électronique extrêmement sensible et deux dimensions d'échantillons sont mesurées à l'aide de micromètre laser.

Leur principe de fonctionnement repose sur l'émission de deux rayons lasers respectivement dans le sens horizontal et vertical (figure 54) ; ce qui permet la mesure du retrait sur deux dimensions perpendiculaires d'un même échantillon. Les rayons émis arrivent sur une lentille réceptrice qui les fait converger vers deux récepteurs de lumière et transforme le signal lumineux en signal électrique. Les rayons, qui rencontrent l'échantillon fixé sur un support-échantillon et posé sur une balance extrêmement sensible (sensibilité de 0.1 µg et de précision de 2 µg) forment une «ombre» dont les dimensions mesurées en continu correspondent à celles de l'échantillon. L'espace de

mesure permet d'obtenir la taille d'objets de 0.2 à 40 mm avec une résolution de 0.05 μm .

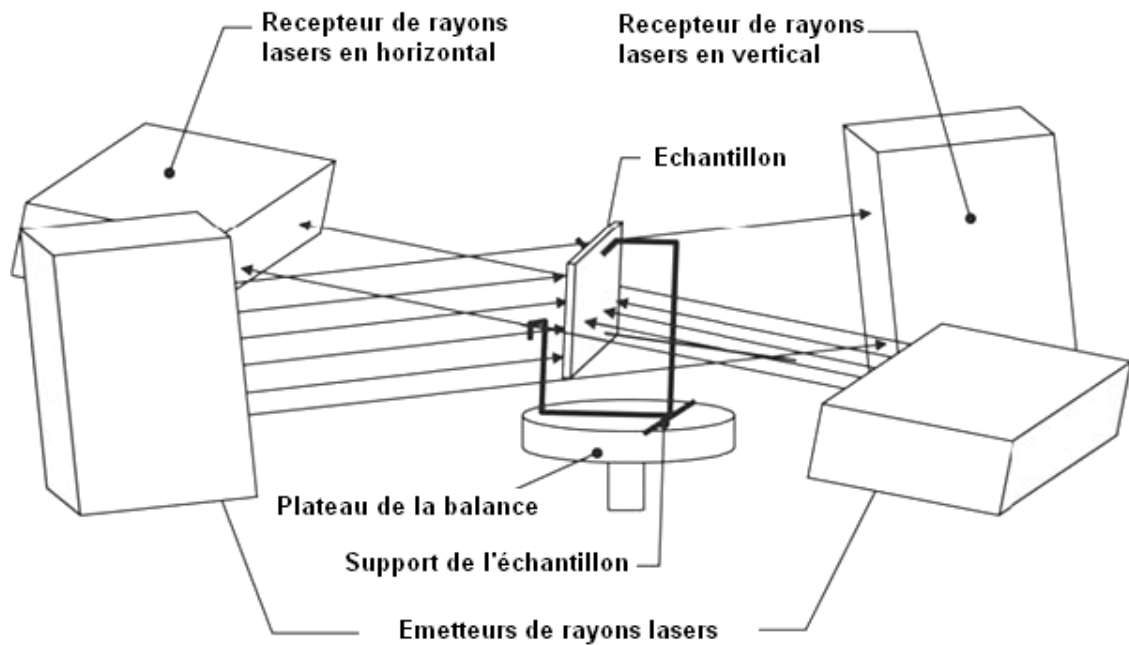


Figure 54 Principe de fonctionnement du micromètre laser (Perré. 2007)

Pendant que les dimensions sont mesurées en continu à travers l'ombre, la perte de masse de l'échantillon est relevée elle aussi en continu par la dite balance, de type Sartorius modèle MC2, placée au centre du dispositif. Cette balance fonctionne à un niveau de température pouvant atteindre un maximum de 35°C.

Un porte-échantillon (figure 55) réalisé en laiton permet de fixer l'échantillon et de bloquer les trois translations et les trois rotations possibles de l'échantillon, mais sans gêner l'expression du retrait. Ce support est fait de manière à permettre le libre passage des rayons laser sur les côtés de l'échantillon.

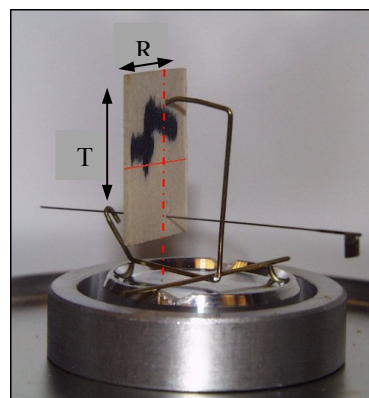


Figure 55 Support-échantillon (Perré. 2007)

Afin de garantir les conditions d'homogénéité hygrothermiques, l'ensemble du dispositif est placé dans une enceinte de conditionnement, modèle VACUCELL 111 (figure 56). Les conditions y sont mesurées par l'intermédiaire d'un thermomètre sec et d'un thermomètre maintenu humide au moyen d'une mèche humide. Ces deux thermomètres mesurent respectivement la température sèche et la température humide à l'intérieur de l'enceinte. La température sèche à l'intérieur de l'enceinte est maintenue à 30°C par l'intermédiaire des résistances chauffantes. Un ventilateur et un bac d'eau sont aussi placés à l'intérieur de l'enceinte. Le ventilateur envoie régulièrement l'air au contact de l'eau régulée en température du bac. A la sortie du bac, l'air a une pression de vapeur d'eau en équilibre avec celle de l'eau du bac. La température de l'eau du bac correspond donc à la température du point de rosée de l'air de l'étuve. La température du bac est régulée par un cryothermostat situé à l'extérieur de l'enceinte. Ceci permet de faire varier la pression partielle de vapeur et ainsi, l'humidité relative à l'intérieur de l'enceinte (la température sèche étant constante). En effet l'humidité relative, HR , est par définition le rapport, exprimé en pourcentage, de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air P_v sur la pression de vapeur saturante $P_{vs}(T_s)$

Ainsi,

$$P_v = P_{vs}(T_r) = P_{vs}(T_{eau}) \quad \text{Équation 29}$$

$$HR(\%) = \frac{P_v}{P_{vs}(T_s)} \times 100 = \frac{P_{vs}(T_r)}{P_{vs}(T_s)} \times 100 = \frac{P_{vs}(T_{eau})}{P_{vs}(T_s)} \times 100 \quad \text{Équation 30}$$

Où $P_{vs}(T_{eau})$ et $P_{vs}(T_r)$ sont la pression de vapeur respectivement à la température de l'eau et au point de rosée.

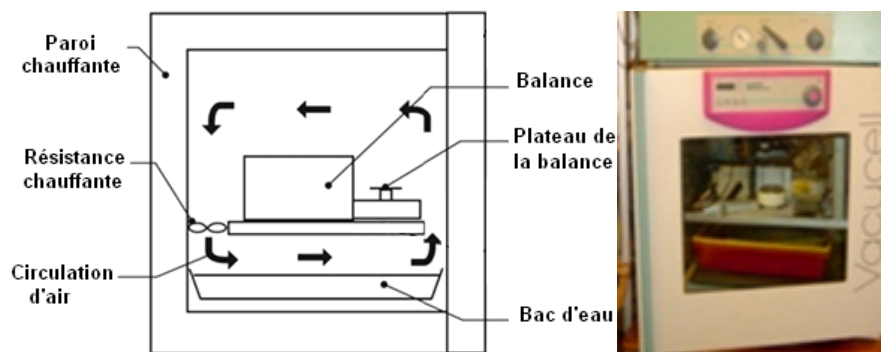


Figure 56 Enceinte de conditionnement et contrôle de l'humidité relative (Perré. 2007).

C'est en faisant donc varier la température du bac d'eau que l'on réalise une adsorption et une désorption. Ainsi, deux rampes allant de 27 à 5° en désorption et de 5 à 27 °C en adsorption et deux paliers placés entre les rampes déterminent le cycle de fonctionnement du cryothermostat pour une durée totale de 34 h (figure 57).

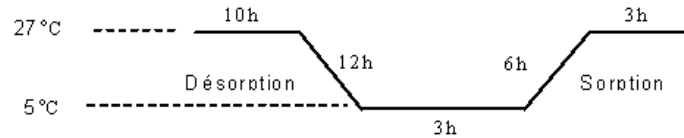


Figure 57. Cycle de fonctionnement du cryothermostat

3.3.7.3 Mode opératoire

Le laser et l'étuve sont d'abord allumés au moins 3 heures avant le début de l'expérience en vue d'une stabilisation de l'étuve et d'un chauffage du laser.

Deux perçages, l'un plus gros sur la partie supérieure et l'autre plus petit sur la partie inférieure sont réalisés sur l'échantillon dans des zones les plus homogènes possibles (figure 58) afin d'éviter d'éventuelles fissures au cours de l'essai. Au cours de cette opération, l'échantillon est régulièrement aspergé d'eau afin de conserver son état saturé.

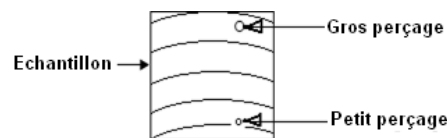


Figure 58. Préparation de l'échantillon au montage

L'échantillon est installé sur le porte-échantillon que l'on place ensuite dans l'étuve sur la balance de manière que les deux rayons soient parallèles aux cotés respectifs et que le rayon issu du laser vertical passe exactement sur les deux trous puis l'enceinte est fermée.

Le programme du cryothermostat est activé et un programme d'acquisition des données sur l'ordinateur permet de lancer l'essai à travers un clic sur « START » de l'interface d'acquisition. Les données sont stockées sur le disque dur de l'ordinateur toutes les 2 minutes.

En fin d'opération, la masse du support est déterminée en le plaçant seul sur la balance et en réalisant une série de mesure toutes les trente secondes.

L'échantillon est ensuite placé dans l'étuve à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durant 24 heures afin de déterminer sa masse anhydre.

Il faut noter que chaque prise de masse $M_{bal}(t)$ par la balance est la somme de la masse de l'échantillon $m_e(t)$, de la masse du porte échantillon m_{pe} et la dérive Δm de la balance, inévitable sur des durées d'expérimentation aussi longues. Finalement, la masse de l'échantillon à l'instant t $m_e(t)$ peut être déterminée par l'expression :

$$m_e(t) = M_{bal}(t) - (m_{pe} - \Delta m) \quad \text{Équation 31}$$

La teneur $H_t(\%)$ en fonction du temps est facilement obtenue par l'expression :

$$H_t(\%) = \frac{m_e(t) - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{Équation 32}$$

Quant au retrait, il est déterminé selon l'expression suivante :

$$\beta(\%) = \frac{D_s - D_t}{D_s} \times 100 \quad \text{Équation 33}$$

Où D_s et D_t sont respectivement la dimension à l'état saturé et à l'état non saturé à l'instant t .

3.3.8 Analyses statistiques des résultats

3.3.8.1 Variabilité des propriétés structurales, de la teneur en extraits et des propriétés physico-mécaniques

L'objectif étant de tester la variabilité selon la provenance et la position de localisation radiale dans l'arbre nous avons effectué une analyse de la variance au moyen du logiciel SPSS (version 13.0) en recourant au modèle linéaire généralisé. Le plan d'échantillonnage adopté correspond au dispositif de split plot avec le facteur fixe « provenance » comme facteur principal et le facteur fixe « position radiale » comme

facteur secondaire. Un dispositif similaire fut utilisé par Treacy et al (2000) et Washusen et al (2001), pour comparer les propriétés du bois selon la provenance et la position radial dans l'arbre. Ainsi, pour chaque paramètre le test d'ANOVA spécifie la différence entre les moyennes des valeurs mesurées selon la provenance, la position de localisation radiale et l'interaction « provenance x localisation radiale ».

3.3.8.2 Influence des caractères anatomiques et des extraits sur les propriétés physiques et mécaniques du bois

Cet essai a consisté dans un premier temps à effectuer sur des barreaux la mesure des caractéristiques mécaniques et dans un second temps à déterminer sur des échantillons issus de ces mêmes barreaux les caractéristiques physiques puis à effectuer une analyse qualitative et quantitative de la structure anatomique et une analyse quantitative des extraits. Le but poursuivi ici a consisté à rechercher une relation entre les caractéristiques anatomiques et les propriétés physiques et mécaniques mesurées. Les caractéristiques anatomiques déterminées concernent la longueur et l'épaisseur des fibres, le nombre de vaisseaux par mm², la proportion des fibres, des vaisseaux et du parenchyme axial et le nombre de rayon par mm et la hauteur des rayons. Les coupes anatomiques et les observations ayant été réalisées sur les échantillons à l'issue des mesures mécaniques et physiques l'analyse de la corrélation simple et de la régression linéaire multiple se révèlent parfaitement bien adaptées pour déterminer l'effet des caractères anatomiques sur les propriétés physiques et mécaniques mesurées. Le même modèle mathématique d'analyse des résultats a été appliqué par Leclercq (1981), Beery et al (1983) et Wu et al (2006) pour étudier l'impact des caractères anatomiques sur les propriétés du bois. Il est aussi important de rappeler que la corrélation simple est une mesure de l'intensité de la relation linéaire en deux variables et on désigne par la lettre **r** le coefficient de corrélation qui mesure l'étroitesse de la relation entre les deux variables. Quant à la régression linéaire multiple son principe consiste à exprimer sous la forme d'une équation une variable observée dite variable dépendante (dans le cas présent il s'agit des caractéristiques physiques et mécaniques) en fonction de deux ou de plusieurs variables observées (i.e. les caractéristiques anatomiques). La relation recherchée est supposée linéaire exprimée sous la forme suivante :

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots b_nx_n$$

Équation 34

Où Y est la variable dépendante ; $b_1, b_2 \dots b_n$ sont les coefficients de régression partielles ; b_0 est le terme indépendant ; $x_1, x_2, \dots x_n$ sont les variables explicatives.

3.3.8.3 Influence de la nature des extraits sur le comportement hygroscopique du bois de vène

Le but poursuivi ici est de mettre en évidence l'évolution du comportement hygroscopique (les courbes de sorption, le retrait, l'anisotropie du retrait et le point de saturation de la fibre) sur des minuscules échantillons de vène non extraits et extraits parallèlement par différents solvants (l'éthanol-toluène suivi de l'eau chaude ; l'acétone, l'hexane et l'eau chaude) dont l'affinité de l'extrait au solvant en question détermine la nature de l'extrait. Une analyse de la variance à un critère de classification a été utilisée pour comparer les moyennes par traitement.

4 Résultats et discussions

4.1 Variation des propriétés structurelles et des taux d'extractibles du bois de vène

Cette partie a pour objectif de mettre en évidence la variation des caractères anatomiques et du taux d'extractibles selon la provenance géographique et selon la direction radiale à l'intérieur de l'arbre en vue de pouvoir expliquer certaines variabilités des propriétés physiques et mécaniques du bois de vène et de justifier certaines adéquations de mise en œuvre. L'étude a consisté à effectuer dans un premier temps une analyse des cernes en vue de déterminer l'accroissement annuel et les composantes densitométriques du vène et dans un second temps à effectuer une analyse qualitative et quantitative de la structure anatomique et une analyse quantitative de la teneur en extractibles selon la provenance géographique et selon la direction radiale dans l'arbre.

4.1.1 Caractéristiques des cernes du bois de vène

4.1.1.1 L'accroissement annuel

Les tableaux 4 et 5 et la figure 59 donnent les résultats de l'analyse de cernes par observation à la loupe. Ces résultats montrent sur une base cumulative que l'accroissement annuel diffère selon la provenance et selon l'âge cambial. L'accroissement moyen est de 4,9 mm/an en région guinéenne contre 2,8 mm/an en zone soudanienne. Cette différence d'accroissement pourrait s'expliquer par la différence des conditions de croissance qui caractérise chaque région géographique de provenance et qui affectent considérablement l'activité cambiale. La région climatique guinéenne relativement plus humide et plus fertile que la région climatique soudanienne serait favorable à une croissance plus vigoureuse. Selon des travaux antérieurs (Leclercq 1977,1979 et 1982 ; Chanson 1988 ; Hock et Mariaux 1984 ; Nepveu 1994 ; Degron 1994 ; Hebert et al 2002 ; Guilley et Nepveu 2003 etc), la largeur de cerne peut être considérée comme un indicateur des conditions de croissances (fertilité de la station, condition climatique, techniques sylvicoles etc.). Selon Nicault et al (2001), la construction du cerne dépend des précipitations qui renouvellent le stock d'eau dans le sol, de l'intensité de l'évapotranspiration déterminée par les températures et des

caractéristiques édaphiques du sol, notamment la réserve utile et le stress hydrique seraient un déclencheur de la transition bois initial-bois final. Till (1986) estime que les facteurs écologiques comme le climat, l'altitude et le substrat influencent le plus les variations spatiales et temporelles de l'épaisseur des cernes. D'autres travaux antérieurs ont aussi révélé l'effet significatif des niveaux de précipitation sur l'accroissement annuel (Therrell *et al* 2007 ; Stahle *et al.* 1999 ; Shackleton 2002 and Fichtler *et al.* 2004). Cependant, des mauvais traitements tels que la pâture, l'émondage, les feux de brousse etc. qui sont en général plus fréquents en zone soudanienne qu'en zone guinéenne peuvent aussi contribuer à expliquer la différence d'accroissement annuel entre les deux régions de provenance.

A partir de nos résultats, on peut estimer que le vene en région guinéenne nécessite 87,5 ans pour atteindre un diamètre d'exploitation de 35 cm contre 125 ans en zone soudanienne. Des études similaires effectuées par Therrell *et al* (2007) ont révélées que des délais de 85 ans en région de croissance rapide et 110 ans en région de croissance lente sont nécessaires aux *Pterocarpus angolensis* du Zimbabwe pour atteindre un diamètre d'exploitation de 35 cm.

Quant à la variabilité dans chaque individu, l'accroissement annuel fluctue considérablement au cours de la vie de l'arbre ; cependant les cernes les plus larges se situent dans la première tranche d'âge (0-25 ans) puis ils décroissent progressivement vers la périphérie de l'arbre. Ceci s'expliquerait par l'effet classique de la fermeture du couvert végétal, donc de la compétition entre individus. Il faut aussi dire que la première tranche d'âge correspond vraisemblablement à la croissance juvénile caractérisée généralement par des cernes larges. Des travaux similaires effectués par Détéienne *et al* (1989), Durrieu de Madron *et al* (2000) et Durrieu de Madron (2003) ont trouvés chez des espèces tropicales (le Bété, l'Iroko, l'ayous, le limba, le sapelli, l'Okoumé etc.) une diminution de la largeur de cerne avec l'âge de l'arbre. D'autres travaux antérieurs (Leclercq 1979 ; Jodin 1994 ; Guilley *et al* 1999 ; Guilley et Nepveu 2003 ; Berges 1998 ; Rao *et al* 1997 ; Degron et Nepveu 1996) ont bien révélés un effet âge dans la variabilité inter cerne.

Ainsi, contrairement à l'idée généralement admise selon laquelle aucun cerne ne pouvait être décelé dans le bois des essences tropicales africaines, nos résultats montrent des limites de cerne bien distinctes matérialisées d'une part par la proportion et la

dimension des vaisseaux et d'autre part par les bandes de parenchyme axial (figure 60). En effet les vaisseaux légèrement plus abondants en début de cerne diminuent progressivement en proportion et en diamètre au fur et à mesure que l'on progresse dans le bois final. Quant aux cellules de parenchyme axial, elles matérialisent la limite de cerne par des alternances de bandes qui sont plus épaisses, plus courtes, plus sinueuses et beaucoup plus interrompues en début d'accroissement qu'en fin d'accroissement où elles deviennent plus fines, plus serrées, plus rectilignes et plus nombreuses. Cette observation confirme les résultats de Mariaux et al (1967) qui ont abouti à des variations similaires des bandes de parenchymes pour délimiter les limites de cerne chez des spécimens de vène provenant du Burkina Faso. Cet auteur a ainsi conclu que, certaines espèces tropicales telles que le vène qui évoluent sous des saisons bien tranchées (une saison sèche et une saison pluvieuse) peuvent présenter des cernes annuels bien distincts.

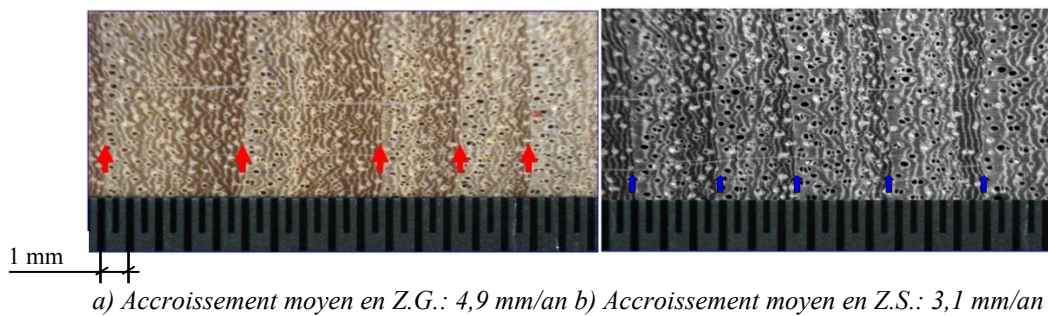


Figure 59. Accroissement annuel du bois de vène à la loupe binoculaire

Tableau 4. Largeur moyenne de cerne par provenance et par classe d'âge

LC (mm)	Classe d'âge			
	0-25 (I)	25-60 (M)	60-100 (E)	Moyenne/ prov.
Z.G.	6,4 (1,2)	4,8 (1,1)	3,4 (1,5)	4,9 (1,7)
Z.S.	3,8 (0,7)	2,6 (0,8)	2 (1,0)	2,8 (1,2)

Z.G. - Zone guinéenne, Z.S. - Zone soudanienne, ZI - Zone interne, M - Zone médiane E - Zone externe, LC- Largeur de cerne

Tableau 5. Analyse de la variance sur la largeur de cerne

Sources de variation	Valeur de P
Provenance	<0,001
Classe d'âge	
I × M	=0,038
I × E	<0,001
M × E	=0,038
Interaction	
Classe d'âge × Provenance	NS

NS = non significatif à $p \leq 0,05$;

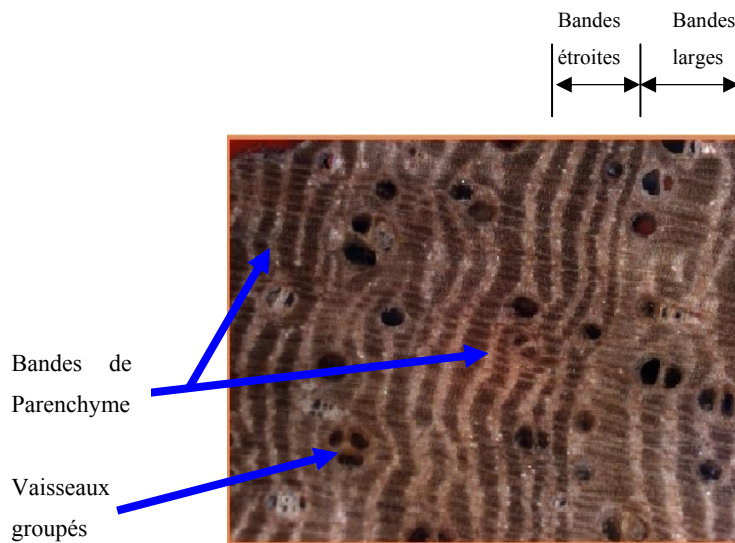


Figure 60. Image de la section transversale d'un échantillon de vène (*Pterocarpus erinaceus* Poir) obtenue au microscope optique.

4.1.1.2 Les composantes densitométriques

L'analyse de cerne par la microdensitométrie au rayon X a été effectuée en vue de comprendre l'évolution des composantes densitométriques selon la provenance géographique et selon l'âge cambial. Les résultats de la densitométrie au rayon X sont présentés dans le tableau 6 et les figures 61, 62 et 63.

Tableau 6. Valeurs moyennes des composantes densitométriques

Provenances	LC (mm)	Dmin (kg/m ³)	Dmax (kg/m ³)	Dm (kg/m ³)	% Bf
Guinéenne	4,4 (1,3)	756 (37)	963 (54)	859 (41)	77 (7)
Soudanienne	2,7 (0,9)	766 (40)	844 (43)	805 (41)	65 (11)

LC – largeur de cerne ; Dmin, Dmax et Dm- densité minimale, maximale et moyenne de cerne; Bf – bois final

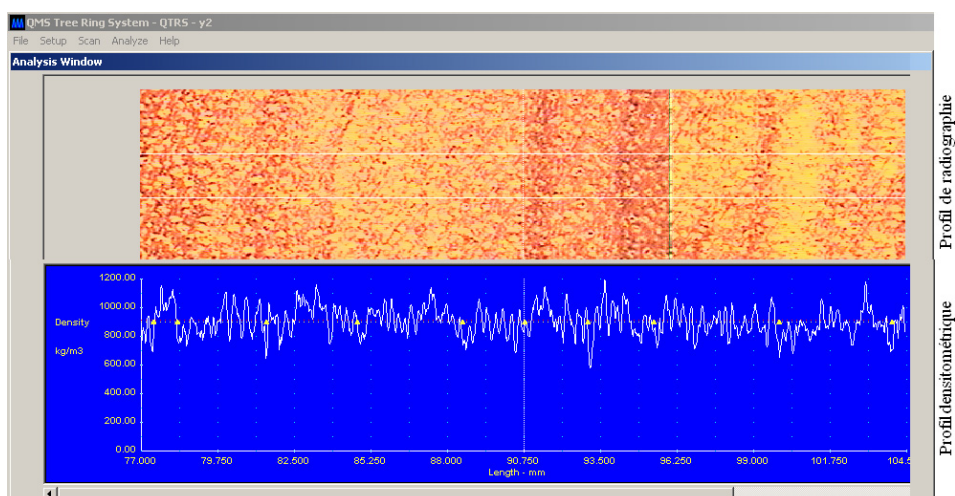


Figure 61. Profil densitométrique et de radiographie du bois de vène

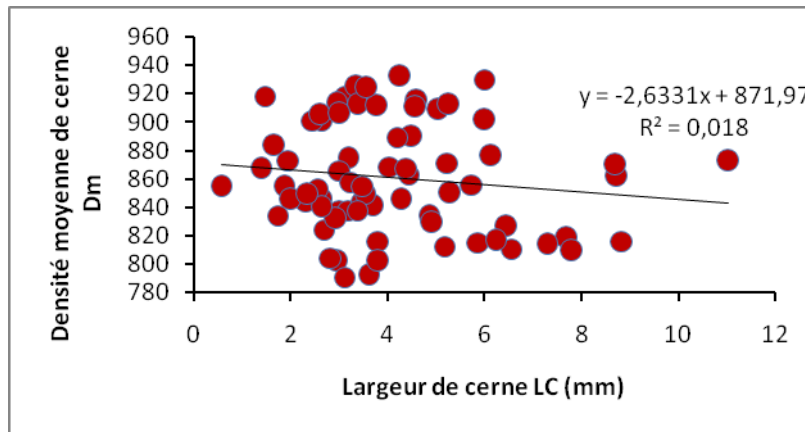
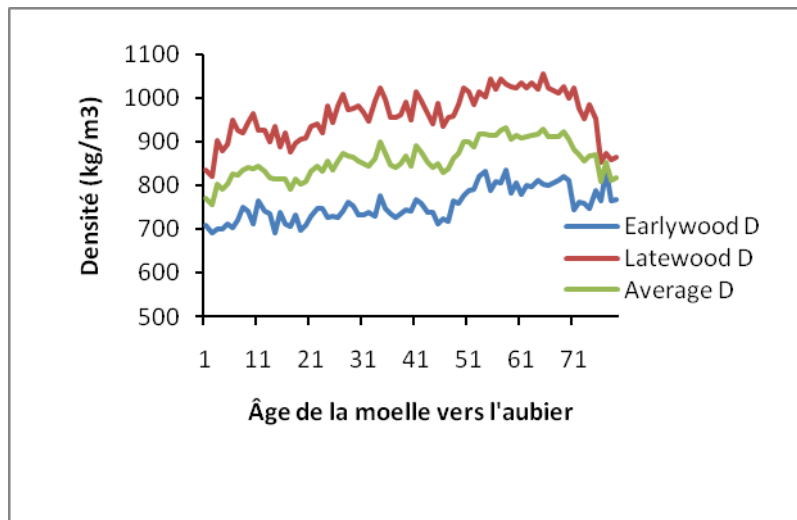
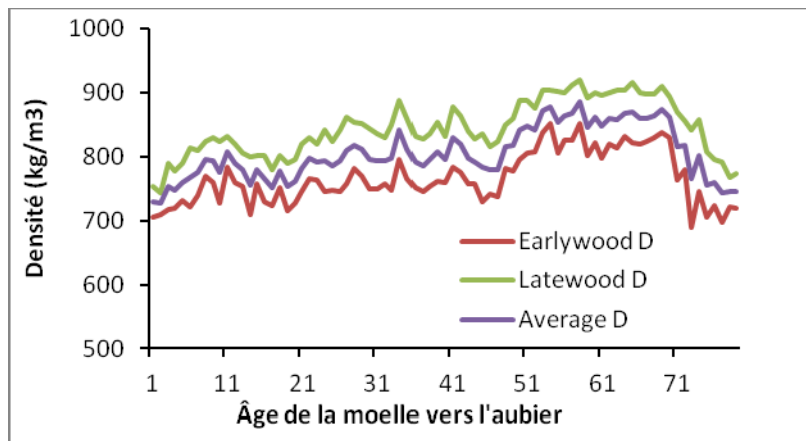


Figure 62. Densité moyenne de cerne vs largeur de cerne



a) Provenance guinéenne



b) Provenance soudanienne

Figure 63. Evolution des composantes de densité avec l'âge en zone guinéenne (a) et soudanienne

(b)

Ces résultats montrent que la largeur de cerne et les composantes de densité du bois de vène (la densité minimale, la densité maximale et la densité moyenne de cerne) varient d'une région à l'autre. La largeur moyenne de cerne est de 4,4 mm/an chez les spécimens issus de la région guinéenne contre 2,7 mm/an chez les individus issus de la région soudanienne. Mais il faut noter que la détermination des limites de cernes à partir de l'examen des profils de radiographie reste très ambiguë comme l'atteste la figure 61 et les valeurs déterminées par cette méthode devraient donc être prises avec précaution et réserve.

Quant aux composantes densitométriques, elles montrent des valeurs significativement supérieures chez les spécimens issus de la région climatique guinéenne que chez ceux de la région soudanienne. Les différences de modifications anatomiques (pourcentage de bois final) et chimiques (la teneur en extrait) liées aux différences de conditions de croissance expliqueraient cette différence de composantes densitométrique entre les provenances. En effet la proportion de bois final est de 77 % chez les spécimens issus de la région guinéenne contre 65 % pour ceux issus de la région soudanienne. Selon Bowyer *et al* (2007), plusieurs facteurs tels que le site, le climat, la provenance géographique, le stress de croissance, qui souvent agissent en combinaison, affectent considérablement la densité du bois. Mais pour ce qui concerne la position radiale dans l'arbre les composantes de densité augmentent de la moelle vers la zone de transition duramen-aubier puis chute considérablement dans l'aubier mais elles restent tout de même supérieures à celles mesurées près de la moelle et cela quelle que soit la provenance géographique. Les résultats montrent aussi qu'il n'existe pas de relation significative ($R^2 = 0,018$) entre largeur de cerne et la densité moyenne de cerne (figure 62). Il faut rappeler que la première source de variabilité intra-arbre est le passage progressif du bois juvénile au bois adulte. En accord avec Bowyer *et al* (2007), le bois juvénile se caractérise généralement par une forte proportion de cellules à parois minces ; ce qui expliquerait sa faible densité. Qu'à cela ne tienne, Thibaut *et al* (1997) rapportent que la densité chez les feuillus peut augmenter, diminuer ou rester stable de la moelle vers la périphérie mais il reste que la variation de densité, quand elle existe, peut parfois être impressionnante, du simple au double. La chute des composantes densitométriques dans la zone d'aubier laisse penser que les extraits joueraient un rôle majeur dans la variation radiale de la densité chez le vène. En effet, la teneur en extrait

déterminée a montré des valeurs qui augmentent significativement de la moelle vers la zone de transition où elles sont maximales et chutent ensuite dans l'aubier.

Les figures 63a et 63b montrent que quelle que soit la provenance, le bois final reste toujours plus dense que le bois initial. Cette différence de densité serait due à la différence de caractéristiques des cellules constituant ces deux zones. En effet le bois initial du vène matérialisé par des plages plus claires (figure 59) comporterait des vaisseaux légèrement plus nombreux et plus gros, associé à des fibres à parois minces et aux lumens plus larges, tandis que le bois final plus sombre comporterait une proportion importante de fibres à parois épaisses et à lumens étroits, associé à une proportion moins importante de vaisseaux.

4.1.2 Caractéristiques anatomiques

4.1.2.1 Analyse macroscopique

Le bois de vène se caractérise par un aubier bien distinct du duramen. Le duramen est de couleur rouge brun violacé à jaune brun laissant apparaître des veines colorées. Le bois de vène, de type « semi poreux », présente des pores (vaisseaux) visibles à l'œil nu. Isolés et parfois groupés en 2 ou 3, ces pores plus abondants dans le bois initial, diminuent progressivement de diamètre vers le bois final. Du type para et apotrachéal, le parenchyme axial est abondant, invisible à l'œil nu mais visible sans difficulté avec un grossissement de 10x. Les rayons ligneux sont invisibles à l'œil nu et difficilement visibles à la loupe.

4.1.2.2 Analyse microscopique

Les tableaux 7 et 8 donnent les résultats de l'analyse quantitative et qualitative de la structure anatomique et l'analyse de la variance sur des caractères anatomiques par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène.

L'analyse qualitative a concerné essentiellement la longueur des fibres (LF), l'épaisseur des fibres (EF), le diamètre des lumens de fibre (DLF), le diamètre des vaisseaux (DV), la longueur des vaisseaux (LV), la hauteur des rayons (HR).

Quant à l'analyse quantitative, elle a concerné la proportion des fibres (PF), la proportion des vaisseaux (PV), le nombre de vaisseaux par mm² (V/mm²), la proportion du parenchyme axial (PPA) et le nombre de rayon par mm (R/mm)

Tableau 7. Analyse quantitative et qualitative des caractères anatomiques par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène

Caractères anatomiques	<i>DI</i>	<i>DM</i>	<i>DE</i>	<i>Moyenne/prov.</i>
<i>LF</i> (µm)				
Prov. Guin.	1234 (95)	1383 (90)	1460 (104)	1359 (132)
Prov. Soud.	1095 (133)	1243 (102)	1315 (75)	1217 (137)
<i>EF</i> (µm)				
Prov. Guin.	6 (3)	9 (3)	13 (2)	9 (4)
Prov. Soud.	7 (3)	11 (2)	12 (2)	10 (3)
<i>DLF</i> (µm)				
Prov. Guin.	7 (3)	4 (2)	3 (2)	5 (3)
Prov. Soud.	5 (2)	4 (2)	3 (1)	4 (2)
<i>PF</i> (%)				
Prov. Guin.	74 (1)	76 (3)	78 (2)	77 (3)
Prov. Soud.	68 (4)	72 (5)	74 (3)	71(5)
<i>DV</i> (µm)				
Prov. Guin.	250 (14)	278 (23)	303 (26)	277 (30)
Prov. Soud.	198 (25)	219 (18)	230 (20)	216 (24)
<i>LV</i> (µm)				
Prov. Guin.	19 (2)	24 (5)	29 (3)	24 (5)
Prov. Soud.	18 (3)	22 (2)	27 (4)	22 (5)
<i>V/mm²</i>				
Prov. Guin.	4,7 (0,6)	3,6 (0,3)	3,1 (0,5)	3,8 (0,8)
Prov. Soud.	5,3 (0,5)	4,2 (0,4)	3,5 (0,5)	4,3 (0,8)
<i>PV</i> (%)				
Prov. Guin.	14,1 (1,0)	12,3 (1,6)	10,6 (1,3)	14,9 (1,7)
Prov. Soud.	16,1 (1,4)	14,1 (1,4)	12,8 (2,0)	14,3 (2,1)
<i>PPA</i> (%)				
Prov. Guin.	8,1 (0,9)	7,6 (1,1)	7,1 (0,7)	6,4 (1,3)
Prov. Soud.	10,3 (2,4)	8,3 (1,6)	7,1 (1,2)	8,6 (2,1)
<i>R/mm</i>				
Prov. Guin.	10,4 (2,1)	12,0 (2,1)	12,8 (2,2)	11,8 (2,2)
Prov. Soud.	7,6 (1,4)	10,8 (2,2)	11,3 (1,9)	9,9 (2,4)
<i>HR</i> (µm)				
Prov. Guin.	128 (8)	135 (12)	137 (12)	135 (13)
Prov. Soud.	124 (11)	138 (11)	142 (10)	133 (11)

LF- longueur des fibres, *EF* - épaisseur des fibres, *DLF*- diamètre des lumens de fibre, *DV* - diamètre des vaisseaux, *LV* - longueur des vaisseaux, *HR* - hauteur des rayons, *PF* - proportion des fibres, *PV* - proportion des vaisseaux, *V/mm²*- nombre de vaisseaux par mm², *PPA* - proportion du parenchyme axial, *R/mm* - nombre de rayon par mm

Tableau 8. Analyse de la variance sur la variabilité des caractères anatomique du bois de vène

Sources de variation	Valeur de <i>P</i>					
	<i>LF</i>	<i>EF</i>	<i>DLF</i>	<i>PF</i>	<i>DV</i>	<i>LV</i>
Provenance	< 0,001	NS	NS	= 0,002	< 0,001	NS
Position radiale						
DI × DM	< 0,001	= 0,013	= 0,02	= 0,014	= 0,032	= 0,021
DI × DE	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
DM × DE	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Interaction :						
Prov. × Pos.rad	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS = non significatif à $p \leq 0,05$;

Tableau 8 (suite)

Sources de variation	Valeur de <i>P</i>					
	<i>LV</i>	<i>V/mm²</i>	<i>PV</i>	<i>PPA</i>	<i>HR</i>	<i>R/mm</i>
Provenance	NS	= 0,008	= 0,008	NS	NS	= 0,019
Position radiale						
DI × DM	= 0,021	< 0,001	= 0,03	NS	NS	= 0,043
DI × DE	< 0,001	< 0,001	< 0,001	NS	NS	= 0,007
DM × DE	NS	= ,038	NS	NS	NS	NS
Interaction :						
Prov. × Pos.rad	NS	NS	NS	NS	NS	NS

a) Les vaisseaux

A l'échelle microscopique, le bois de vène présente des vaisseaux sans disposition particulière au nombre de 3 à 5 par mm^2 , souvent accolés par 2 ou 3 (figure 64). Les perforations sont simples et le diamètre tangentiel varie de 198 à 277 μm . Quant à leur longueur, elle oscille entre 15 et 35 μm . Les résultats de l'analyse statistique présentés dans les tableaux 7 et 8 montrent que le diamètre et la proportion des vaisseaux ainsi que le nombre de vaisseaux par mm^2 diffèrent significativement entre les deux régions de provenance du vène et entre les trois positions radiales dans l'arbre. Le diamètre des vaisseaux présente des valeurs significativement supérieures chez les spécimens de la région Guinéenne par rapport à ceux de la région soudanienne, tandis que le nombre de vaisseaux par mm^2 et la proportion des vaisseaux présentent des valeurs significativement inférieures chez les spécimens de la région Guinéenne. Cependant, comme on peut le constater sur la figure 64 et dans le tableau 7, le diamètre des vaisseaux augmente significativement de la moelle vers le duramen médian alors que

leur proportion et leur nombre par mm² diminuent. Mais au delà du duramen médian, les caractères ne changent pratiquement plus. Quant à la longueur des vaisseaux, elle ne présente pas de différences significatives entre les régions. Cependant, elle augmente significativement de la moelle vers le duramen médian puis reste stable au-delà.

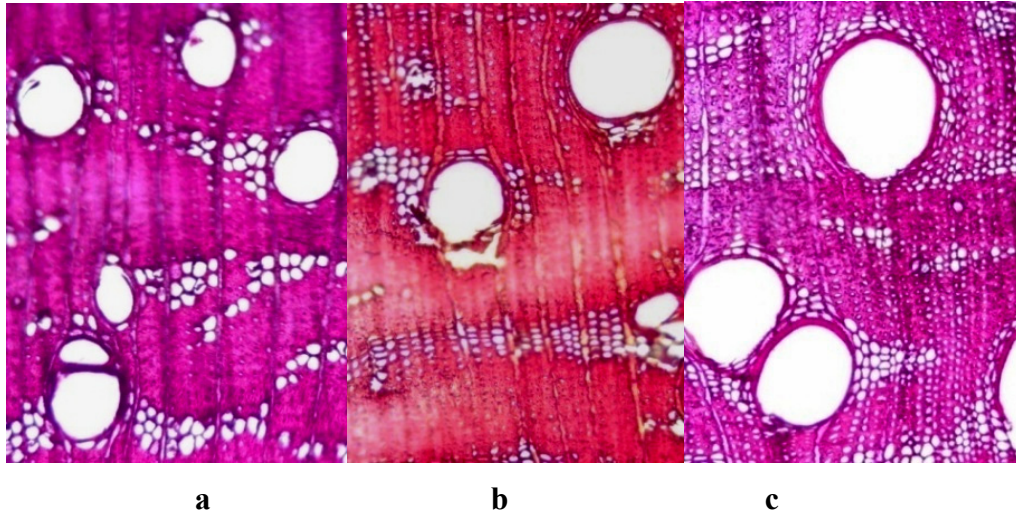


Figure 64. Evolution radiale du diamètre des vaisseaux du bois de vène a.- DI ; a.- DM ; c.- DE (grossissement de 200x)

b) Les fibres

Les fibres, longues de 1094 à 1459 μm , comportent des ponctuations simples et petites. Leurs parois sont relativement épaisses (5 à 13 μm) et le diamètre de la cavité varie de 2 à 10 μm (tableau 7; figures 65 et 66). L'analyse statistique des résultats présentés dans les tableaux 7 et 8, montre que la longueur et la proportion des fibres diffèrent significativement entre les deux régions de provenance du vène et entre les trois positions de localisation radiale dans l'arbre. En effet, la longueur et la proportion des fibres demeurent significativement plus élevées chez les spécimens de la région Guinéenne et, dans l'arbre, augmentent de la moelle vers le duramen médian au delà duquel il reste stable jusqu'au duramen externe. L'épaisseur de la paroi et le diamètre des lumens des fibres varient peu d'une région à l'autre ; cependant dans l'arbre, les parois des fibres s'épaississent de la moelle vers le duramen médian tandis que le diamètre des lumens diminue, ce qui est conforme au passage du bois juvénile au bois adulte. Au delà du duramen médian ces deux caractères varient peu jusqu'au duramen externe.

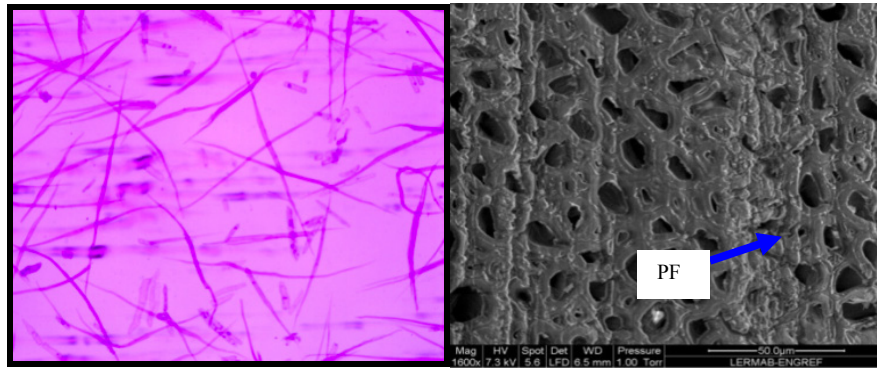


Figure 65. Eclisses de bois de vène macérées Figure 66. Paroi des fibres vues au microscope électronique

c) Le parenchyme axial

Le parenchyme axial est majoritairement paratrachéal aliforme et presque toujours confluent, formant ainsi des bandes ondulées plus ou moins étroites et alignées en 2 ; 3 ou 4 rangées de cellules dans la largeur (figure 67). Des cristaux minéraux sous forme de prismes sont parfois présents dans les cellules de parenchyme. Les tableaux 7 et 8 montrent que la proportion de parenchyme axial varie peu d'une région à l'autre et de la moelle vers la périphérie.

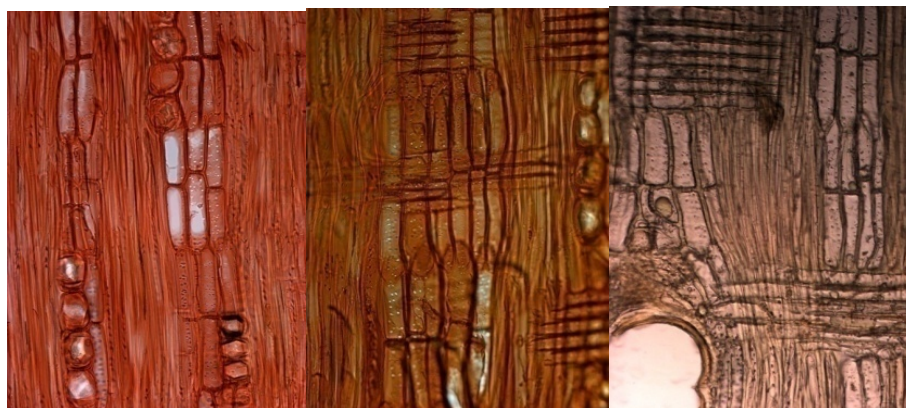


Figure 67. Cellules du parenchyme axial du vène en plan radiale (grossissement 200x)

d) Les rayons ligneux

Les rayons, au nombre de 10 à 13 par mm et hauts de 125 à 142 µm, sont de type unisérié à bisérié et sont toujours homogènes (composés uniquement de cellules couchées). Leur structure est de type étagé (figure 68). Le nombre de rayon par mm est significativement supérieur chez les spécimens de la région Guinéenne par rapport à ceux de la région Soudanienne et augmente significativement du duramen interne vers le duramen médian au delà duquel il reste stable jusqu'au duramen externe. Quant à leur

hauteur, elle est peu variable d'une région à l'autre et de la moelle vers la périphérie (Tableau 7 et 8).

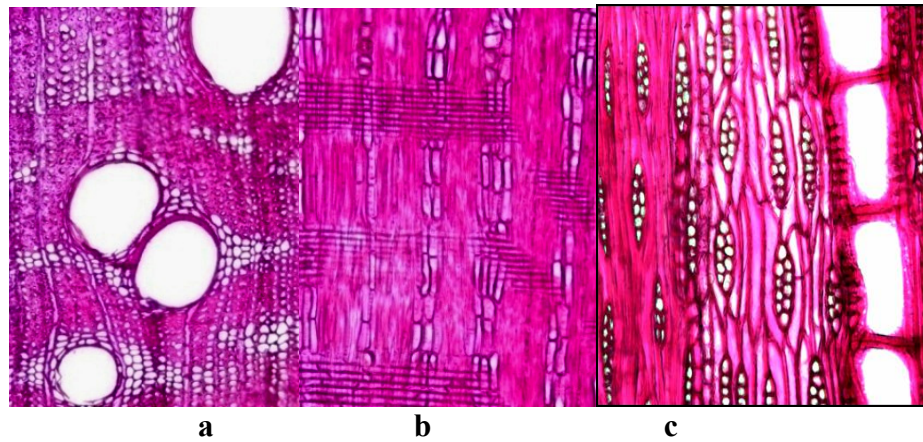


Figure 68. Caractères anatomiques du bois de vène : a)-plan transversal ; b)-plan radial et c)-plan tangentiel

e) Discussion

La variabilité entre provenances des caractères anatomiques chez le vène serait directement liée aux conditions de croissances qui caractérisent les différentes régions de provenances. Ainsi, les individus issus de la région climatique guinéenne, plus humide et plus fertile, disposent d'une croissance plus rapide que ceux issus de la région soudanienne (plus aride et moins fertile). Les sols fertiles et humides conduiraient ainsi chez les espèces feuillues du moins ceux à zone initiale poreuse et semi-poreuse à une accélération de la croissance; ce qui engendre une réduction de la porosité (par une diminution du nombre des vaisseaux par unité de surface) et une augmentation de la proportion des fibres (Tsoumis et Panagiotidis 1980; Nepveu 1994, Leclercq 1983 et 1982). En contradiction avec Leclercq (1983) qui rapporte que l'accélération de la croissance engendre sur le plan qualitatif, une diminution de longueur des fibres et une réduction de l'épaisseur des parois des fibres, nos résultats montrent des fibres plus longues chez les spécimens de la région guinéenne qui de part les conditions de croissance bénéficient pourtant d'une croissance plus rapide que les spécimens de la région soudanienne. Cet état de fait pourrait s'expliquer par l'effet de certains mauvais traitements liés à l'action de l'homme (feux de brousse, émondage excessive, pâture etc.) qui sont beaucoup plus fréquents en zone soudanienne qu'en zone guinéenne. Ce qui entraverait sérieusement la croissance générale des individus en zone soudanienne conduisant en particulier à la formation de fibres significativement plus courtes que chez leur homologue de la région guinéenne. Un autre facteur, non abordé dans ce

travail, en occurrence le facteur génétique pourrait aussi avoir une influence non négligeable sur la variabilité des caractéristiques déterminées.

Pour ce qui est de la variabilité radiale dans l'arbre, elle serait attribuée au vieillissement du cambium. Des études similaires, effectuées par Bhat *et al* (1990) chez trois groupes d'âge (3 ; 5 et 9 ans) d'*Eucalyptus grandis* de l'Inde, ont trouvé une augmentation significative de la longueur des fibres avec l'âge. Le diamètre des lumens des vaisseaux augmente alors que le nombre de vaisseaux par unité de surface diminue. Selon des études effectuées sur la variation radiale des caractéristiques anatomiques et de la densité du bois de clones d'*Eucalyptus camaldulensis*, Teera Veenin *et al* (2005) ont aussi trouvé que la densité des vaisseaux diminue en partant de la moelle alors que la longueur des fibres croît. Les résultats du présent travail montrent que la plupart des caractères anatomiques restent stables au delà de la zone du duramen interne qui vraisemblablement correspond à la zone du bois juvénile.

4.1.3 La teneur en extraits du bois de vène

La figure 69 montre des contenus cellulaires dans le parenchyme axial de l'aubier (figure 69a) et dans un élément de vaisseau du duramen (figure 69b) du bois de vène. En accord avec la littérature, les contenus cellulaires dans l'aubier correspondent probablement à des dépôts de métabolites primaires, des matières de réserve, dans le parenchyme axial et indispensables à la croissance du vène ; il s'agit des sucres simples, des acides aminés, des acides nucléiques, des protéines etc. tandis que ceux du duramen correspondent aux métabolites secondaires proprement dit. Généralement définis comme des substances non ligno-cellulosiques, ces derniers sont généralement présent dans les cavités cellulaires (lumens, espaces intercellulaires, canaux laticifères ou résinifères) mais ils peuvent aussi infiltrer la structure poreuse de la paroi cellulaire (micro-capillaires ou espaces insuffisamment remplis par la lignine et les hémicellulose).

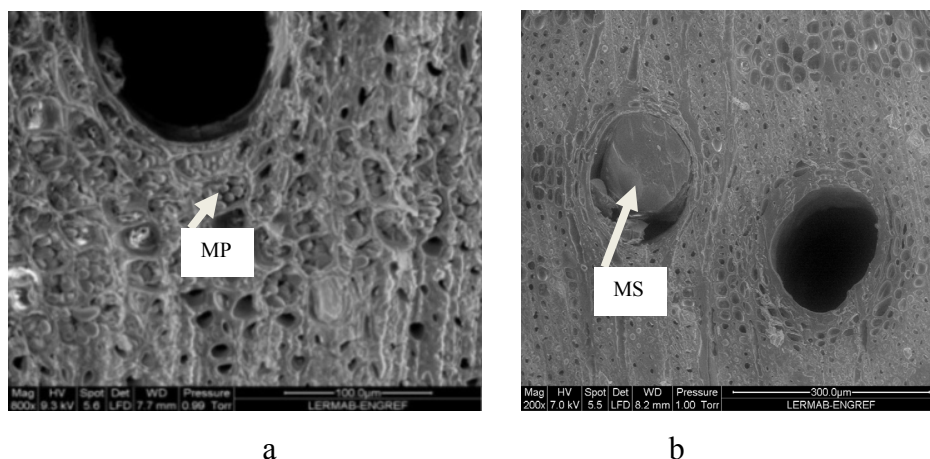


Figure 69. image du vène au microscope électronique montrant des métabolites primaires (MP) ou substances de réserves dans l'aubier (a) et des métabolites secondaires (MS) dans le duramen (b)

Les tableaux 9 et 10 donnent les résultats de l'analyse quantitative des extraits selon la provenance et la position radiale dans l'arbre. Ces résultats montrent que le taux d'extraction totale diffère significativement d'une région à l'autre et de l'intérieur vers la périphérie dans l'arbre. Ainsi, au niveau du duramen, le taux d'extrait est plus important chez les bois en région guinéenne (19,46 %) que chez ceux de la région soudanienne (15,50 %) mais quelle que soit la provenance, il augmente de la moelle vers le duramen externe (transition aubier-duramen) et est suivi d'une réduction considérable dans l'aubier. Il faut cependant noter qu'au niveau de l'aubier le taux d'extraction totale varie peu d'une région géographique à l'autre (6,2 % en zone guinéenne contre 5,8 % en zone soudanienne).

Les résultats montrent aussi que le taux d'extraits à l'eau chaude est moins abondant et peu variable d'une région géographique à l'autre mais dans l'arbre le taux est légèrement supérieur dans le DE que dans le DI et dans le DM qui présentent des taux similaires (4 % contre 2,8 % et 3,1 %). En revanche, le taux d'extraits à l'alcool-toluène présente des valeurs plus élevées chez les spécimens issus de la région guinéenne que chez ceux de la région soudanienne (16,2 % contre 11,9 %) et des taux allant de 9 % à 12 % près de la moelle à 12 % à 16 % dans le duramen médian et de 15 % à 19% dans le duramen externe. Dans l'aubier, les taux obtenus à l'éthanol-toluène montrent des valeurs considérablement inférieures aux taux obtenus à l'eau chaude (1,5 % contre 4,3 % en région soudanienne et 1,9 % contre 5,3 % en région guinéenne). Ce qui signifie que dans l'aubier les métabolites secondaires qui ont une affinité pour l'eau chaude sont plus abondante que ceux qui ont une affinité pour l'éthanol-toluène. Ainsi, l'aubier, partie physiologiquement vivante de l'arbre, renfermerait plutôt plus de

monosaccharides, d'amidon et des matières pectiques qui sont solubles dans l'eau chaude que de matières phénoliques ou des acides gras généralement solubles dans les solvants organiques (l'alcool, l'éther ou l'acétone) (Fengel et Wegener 1984). Les résultats du présent travail confirment ainsi ceux des travaux antérieurs (Imamura 1989, Nepveu 1994, Holmbolm 1999, Gominho *et al* 2001) selon lesquels la teneur et la composition en extraits varie en fonction du site géographique et des conditions du milieu. Quant à la variabilité intraarbre nos résultats concordent avec ceux des travaux similaires effectués par d'autres auteurs tels que Gominho *et al* (2001), Gierlinger *et al* (2004) etc.

Tableau 9. Teneur en extraits (à l'éthanol-toluène plus l'eau chaude, à l'éthanol-toluène et à l'eau chaude) du bois de vène par provenance et par position radiale dans l'arbre

Teneur en extraits (%)	<i>DI</i>	<i>DM</i>	<i>DE</i>	<i>Moyenne/prov</i>	<i>Aubier</i>
Extraction totale :					
Prov. Guin.	14,6 (1,3)	19,3 (2,4)	24,5 (3,1)	19,5 (4,7)	6,2 (1,6)
Prov. Soud.	12,1 (2,0)	15,2 (2,2)	18,1 (1,2)	15,1 (3,0)	5,8 (2,0)
Ethanol-toluène :					
Prov. Guin.	12,1(1,9)	16,3 (2,4)	20,3 (2,6)	16,2 (4,0)	1,9 (0,9)
Prov. Soud.	9,1 (2,05)	12 (2,5)	14,7 (14)	11,9 (3,1)	1,5 (0,8)
Eau chaude :					
Prov. Guin.	2,5 (1,06)	3 (0,6)	4,2 (1,1)	3,2 (1,2)	5,3 (1,5)
Prov. Soud.	3 (0,3)	3,2 (0,9)	3,4 (0,6)	3,2 (0,6)	4,3 (1,4)

Extraction totale = extraction à l'éthanol-toluène plus l'eau chaude

Tableau 10 Analyse de la variance sur la variabilité de teneur en extraits

Sources de variation	Valeur de <i>P</i>		
	<i>Extraction totale</i>	<i>Extraction à l'éthanol-toluène</i>	<i>Extraction à l'eau chaude</i>
Provenance	< 0,001	< 0,001	NS
Position radiale			
DI × DM	= 0,001	= 0,005	NS
DI × DE	< 0,001	< 0,001	= 0,030
DM × DE	= 0,001	= 0,008	NS
Interaction			
Prov. × Pos.rad	NS	NS	NS

NS = non significatif à $p \leq 0,05$;

4.1.4 Conclusion

La variation des caractères anatomiques et du taux d'extractibles selon la provenance géographique et selon la direction radiale à l'intérieur de l'arbre a été mise en évidence en vue de pouvoir expliquer certaines variabilités des propriétés physiques et mécaniques du bois de vène et de justifier certaines adéquations de mise en œuvre. L'analyse de cerne, l'analyse qualitative et quantitative de la structure anatomique et la quantification des extraits selon la provenance géographique et selon la direction radiale

dans l'arbre ont été ainsi effectuées. Les résultats obtenus ont conduit aux conclusions suivantes :

- L'accroissement moyen est de 4,9 mm/an en région guinéenne contre 2,8 mm/an en zone soudanienne. Ainsi, le vene en région guinéenne nécessite 87,5 ans pour atteindre un diamètre d'exploitation de 35 cm contre 125 ans en zone soudanienne. Mais dans l'arbre, l'accroissement annuel déterminé par classe d'âge montre que les cernes les plus larges se situent dans la première tranche d'âge (0-25 ans) puis ils décroissent progressivement vers la périphérie de l'arbre.
- Les composantes densitométriques montrent des valeurs significativement supérieures chez les spécimens issus de la région climatique guinéenne que chez ceux de la région soudanienne. Mais pour ce qui concerne la position radiale dans l'arbre les composantes de densité augmentent de la moelle vers la zone de transition duramen-aubier puis chutent considérablement dans l'aubier mais elles restent tout de même supérieures aux valeurs mesurées près de la moelle et cela quelle que soit la provenance géographique.
- Les dimensions et la proportion des principaux caractères anatomiques (la longueur et la proportion des fibres, le diamètre et la proportion des vaisseaux, le nombre de vaisseaux par mm², la proportion des cellules de parenchyme etc.) diffèrent significativement d'une région à l'autre. Au sein de l'arbre elles varient de la moelle vers le duramen médian au delà duquel elles restent stables jusqu'au duramen externe. Cependant, la hauteur des rayons demeure peu variable d'une région à l'autre et de la moelle vers la périphérie.
- Le taux d'extraction totale et le taux d'extrait à l'éthanol-toluène dans le duramen ont présenté des valeurs plus élevées chez les bois en région guinéenne (19,46 % et 16,2 %) que chez ceux de la région soudanienne (15,50 % et 11,9 %) mais quelle que soit la provenance, il augmente de la moelle vers le duramen externe (transition aubier-duramen) suivie d'une réduction considérable dans l'aubier.
- Dans l'aubier, le taux d'extraction total varie peu d'une région géographique à l'autre (6,2 % en zone guinéenne contre 5,8 % en zone soudanienne) mais les taux obtenus à l'éthanol-toluène montrent des valeurs considérablement

inférieures aux taux obtenus à l'eau chaude (1,5 % contre 4,3 % en région soudanienne et 1,9 % contre 5,3 % en région guinéenne).

- Le taux d'extraits à l'eau chaude est non seulement moins abondant, peu variable d'une région géographique à l'autre mais légèrement plus important dans le DE que dans le DI et dans le DM.

4.2 Variation des propriétés physico-mécaniques du bois de vène

Ce sous-chapitre présente les résultats de la variation des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de vène selon la région géographique de provenance et les 3 positions de localisation radiale dans l'arbre (le duramen interne-DI, le duramen médian - DM et le duramen externe -DE).

4.2.1 Le module d'élasticité et les propriétés acoustiques du bois de vène

Les tableaux 11 et 12 récapitulent les résultats de l'analyse statistique effectuée sur les valeurs du module d'élasticité et des propriétés acoustiques du bois de vène. A la lecture de ces résultats, il ressort que le module d'élasticité et les propriétés acoustiques diffèrent significativement entre la provenance et entre la position de localisation radiale dans l'arbre. En effet, le module dynamique spécifique et le module dynamique d'élasticité sont significativement supérieurs chez les spécimens provenant de la région guinéenne que chez ceux de la région soudanienne. Quant au coefficient d'amortissement, il est significativement plus élevé chez les spécimens de la région Soudanienne que chez les spécimens de la région Guinéenne. Cependant, les résultats montrent aussi que, hormis le module spécifique qui présente des valeurs légèrement supérieures dans le duramen externe que dans le duramen médian, les valeurs du coefficient d'amortissement et du module dynamique déterminées sur les échantillons issus du duramen médian et du duramen externe ne présentent pas de différences significatives. En d'autres termes, seule la zone de bois juvénile (DI) se distingue des autres zones. Les différences de modifications d'ordre qualitatif et quantitatif de la structure anatomique et des extraits liées à la différence des conditions de croissance et

du patrimoine génétique pourraient expliquer la variabilité entre provenance des caractéristiques mécaniques mesurées. C'est dire que la structure qui résulte de l'activité cambiale peut être considéré tributaire d'un ensemble de facteurs qui englobent les conditions climatiques annuelles, la nature du sol, l'environnement et le patrimoine génétique individuel et dont l'influence cumulée peut conduire à une variabilité considérable des caractéristiques physiques et mécaniques du bois. En revanche la variabilité intraarbre de ces caractéristiques pourrait s'expliquer par les modifications d'ordre qualitatif et quantitatif de la structure anatomique et des extraits liées à l'âge cambial. Autrement dit, la variabilité des caractéristiques mécaniques dans l'arbre serait liée d'une part aux propriétés structurelles (dimension et proportion des tissus constitutifs) et aux propriétés de la paroi cellulaire (Brancheriau et Détienne 2006 ; Bucur 2006) et d'autre part à la variation de teneur en extrait et de densité (Bremaud 2006 ; Obataya et al 1999 ; Matsunaga et al 1996) qui caractérise le bois selon la localisation radiale dans l'arbre.

Table 11. Valeurs moyennes et écart type (entre parenthèse) du module d'élasticité et des propriétés acoustiques par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène

Paramètres	DI	DM	DE	Moyenne/prov
E_L/ρ (MPa.m ³ /kg)				
Prov. Guin.	15,40 (0,87)	17,00 (0,73)	17,50 (1,20)	17,00 (1,39)
Prov. Soud.	13,70 (4,20)	15,20 (4,32)	15,50 (1,50)	14,80 (1,45)
$\tan\delta$				
Prov. Guin.	0,0095 (0,0007)	0,0075 (0,0003)	0,0075 (0,0005)	0,0080 (0,0011)
Prov. Soud.	0,0120 (0,0007)	0,00950 (0,0012)	0,0085 (0,0007)	0,0100 (0,0017)
E_L (GPa)				
Prov. Guin.	13,50 (0,66)	15,20 (0,46)	15,80 (0,70)	14,80 (1,16)
Prov. Soud.	11,60 (0,69)	13,30 (0,75)	13,70 (1,64)	13,00 (1,26)

Tableau 12. Analyse de la variance sur la variabilité du module d'élasticité et des propriétés acoustiques du bois de vène

Sources de variation	Valeur de P		
	E_L	$\tan\delta$	E_L/ρ
Provenance	= 0,015	< 0,001	< 0,001
Position radiale			
DI × DM	< 0,001	< 0,001	= 0,002
DI × DE	< 0,001	< 0,001	< 0,001
DM × DE	NS	NS	= 0,044
Interaction			
Prov. × Pos.rad	NS	NS	NS

NS = non significatif à $p \leq 0,05$;

4.2.2 L'infradensité

Il faut rappeler que l'infradensité (ID), exprimée ici en g/m^3 correspond à la quantité de matière sèche contenue dans un volume de bois saturé. Ce paramètre indépendant des variations d'humidité du bois est par contre très influencé par la structure anatomique et les métabolites secondaires.

Les tableaux 13 et 14 donnent les variations de l'infradensité dans l'arbre et selon l'origine géographique de provenance chez le bois de vène du Mali. Ces résultats montrent que l'infradensité diffère significativement entre la provenance et entre la position de localisation radiale dans l'arbre. D'une part les valeurs de l'infradensité sont significativement plus élevées en zone climatique guinéenne qu'en zone climatique soudanienne (0,80 contre 0,74) et d'autre part elles augmentent significativement de la moelle vers le duramen externe. Il est vraisemblable que cette variation entre station de l'infradensité soit la conséquence directe des modifications anatomiques et de la teneur en composés extractibles résultants de la différence de conditions de croissance des arbres et de leur patrimoine génétique qui n'a pas été abordé dans le présent travail. Des études similaires effectuées par Keller et al (1976) ont montrées un effet stationnel très net sur la densité du bois de hêtre. Selon cet auteur, tous les facteurs écologiques qui diminuent la fertilité des stations, diminuent également la densité. Hernandez et Restrepo (1995) ont trouvé chez *Alnus acuminata* H.B.K. de Colombie des variations considérables de densité selon la provenance géographique (de l'ordre de 314 kg/m^3 à 409 kg/m^3). Piedra and Zobel (1986) ont trouvé une variation de densité de 0,51 à 0,56 avec une tendance croissante de l'ouest vers l'est chez *Pinus tecunumanii* du Guatemala. En revanche, l'augmentation radiale de la densité pourrait s'expliquer par les modifications anatomiques dues au vieillissement du cambium (épaississement des parois, réduction de la porosité etc.) associé à la différence de teneur en extraits qui augmente de la moelle vers la zone de transition duramen – aubier. Ces résultats confirment ceux de Thibaut et al (1997) qui ont trouvé chez le *Gmelina* et le *Pinus kesiya* une augmentation significative de la densité du cœur vers la périphérie.

Tableau 13. Valeurs moyennes et écart type (entre parenthèse) de l'infradensité par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène

Infradensité	DI	DM	DE	Moyenne/prov.
ID (g/cm^3)				
Prov. Guin.	0,75 (0,03)	0,80 (0,04)	0,85 (0,07)	0,80 (0,06)
Prov. Soud.	0,70 (0,04)	0,75 (0,03)	0,78 (0,02)	0,74 (0,05)

Tableau 14. Analyse de la variance sur la variabilité de l'infradensité du bois de vène

Sources de variation	Valeur de <i>P</i>
Provenance	= 0,005
Position radiale	< 0,001
DI × DM	= 0,011
DI × DE	< 0,001
DM × DE	= 0,043
Interaction	
Prov. × pos.rad	NS

NS = non significatif à $p \leq 0.05$;

4.2.3 Le retrait à l'échelle macroscopique

Les tableaux 15 et 16 donnent les résultats des analyses statistiques effectuées sur les variations du retrait tangentiel, du retrait radial du retrait volumique et de l'anisotropie du retrait selon la position de localisation radiale dans l'arbre et selon l'origine géographique de provenance du bois de vène au Mali. De ces tableaux, il ressort que les valeurs du retrait et de l'anisotropie du retrait demeurent quasiment invariables tant à l'échelle de la provenance qu'à l'échelle intraarbre c'est-à-dire du duramen interne vers le duramen externe. Ce qui paraît étonnant d'autant plus que le vieillissement du cambium (l'âge cambial) dans l'arbre et la différence des conditions de croissance sont connus pour leur impact considérable sur les propriétés du bois (Keller 1976, Tsoumis et Panagiotidis 1980, Leclercq 1982 et 1983, Bhat *et al* 1990, Nepveu 1994, Bhat and Priya 2004). Cette constance des valeurs du retrait pourrait probablement être attribuée à la forte teneur en extraits du bois de vène qui pourrait limiter l'effet direct des modifications anatomiques liées aux conditions de croissance et au vieillissement du cambium (modification de l'angle des microfibrilles, de l'épaisseur des parois cellulaires, de la proportion des vaisseaux etc.) sur le retrait. En effet les extraits sont bien connus pour leur capacité à renforcer la stabilité du bois. Ils affectent ainsi le comportement hygroscopique général du bois et les espèces à haute teneur en extraits se caractérisent par de faibles coefficients de rétractibilité et de faibles valeurs du point de saturation (Hernández 1989, 2007a and 2007b; Arévalo 2002 ; Wangaard and Granados 1967; Skaar 1988; Nzokou). Remarquons cependant que le retrait longitudinal n'a pas été mesuré dans notre étude, alors qu'il est connu que c'est le retrait selon cette direction qui est plus grand dans le bois juvénile.

Tableau 15. Valeurs moyennes et écart type (entre parenthèse) du retrait par provenance et par position radiale dans l'arbre du bois de vène

Retrait	DI	DM	DE	Moyenne/prov.
<i>Rt (%)</i>				
Prov. Guin.	5,34 (1,18)	5,66 (0,58)	5,61(1,15)	5,53 (0,95)
Prov. Soud.	5,48 (0,85)	5,54 (1,05)	5,28 (1,14)	5,43 (0,95)
<i>Rr (%)</i>				
Prov. Guin.	3,12 (1,01)	3,11 (0,65)	3,01 (0,47)	3,08 (0,69)
Prov. Soud.	3,02 (0,58)	3,16 (0,70)	3,05 (0,91)	3,07 (0,69)
<i>Rv (%)</i>				
Prov. Guin.	8,46 (2,07)	8,77 (1,17)	8,62 (1,54)	8,62 (1,50)
Prov. Soud.	8,51 (1,25)	8,70 (1,70)	8,33 (1,91)	8,50 (1,53)
<i>Aniso.du retrait</i>				
Prov. Guin.	1,79 (0,44)	1,86 (0,27)	1,86 (0,22)	1,84 (0,30)
Prov. Soud.	1,85 (0,35)	1,77 (0,20)	1,79 (0,38)	1,80 (0,30)

Tableau 16. Analyse de la variance sur la variabilité du retrait du bois de vène

Sources de variation	Valeur de P			
	<i>Retrait tangentiel Rt</i>	<i>Retrait radial Rr</i>	<i>Retrait volumique Rv</i>	<i>Anisotropie du retrait Rt/Rr</i>
Provenance	NS	NS	NS	NS
Position radiale				
DI × DM	NS	NS	NS	NS
DI × DE	NS	NS	NS	NS
DM × DE	NS	NS	NS	NS
Interaction				NS
Prov. × Pos.rad	NS	NS	NS	NS

NS =non significatif à $p \leq 0,05$; Rt – retrait tangentiel ; Rr –retrait radial ; Rv – retrait volumique

4.2.4 Conclusion

La variation de la qualité du bois de vène a été déterminée en comparant les valeurs du module dynamique, du module spécifique, du coefficient d'amortissement, de l'infradensité et du retrait volumique selon deux provenances géographiques et 3 positions radiales dans l'arbre (le duramen interne-DI, le duramen médian - DM et le duramen externe -DE). Au regard des résultats on peut conclure que :

- Le module dynamique d'élasticité présente des valeurs significativement supérieures chez les spécimens provenant de la région guinéenne que chez ceux de la région soudanienne. Dans l'arbre et quelle que soit la provenance, ces valeurs restent plus faibles dans le duramen interne que dans le duramen médian à partir duquel elles restent stables jusqu'au duramen externe.
- Le bois issu de la région climatique soudanienne est plus amortissant que celui issu de la région climatique guinéenne. Dans l'arbre, l'amortissement est plus

important dans le duramen interne (portion de bois juvénile) que dans le duramen médian mais il reste stable entre le duramen médian et le duramen externe.

- Le module spécifique est plus élevé chez les spécimens provenant de la région guinéenne que chez ceux de la région soudanienne et augmente significativement du duramen interne au duramen externe.
- L'infradensité diffère significativement d'une provenance à l'autre et d'une position de localisation radiale à l'autre dans l'arbre. En effet les valeurs de l'infradensité sont significativement plus élevées chez les spécimens issus de la région climatique guinéenne que chez leurs homologues de la région climatique soudanienne et dans l'arbre elles augmentent significativement de la moelle vers le duramen externe.
- Les valeurs du retrait et de l'anisotropie du retrait varient peu d'une provenance à l'autre et du duramen interne vers le duramen externe.

4.3 Effet des caractères anatomiques et des extraits sur les propriétés physiques et mécaniques du bois de vène

L'objectif poursuivi ici est de rechercher une relation entre les caractéristiques anatomiques associées à la teneur en extraits (à l'éthanol-toluène plus à l'eau chaude) et les propriétés mécaniques déterminées. Pour cela, les mesures anatomiques, chimiques et physiques ont été effectuées sur les mêmes échantillons ayant servis à déterminer les caractéristiques mécaniques. Compte tenu de la multiplicité des variables explicatives, la régression multiple et la corrélation simple ont servi de modèle mathématique d'analyse des données. Ainsi, les relations mathématiques basées sur la corrélation simple et la régression ont été appliquées. L'équation de la régression multiple qui précise la qualité de la relation (R^2) et l'influence de chacune des variables explicatives via le coefficient de régression standardisé sont consignés dans les tableaux 18 et 19 tandis que les coefficients de corrélation simple définissant les liaisons entre les variables explicatives (paramètres anatomiques et chimique) et les variables expliquées (propriétés mécaniques et physiques) sont résumés dans le tableau 17.

Tableau 17. Corrélation de Pearson

Paramètres	Valeur de P								
	E_L	$\tan\delta$	E_L/ρ	ID	Rv	LC	TE	LF	EF
E_L	1	**	**	**	NS	NS	**	**	**
$\tan\delta$	-0,84	1	**	**	NS	NS	**	**	NS
E_L/ρ	0,80	-0,82	1	**	NS	NS	**	**	NS
ID	0,77	-0,64	0,78	1	NS	NS	**	**	*
Rv	-0,06	0,10	-0,08	-0,09	1	NS	NS	NS	NS
LC	-0,21	0,11	0,01	-0,07	0,11	1	NS	NS	*
TE	0,78	-0,73	0,79	0,67	0,07	0,18	1	**	**
LF	0,73	-0,73	0,70	0,61	-0,05	-0,08	0,70	1	**
EF	0,50	-0,37	0,32	0,46	0,009	-0,43	0,50	0,47	1
DLF	-0,46	0,18	-0,26	-0,37	0,06	0,52	-0,30	-0,18	-0,25
nV/mm^2	-0,77	0,78	-0,77	-0,64	-0,01	0,36	-0,74	-0,57	-0,45
R/mm	0,49	-0,58	0,43	0,35	0,03	-0,37	0,53	0,52	0,28
PF	0,67	-0,71	0,70	0,56	0,03	0,05	0,70	0,66	0,32
PV	-0,53	0,51	-0,50	-0,56	-0,06	-0,13	-0,53	-0,64	-0,58
PPA	-0,52	0,58	-0,38	-0,42	-0,12	0,07	0,47	-0,44	-0,23

** - significatif à $p \leq 0,001$; * - significatif à $p \leq 0,05$;

Tableau 17 (suite)

Paramètres	Valeur de P						
	EF	DLF	nV/mm^2	R/mm	PF	PV	PPA
E_L	**	*	**	**	**	**	**
$\tan\delta$	NS	NS	**	**	**	**	**
E_L/ρ	NS	NS	**	NS	**	**	NS
ID	*	NS	**	NS	**	**	NS
Rv	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LC	*	**	NS	NS	NS	NS	NS
TE	**	NS	**	**	**	**	**
LF	**	NS	**	**	**	**	NS
EF	1	NS	NS	NS	NS	**	NS
DLF	-0,25	1	NS	NS	NS	NS	NS
nV/mm^2	-0,45	0,40	1	NS	**	**	**
R/mm	0,28	-0,35	-0,45	1	NS	**	NS
PF	0,32	-0,07	-0,75	0,29	1	**	**
PV	-0,58	0,20	0,49	-0,47	-0,49	1	**
PPA	-0,23	0,03	0,52	-0,35	-0,55	0,48	1

** - significatif à $p \leq 0,001$; * - significatif à $p \leq 0,05$;

E_L - Module dynamique d'élasticité, $\tan\delta$ - coefficient d'amortissement, E_L/ρ - Module dynamique spécifique, ID - Infradensité, Rt - Retrait tangentiel, Rr - Retrait radial, Rv - Retrait volumique, LC - Largeur de cerne, TE - Teneur en extrait, LF - Longueur des fibres, EF - Epaisseur des fibres, DLF - diamètre des lumens des fibres, nV/mm^2 - Nombre de vaisseaux par mm, R/mm - Nombre de rayon par mm, PF - Proportion des fibres, PV - Proportion des vaisseaux, PPA - Proportion du parenchyme axial.

Tableau 18. Equations de régression multiple

Equations de regression multiple	R^2 (%)	P
$E_L = 12260,46 + 81,32TE + 3,18LF + 35,51EF - 584,41nV/mm^2 - 1,40R/mm + 21,96PF - 47,30PV - 82,58PPA$	75,60	<0,05
$\tan\delta = 0,015 - 0,000015TE - 0,0000035LF + 0,00073nV/mm^2 - 0,00013R/mm - 0,0000404PF + 0,000085PV + 0,00015PPA$	77,6	<0,05
$E_L/\rho = 10,02 + 0,14TE + 0,003LF - 0,73nV/mm^2 + 0,024PF - 0,030PV$	73,3	<0,05
$ID = 0,80 + 0,0041TE + 0,000075LF - 0,020nV/mm^2 + 0,00068PF - 0,0045PV$	54,4	<0,05

Tableau 19. Valeurs du coefficient de regression normalisés

<i>Variables</i>	<i>TE</i>	<i>LF</i>	<i>EF</i>	<i>nV/mm²</i>	<i>R/mm</i>	<i>PF</i>	<i>PV</i>	<i>PPA</i>
<i>E_L</i>	0,27	0,35	0,09	-0,37	-0,002	0,07	-0,08	-0,10
<i>tanδ</i>	-0,04	-0,32	-	0,39	-0,19	-0,11	-0,12	0,15
<i>E_L /ρ</i>	0,35	0,25	-	-0,35	-	0,06	-0,04	-
<i>ID</i>	0,28	0,05	-	0,17	-	0,18	-0,28-	-

4.3.1 Effet sur le module d'élasticité

Au regard du tableau de corrélation simple (tableau 17), le module d'élasticité est significativement corrélé ($P < 0,001$) aussi bien avec la teneur en extrait (TE), la longueur des fibres (LF) l'épaisseur de la paroi cellulaire (EF), la proportion des fibres (PF) qu'avec le nombre de vaisseaux par mm² (V/mm²), la proportion des vaisseaux (PV), le nombre de rayon par mm (R/mm) et la proportion du parenchyme axial (PPA). L'analyse de la régression multiple décrivant la meilleure relation entre le module d'élasticité et ces 8 variables fait ressortir selon la valeur des coefficients de régression standardisés (Tableau 18) et l'équation de régression ci-dessous l'ampleur des effets relatifs à chaque variable explicative.

$$E_L = 12260,46 + 81,32TE + 3,18LF + 35,51EF - 584,41V/mm^2 - 1,40R/mm + 21,96PF - 47,30PV - 82,58PPA \quad (R^2 = 0,75)$$

L'analyse de la régression linéaire multiple montre que les variables explicatives les plus influentes qui affectent positivement le module d'élasticité, sont en premier lieu la longueur des fibres (figure 70) et la teneur en extraits (figure 72) tandis qu'au second plan interviennent la proportion des fibres et l'épaisseur des parois cellulaires. En revanche la variable explicative qui affecte le plus négativement le module d'élasticité est le nombre de vaisseaux par mm² (figure 71), ce qui se comprend aisément. La réduction accrue de la porosité associée à l'augmentation de la longueur des fibres et de la teneur en extraits, seraient donc responsables de la différence de module entre les provenances et entre les 3 positions de localisation radiale dans l'arbre.

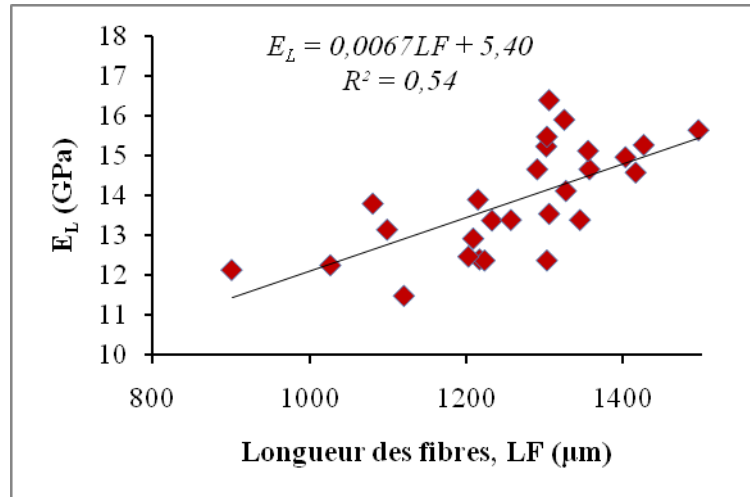


Figure 70. Module dynamique d'élasticité vs. Longueur des fibres

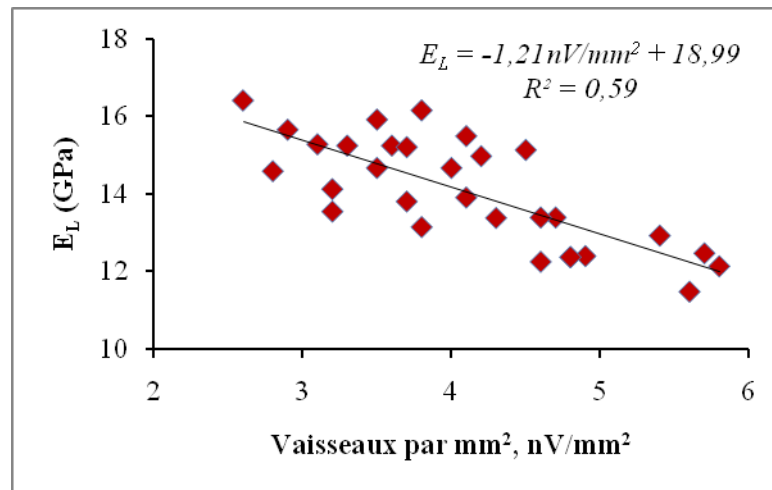


Figure 71. Module dynamique d'élasticité vs. Nombre de vaisseaux par mm²

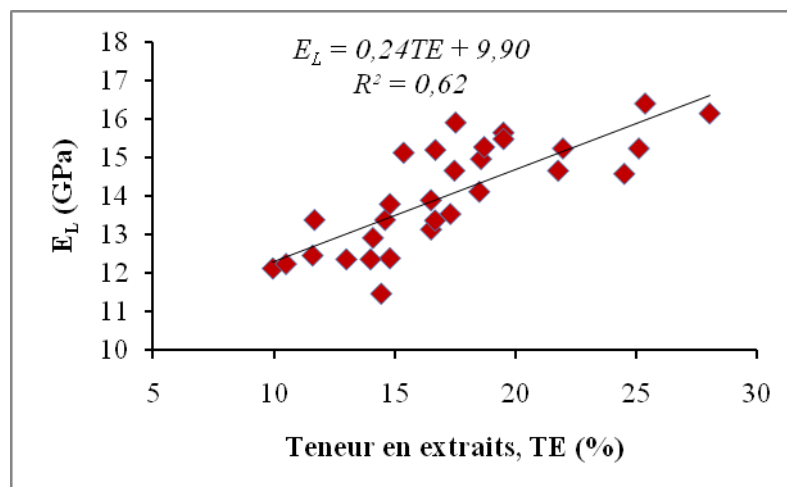


Figure 72. Module dynamique d'élasticité vs. Teneur en extraits

4.3.2 Effet sur les propriétés acoustiques

4.3.2.1 Le module dynamique spécifique

Au regard du tableau de corrélation simple, le module dynamique spécifique est corrélé significativement aussi bien avec la teneur en extraits, la longueur des fibres, la proportion des fibres qu'avec la proportion des vaisseaux et du nombre de vaisseaux par mm^2 ($P < 0,001$; tableau 17). On retrouve ici principalement les mêmes variables explicatives que pour le module d'élasticité ; ce qui est d'ailleurs logique. Le tableau 17 montre que le module dynamique spécifique est en effet positivement affecté par la teneur en extraits, la longueur des fibres et la proportion des fibres et négativement affecté par la proportion des vaisseaux et le nombre de vaisseaux par mm^2 . L'équation de la régression multiple linéaire montre que le module dynamique spécifique est expliqué avec une précision très satisfaisante ($R^2 = 0,73$) par l'effet de ces 5 variables selon la relation suivante :

$$E_L/\rho = 10,02 + 0,14TE + 0,003LF - 0,73 V/\text{mm}^2 + 0,024PF - 0,030PV \quad (R^2 = 0,73).$$

Au regard des coefficients de régression standardisés, les variables explicatives les plus influentes qui affectent positivement le module dynamique spécifique sont la longueur des fibres et la teneur en extraits (figure 73 et 75) tandis que négativement il est le plus affecté par le nombre de vaisseaux par mm^2 (figure 74).

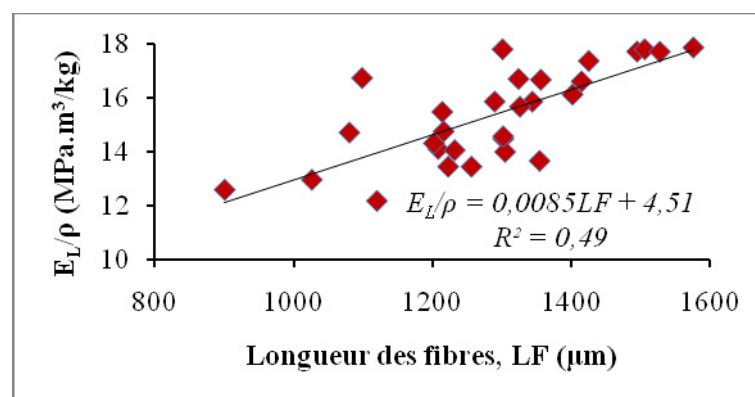


Figure 73. Module dynamique spécifique vs. Longueur des fibres

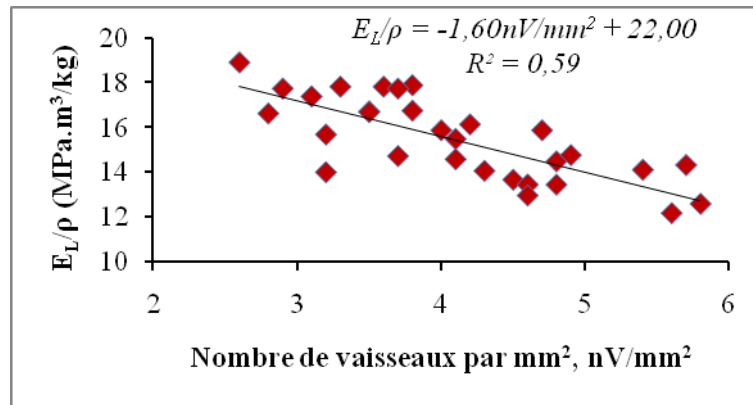


Figure 74. Module dynamique spécifique vs. Nombre de vaisseaux par mm²

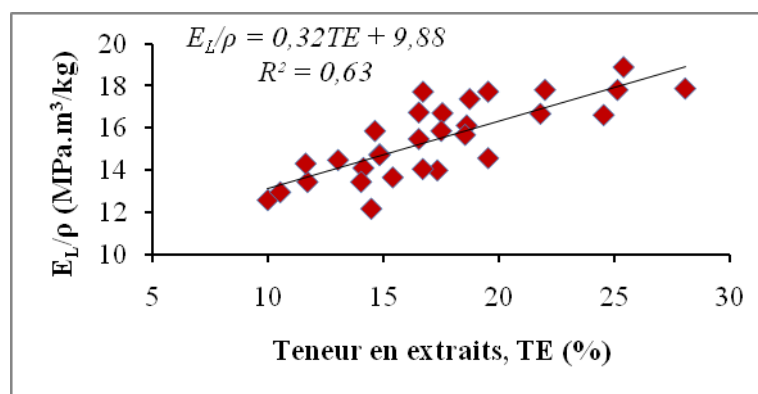


Figure 75. Module dynamique spécifique vs. Teneur en extraits

4.3.2.2 Le coefficient d'amortissement

Le tableau de corrélation simple préalablement établi montre que le coefficient d'amortissement est significativement corrélé avec la teneur en extrait, la longueur des fibres, la proportion des fibres, la proportion des vaisseaux, la proportion du parenchyme axial ainsi qu'avec le nombre de vaisseaux par mm² et le nombre de rayon par mm ($P < 0,001$; tableau 17). L'équation de la régression linéaire multiple ci-dessous qui donne la meilleure relation entre les variables explicatives et la variable expliquée fait ainsi intervenir l'effet de 8 variables explicatives pour estimer avec une précision satisfaisante ($R^2 = 0,77$) la variation du coefficient d'amortissement :

$$\text{Tan}\delta = 0,015 - 0,000015\text{TE} - 0,0000035\text{LF} + 0,00073\text{V}/\text{mm}^2 + 0,00013\text{R}/\text{mm} - 0,0000404\text{PF} + 0,000085\text{PV} + 0,00015\text{PPA} \quad (R^2 = 0,77)$$

En effet le coefficient d'amortissement s'accroît avec le nombre de vaisseaux par mm², la proportion des vaisseaux, la proportion du parenchyme axial et le nombre de rayon

par mm et diminue avec la longueur des fibres, la teneur en extrait et la proportion des fibres. Mais à la lecture du tableau des coefficients de régression standardisés, il ressort que la variable qui affecte le plus et positivement le coefficient d'amortissement est le nombre de vaisseaux par mm² (figure 76) alors qu'il est le plus influencé négativement par la longueur des fibres (figure 77).

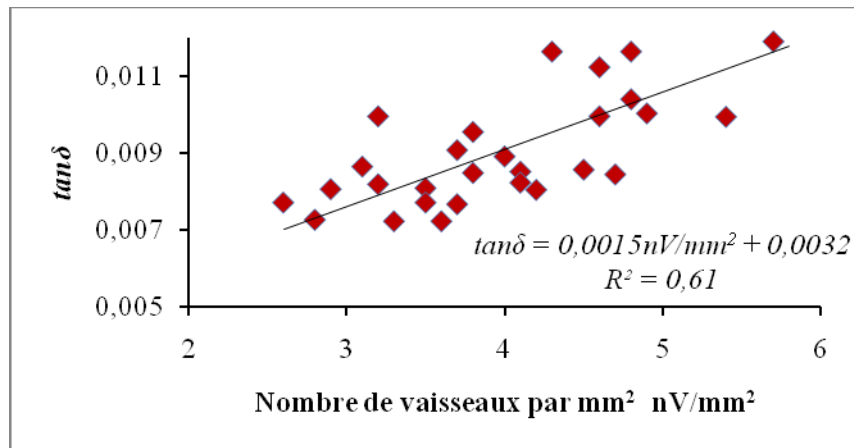


Figure 76. Coefficient d'amortissement vs. Nombre de vaisseaux par mm²

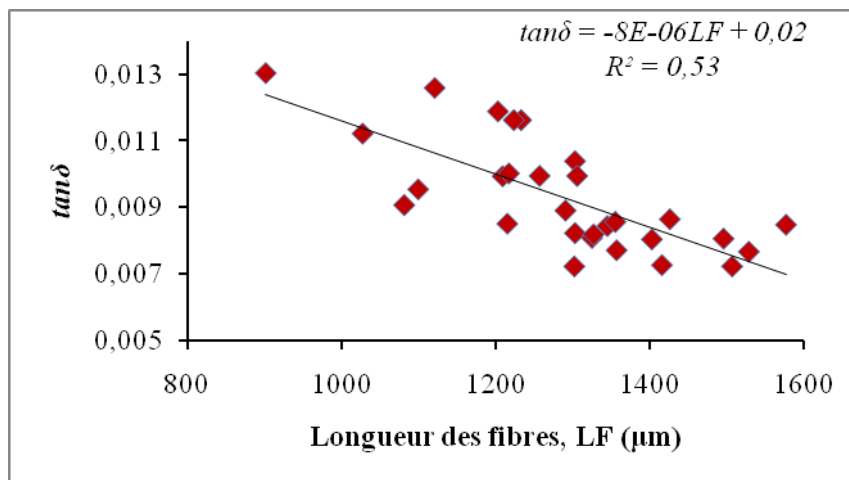


Figure 77. Coefficient d'amortissement vs. Longueur des fibres

4.3.2.3 Discussion

D'une manière générale, les caractères anatomiques influencent différemment les caractéristiques technologiques du bois. En effet l'effet négatif des vaisseaux sur le module dynamique et sur la qualité acoustique du bois de vène s'explique facilement par le fait que ces éléments constituent des vides dans la masse du bois et leur proportion élevée contribue à affaiblir mécaniquement celui-ci. Quant aux cellules de

parenchyme (axial et de rayons) leur l'effet (positif sur $\tan\delta$ et négatif sur E_L) s'explique par le fait qu'elles ont des parois très minces qui sont dépourvues de la couche secondaire S_2 si bien qu'elles ne disposent d'aucune résistance mécanique significative et constituent ainsi des plans de moindre résistance mécaniques du bois. Ainsi, plus ces cellules sont abondantes plus la qualité acoustique du bois pour la facture d'instrument xylophone est réduite. En revanche la longueur des fibres renforce l'anisotropie et est favorable à un module élevé dans la direction longitudinale et à un facteur d'amortissement plus faible.

Par ailleurs l'accroissement de la proportion des fibres et l'épaississement des parois entraînent un accroissement de la quantité de matière ligneuse ; principalement la cellulose qui par son orientation linéaire et les fortes liaisons hydrogènes et covalentes intra et intermaillons (unités) de glucose, renforcerait mécaniquement le bois dans le sens longitudinal (Fahlén et Salmén 2003). Autrement dit, les performances mécaniques du bois se renforceraient avec la longueur, la proportion et l'épaississement des fibres (Haluk 1983 ; Thomas 1981, Bergander et Salmén 2002). Ce qui pourrait donc expliquer l'effet positif de la proportion et de l'épaisseur des fibres sur le module élasticité et l'effet positif de la proportion des fibres sur la qualité acoustique du bois de vène.

Des études similaires effectuées par Branchériaux et al (2006) ont trouvé que la qualité acoustique peut être améliorée quand les vaisseaux restent peu nombreux ; mais que le parenchyme axial de type paratrachéal, moins abondant et des rayons courts, moins nombreux et homogènes constituent des caractères de qualité acoustique du bois. Leclercq (1979) a montré chez le hêtre que la compression axiale serait influencée positivement par la proportion, la longueur et l'épaisseur des parois des fibres tandis que la contrainte et l'effort maximum de rupture seraient influencés négativement par la proportion de vaisseaux. Selon Bhat & Priya (2004) la diminution des performances mécanique du bois de teck issus du milieu à croissance lente serait attribuée à la faible proportion en fibres.

Quant aux extraits, leur influence sur les propriétés mécaniques du bois a été rapporté par plusieurs auteurs (Hernandez 2007 ; Grabner et al 2005 ; Elijah et Breese 1997). Des travaux similaires effectués par (Bork 1985; Holz 1996, Bremaud 2006), ont montrés qu'un fort module dynamique, une forte teneur en extrait et une densité élevée sont des

qualités désirées des lames de xylophones. La teneur élevée en extrait contribuerait à améliorer la qualité acoustique du bois (Matsunaga et al 1999 and Bremaud 2006).

Un autre facteur dont l'influence sur les caractéristiques mécanique du bois est soulignée dans la littérature est l'angle des microfibrilles qui n'a pas été déterminé dans le présent travail. L'angle des microfibrilles, caractère pertinent dans l'évaluation de la qualité mécanique du bois (Zobel and Buijtenen 1989; Walker and Butterfield, 1996; Treacy et al 2000) peut aussi contribuer à expliquer la variabilité radiale des caractéristiques acoustiques du bois de vène. En effet le module d'élasticité, significativement corrélé avec le coefficient d'amortissement et le module dynamique spécifique (tableau 17), est dépendant de l'angle des microfibrilles qui diminue avec l'âge cambial (Zobel and Buijtenen 1989). Selon Obataya (2000), un faible angle des microfibrilles est la condition requise pour une excellente qualité sonore.

4.3.3 Effet sur l'infradensité

L'équation de régression multiple relative à la densité met en évidence l'influence significative ($P < 0,001$) de 5 variables explicatives : la teneur en extrait, la longueur des fibres, la proportion des fibres, le nombre de vaisseaux par mm^2 et la proportion des vaisseaux. Ces 5 variables permettent d'estimer l'infradensité avec une précision assez modeste de $R^2 = 0,54$.

$$ID = 0,80 + 0,0041TE + 0,000075LF - 0,020nV/\text{mm}^2 + 0,00068PF - 0,0045PV \quad (R^2 = 0,54)$$

Le calcul préalable des coefficients de corrélation simple montre que l'infradensité est significativement corrélé aussi bien avec la teneur en extrait, la longueur des fibres, la proportion des fibres qu'avec le nombre de vaisseaux par mm^2 et la proportion des vaisseaux. A la simple lecture de l'équation de régression multiple et du tableau des coefficients de régression standardisé on comprend aisément que l'infradensité croit le plus avec la teneur en extrait et la proportion des fibres et diminue considérablement avec la proportion des vaisseaux (figure 78, 79 et 80).

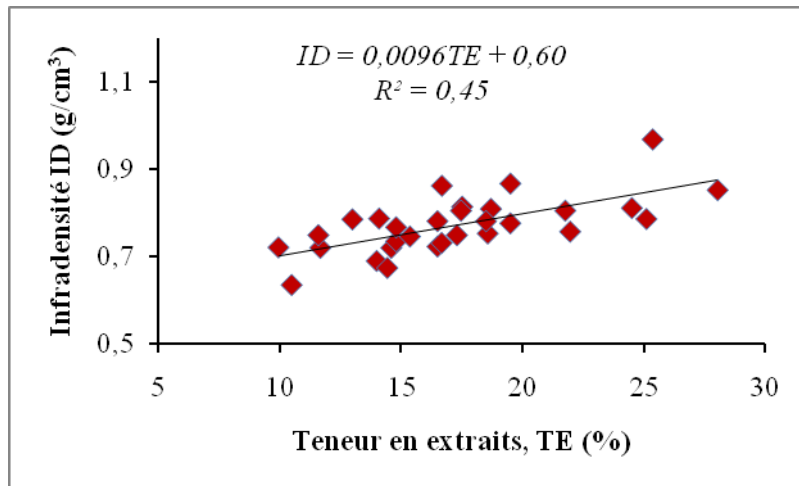


Figure 78. Infradensité vs. Teneur en extraits

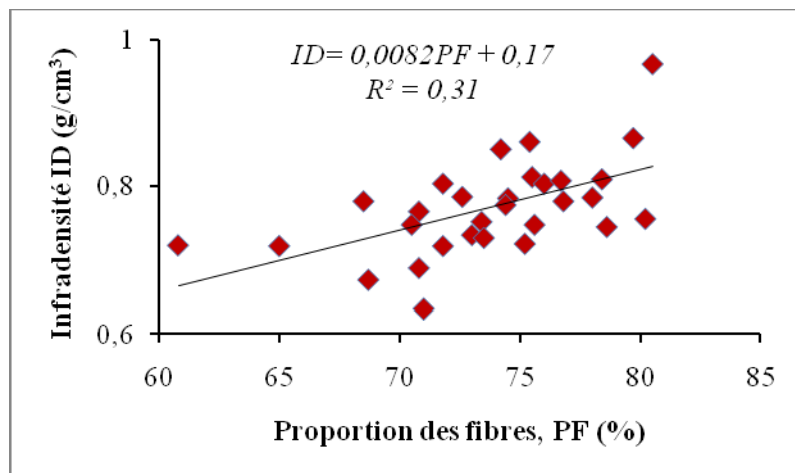


Figure 79. Infradensité vs. Proportion des fibres

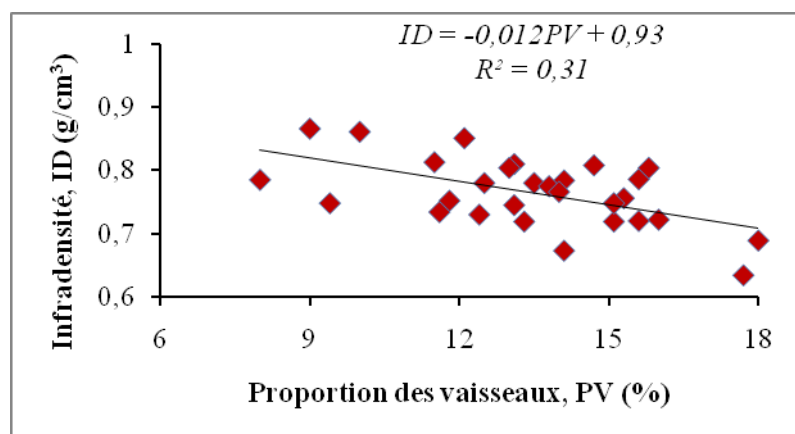


Figure 80. Infradensité vs. Proportion des vaisseaux

L'équation de la régression multiple montre aussi qu'une même valeur de densité peut résulter de valeurs différentes attribuées aux variables explicatives. Ce qui démontre qu'une même valeur de densité peut correspondre à des bois de structure et de propriétés mécaniques différentes. D'où souvent l'insuffisance de la densité à estimer avec précision la qualité du bois. Si l'effet positif des extraits et de la proportion des fibres sur la densité du bois est suffisamment documenté (Jodin 1994, Leclercq 1981; Rao et al 2002 ; Guilley et Nepveu 2003 ; Zobel and Buijtenen 1989 etc.), l'influence de la longueur des fibres demeure encore peu clair et mérite d'être élucidée. Pour comprendre l'effet négatif des vaisseaux et l'effet positif de la proportion des fibres il est important de souligner que la densité définit la quantité de matière par unité de volume. Ce qui signifie que, pour un même volume apparent de bois, l'accroissement du volume poreux, conditionné par la proportion des cavités cellulaires, entraîne automatiquement la diminution de la quantité de matière ligneuse défini par la proportion des parois cellulaires (Leclercq 1981). Ainsi, une augmentation de la proportion des fibres apporterait d'avantage de matière ligneuse principalement de la cellulose par unité de volume conduisant à la formation de bois plus dense. La forte corrélation des caractéristiques mécaniques avec la densité (figure 81 et 82) pourrait donc s'expliquer par la liaison qui existe entre la densité et les caractères comme la proportion des fibres, la teneur en extrait et la longueur des fibres.

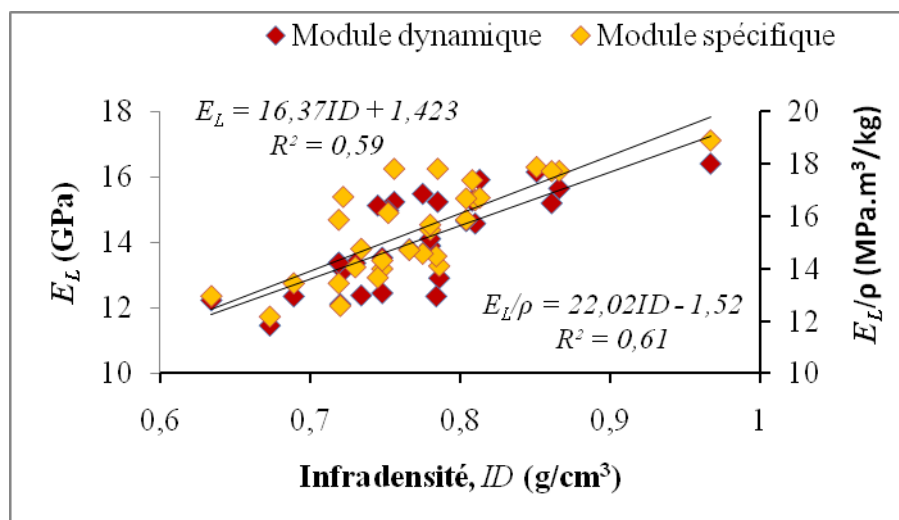


Figure 81. Module dynamique et module spécifique vs. Infradensité

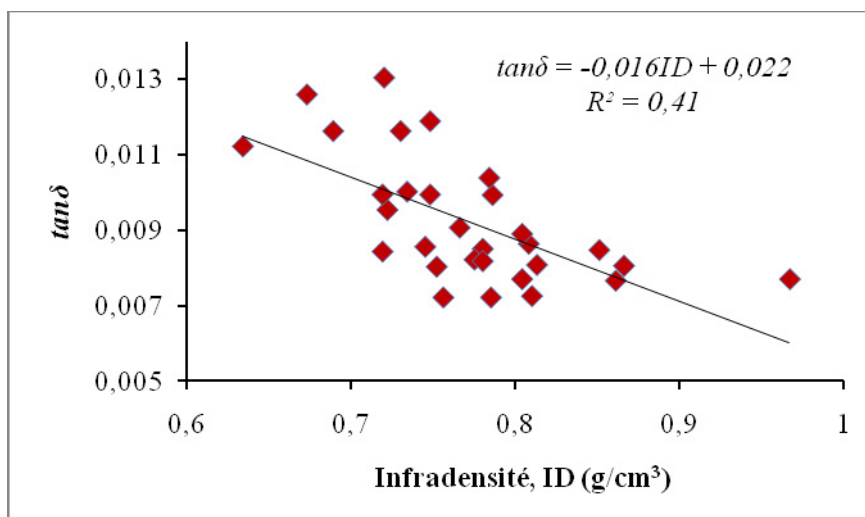


Figure 82. Coefficient d'amortissement vs. Infradensité

L'analyse quantitative des caractères anatomiques a montré une proportion de fibre globalement plus importante associée à une porosité (nombre de vaisseaux par mm²) plus réduite et à une teneur élevée en extraits chez les individus de la région guinéenne comparés à ceux de la région soudanienne. Ce qui pourrait expliquer la hausse de la densité chez les spécimens de la région guinéenne par rapport à ceux de la région soudanienne. Mais dans l'arbre, on assiste à une réduction de la porosité, un accroissement de la proportion des fibres associée à une augmentation substantielle de la teneur en extraits de la moelle vers le duramen externe. D'où l'augmentation de la densité du duramen interne vers le duramen externe. Des études similaires effectuées par Leclercq (1977) ont trouvé chez le hêtre que la masse volumique augmente avec des vaisseaux peu nombreux, et des fibres plus abondantes. Rao et al (2002) ont trouvé une corrélation positive de la densité avec la proportion des fibres et une corrélation négative avec la proportion des vaisseaux. Hannrup et al (2001) ont rapporté que la porosité du matériau bois contribue directement à la diminution de la densité. Les arbres ayant une densité du bois intrinsèquement faible ont donc tendance à se distinguer soit par une proportion de vaisseaux et des diamètres de vaisseaux plus élevé soit par une faible proportion de fibres (Guilley et Nepveu 2003).

Quant aux extraits, Zobel and Buijtenen (1989) rapportent que les extraits affectent considérablement la densité et la qualité finale du bois. Jodin (1994) souligne qu'un taux d'extraits élevé contribue à augmenter les valeurs de la densité. Thor (1964) trouve que la densité après extraction est de 2 à 20 % inférieure que celle avant extraction chez

Pinus virginiana. Grabner et al (2005) a trouvé que la teneur élevée en extractibles va de pair avec une densité plus élevée du bois. L'auteur trouve que la densité diminuait dans l'aubier comparativement au duramen ; mais que cette diminution n'était plus apparente après une extraction à l'eau chaude et l'acétone.

4.3.4 Effet sur le retrait

D'après les valeurs des coefficients de corrélation simple, aucune corrélation significative n'a été trouvée entre le retrait volumique (déterminé par la somme du retrait tangentiel et radial) et les caractères anatomiques mesurés. Ce qui signifie que, malgré la variabilité des caractères anatomiques, le retrait reste peu variable d'une région de provenance à l'autre et dans l'arbre, du duramen interne au duramen externe du bois de vène comme le montre les tableaux 15 et 16. Cet état de fait pourrait s'expliquer par le fait que l'effet relatif à certaines modifications structurelles liées à l'âge cambial et à la différence des conditions de croissance sur le retrait se trouve contrebalancé par la teneur en extrait qui agit en sens inverse (effet de réduction du retrait). Par exemple le retrait transversal qui en temps normal croît avec l'évolution de la longueur (réduction de l'angle des microfibrilles), la proportion et l'épaississement de la paroi des fibres de la moelle vers la périphérie peut demeurer constante ou peu variable dans le duramen du moment où la teneur en extraits augmente significativement de la moelle vers la zone de transition duramen – aubier où elle atteint son maximum. Il pourrait en être de même pour les effets liés à la différence des conditions de croissance. Il faut dire que le retrait à l'échelle macroscopique reste toujours difficile à prédire. Les corrélations trouvées sont donc à prendre avec réserve.

Dans le présent travail, la constance des valeurs du retrait pourrait être probablement attribuée à la forte teneur en extrait du bois de vène qui semble limiter l'effet direct des modifications anatomiques liées aux conditions de croissance et au vieillissement du cambium (modification de l'angle des microfibrilles, de l'épaisseur des parois cellulaires et de la proportion des fibres etc.). En effet les extraits sont bien connus pour leur capacité à renforcer la stabilité du bois par la réduction de la sensibilité aux variations thermodynamiques de l'environnement. Ils affectent ainsi le comportement hygroscopique général du bois et les espèces à haute contenance en extractibles (hydrophobes ou lipophiles) se caractérisent par de faibles coefficients de rétractibilité

et de faible valeur du point de saturation (Hernández 1989, 2007a and 2007b; Arévalo 2002 ; Wangaard and Granados 1967; Skaar 1988; Nzokou).

4.3.5 Conclusion

Afin d'étudier la relation entre les caractéristiques physico-mécaniques, les caractères anatomiques et la teneur en extraits, une analyse quantitative des extraits et une analyse qualitative et quantitative des caractères anatomiques ont été effectuées sur des éprouvettes issus des échantillons ayant servis à déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques. La régression multiple et la corrélation simple ont servi de modèle mathématique pour analyser les données. Ainsi, au regard des coefficients de corrélation simple, des équations de régression multiple et du tableau des coefficients de régression standardisés qui précisent l'influence de chacune des variables explicatives on peut conclure que :

- Le module dynamique évolue positivement avec la longueur des fibres, la proportion et l'épaisseur des fibres ainsi qu'avec la teneur en extrait mais diminue significativement avec le nombre de vaisseaux par mm^2 , la proportion des vaisseaux et du parenchyme (axial et de rayon).
- Le module dynamique spécifique évolue positivement avec la teneur en extrait, la longueur et la proportion des fibres mais diminue avec le nombre de vaisseaux par mm^2 et la proportion des vaisseaux.
- Le coefficient d'amortissement évolue positivement avec le nombre de vaisseaux par mm^2 , la proportion des vaisseaux et du parenchyme (axial et de rayon) mais diminue avec la teneur en extrait, la longueur des fibres.
- L'infradensité évolue positivement avec la teneur en extrait, la longueur des fibres et la proportion des fibres et diminue considérablement avec la proportion des vaisseaux et le nombre de vaisseaux par mm^2 . Dans le présent travail, elle semble donc être un bon critère pour apprécier la qualité du bois de vène.
- Parmi les différentes variables explicatives, la longueur des fibres, la teneur en extraits et la proportion des fibres sont les plus influentes variables avec lesquelles le module dynamique, l'infradensité et la qualité acoustique pour la

facture d'instrument xylophone évolue positivement tandis que les vaisseaux (par leur nombre par mm² et leur proportion) et la proportion des cellules de parenchyme les affectent négativement.

- Aucune corrélation significative ne s'est cependant avérée entre le retrait volumique et les caractères anatomiques mesurés. Ceci s'expliquerait probablement par le fait que l'évolution du retrait suite aux modifications anatomiques semble être perturbée par la forte teneur en extrait du bois de vène ; ces derniers ayant la capacité de réduire considérablement le retrait.

4.4 Effet de la nature des extraits sur le comportement hygroscopique du bois de vène à l'échelle des échantillons minatures

Cet essai vise à mettre en évidence l'influence de la nature des extraits sur la relation bois – eau du vène. Les caractéristiques hygroscopiques, en occurrence les courbes de sorption, les valeurs du retrait (radial et tangentiel), les valeurs de l'anisotropie du retrait et les valeurs du point de saturation de la fibre PSF ont été comparées sur 6 catégories d'échantillons : le duramen non extrait, l'aubier non extrait, le duramen extrait à l'éthanol-toluène suivie de l'eau chaude, le duramen extrait à l'eau chaude, le duramen extrait à l'acétone et le duramen extrait à l'hexane. Il faut rappeler que le duramen concerné ici est le duramen externe, c'est-à-dire la zone de transition duramen – aubier. Son choix a été motivé par sa teneur élevée en extraits suite à la quantification radiale des extraits dans l'arbre (voir § 4.1.3 tableaux 9 et 10). Les figures 83 et 84 et les tableaux 20 et 21 illustrent les résultats des mesures.

4.4.1 Effet des extraits sur les courbes de sorption

Les figures 83 et 84 donnent l'évolution du retrait radial et tangentiel de chaque catégorie d'échantillon en fonction de l'humidité du bois. Pour toutes les catégories d'échantillons les courbes de sorption présentent une allure similaire de comportement hygroscopique du bois. Ainsi, trois phases de comportement hygroscopique caractérisent chacune des courbes de sorption :

- Phase I : le retrait reste toujours égal à zéro (0) tant que l'échantillon ne perd que de l'eau capillaire,
- Phase II : aux environs du point de saturation de la fibre une forme curviligne apparaît sur la courbe de sorption. Le début de cette phase qui varie selon la nature du traitement s'expliquerait par deux phénomènes : soit que le retrait a commencé en présence d'eau capillaire, c'est-à-dire que la perte d'eau hygroscopique a démarré pendant qu'il existe encore de l'eau libre dans certaines cellules moins perméables, en occurrence les rayons (Almeida and Hernandez 2006), soit que, suite à une probable répartition irrégulière de l'humidité dans l'échantillon, des zones de l'échantillon ont atteint le point de saturation des fibres, tandis que d'autres ne le sont pas encore.
- Phase III : Cette troisième phase correspond au domaine hygroscopique caractéristique du retrait classique où la relation retrait-humidité du bois reste parfaitement linéaire.

Il faut dire que la pente de la courbe représente la variation dimensionnelle de l'échantillon divisée par la variation d'humidité du bois. Ceci étant, la variation, à un degré donné, de la quantité d'eau hygroscopique va provoquer le même degré de variation dimensionnelle de l'échantillon et cela quel que soit le type d'échantillon (traitement). Des résultats similaires ont été rapportés par des travaux antérieurs concernant l'hystérésis de sorption (Perré, 2007) et le comportement hygroscopique du bois traité thermiquement (Almeida et al. 2009).

Cependant, bien que la forme globale des courbes soit similaire, l'effet du traitement et de la nature de l'échantillon (duramen ou aubier) est évident sur les courbes de sorption. La courbe de sorption obtenue sur le duramen non extrait est plus décalée vers la gauche comparativement à celle obtenue sur l'aubier non extrait et sur les échantillons extraits. Le duramen non extrait dispose ainsi d'un faible retrait et d'un faible point de saturation de la fibre. De ces graphiques on observe dans le domaine hygroscopique (phase III), une superposition des courbes de sorption de l'aubier et du duramen totalement extrait. Ce qui témoigne du comportement hygroscopique similaire, en dessous du point de saturation de la fibre, de l'aubier et du duramen lorsque ce dernier est totalement extrait.

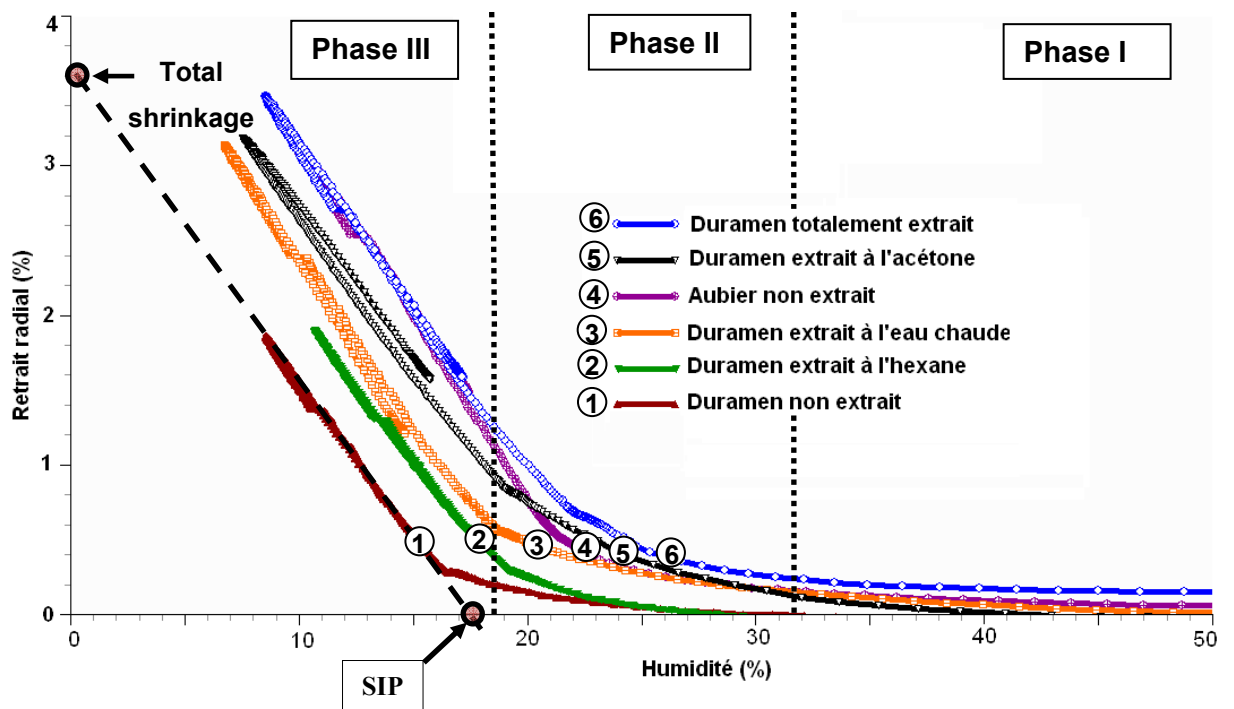


Figure 83. Retrait radial vs. Teneur en eau du bois

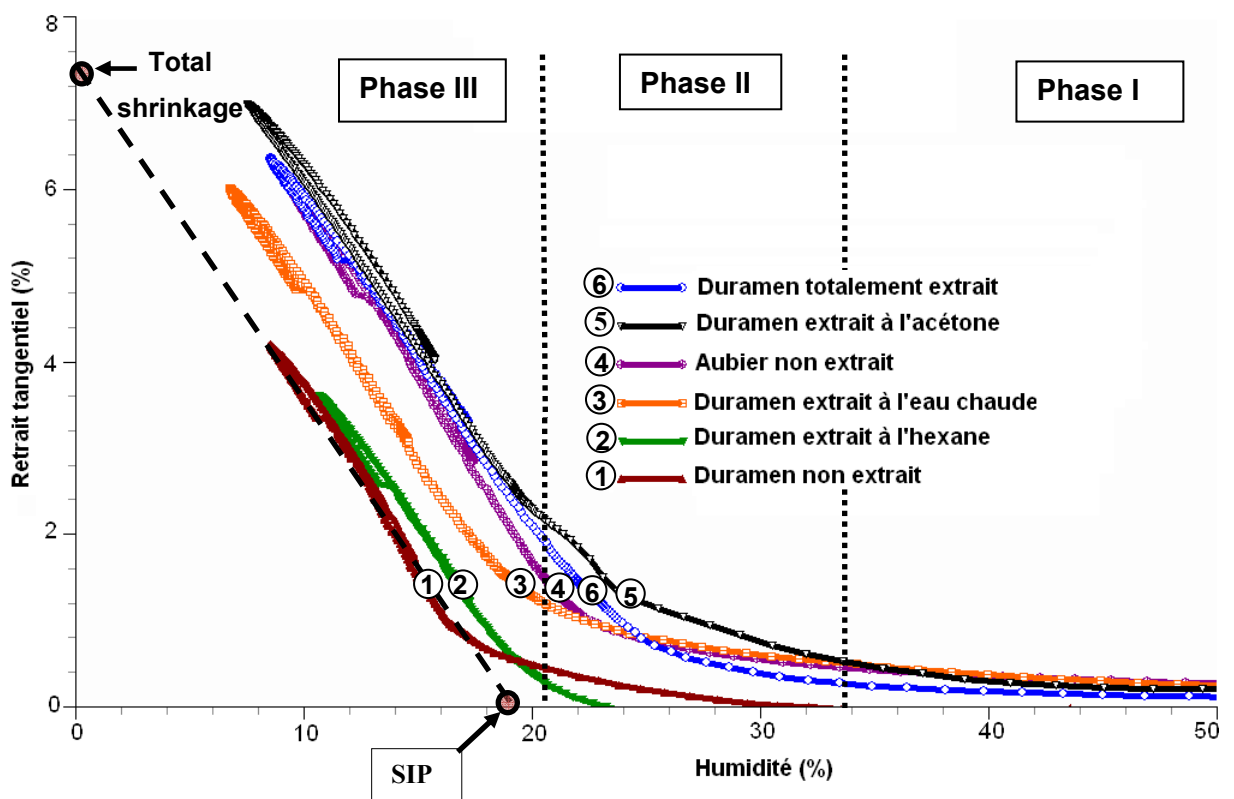


Figure 84. Retrait tangential vs. Teneur en eau du bois

4.4.2 Effet sur le point de saturation de la fibre (PSF)

Le tableau 20 résume les résultats des mesures du PSF. Pour chaque type d'échantillon, le PSF est supérieur dans la direction tangentielle que dans la direction radiale. Par conséquent, la valeur moyenne du PSF a été déterminée comme étant la moyenne des PSF déterminées dans le sens radial et tangentiel.

Les résultats du présent travail montrent que la valeur du PSF est plus élevée dans l'aubier que dans le duramen non extrait (25,3 % et 22,6 % respectivement en direction tangentielle et radiale contre 19,0 % et 16,8 % pour le duramen non extrait). Cela pourrait probablement s'expliquer principalement par la différence de nature et de teneur en extractibles de l'aubier comparé au duramen (Nepveu 1994). En effet, la forte teneur en extrait du duramen contribuerait à bloquer l'accès de l'eau aux sites de sorption dans la paroi cellulaire (Hernández, 1989), tandis que dans l'aubier la faible teneur en extrait (5 % pour le vène) constitue peu de barrière au passage des molécules d'eau vers les sites de sorption. Il faut aussi noter que la différence dans la nature chimique des extraits dans le duramen et dans l'aubier pourrait aussi contribuer à expliquer la différence de comportement hygroscopique entre ces deux types de bois. Le duramen du bois de vène et en particulier la zone de transition duramen – aubier dispose d'une quantité importante des substances polyphénoliques du groupe des isoflavonoïdes (Seshadri 1972 ; Surowiec et al 2004) solubles principalement que dans les solvants organiques et limitant ainsi l'accès de l'eau aux différents sites de sorption de la paroi cellulaire. Quant à l'aubier, il constitue la région de l'arbre physiologiquement vivant renfermant plus de métabolites primaires que secondaire qui sont généralement hydrosolubles et donc en grande partie solubles que dans l'eau (Fengel et Wegener 1984) laissant ainsi un accès libre des molécules d'eau aux différents sites de sorption.

Concernant le duramen, l'analyse statistique des données présentées dans le tableau 20 montre un effet significatif des extraits sur le PSF. Cependant, l'intensité de l'impact diffère selon le type d'extraction. Le PSF a considérablement augmenté après l'élimination des extraits. En effet sa valeur moyenne (PSF en tangentielle et radiale) est passée de 17,90 % dans le duramen non extrait à 22,50 % après extraction à l'eau, à 25,20 % et 25,70 % après extraction, respectivement à l'acétone et à l'éthanol-toluène

suivie de l'eau chaude. Cette augmentation du PSF suite à l'extraction confirme les résultats des travaux antérieurs effectués par Wangaard and Granados (1967); Stamm (1971); Skaar (1988); Nzokou et Kamdem (2003) et Hernandez (2007). Ce changement de valeur de PSF pourrait s'expliquer par le nombre de sites de sorption devenus disponibles suite à l'extraction. Plus ce nombre est important, plus la sorption multicouche devient beaucoup plus importante (Spalt 1958) et plus la valeur du PSF est élevée.

Une observation attentive des résultats nous indique que le PSF évolue avec la quantité d'extraits éliminée par le solvant (Tableau 20) sauf pour le cas de l'acétone (14,20 % de la masse pour l'acétone contre 19,80 % de la masse pour l'extraction totale). En dépit d'une extraction partielle à l'acétone, la valeur du PSF reste statistiquement égale à celle obtenue après extraction totale (25,20 % contre 25,70 %). Ceci ne pourrait s'expliquer que par le fait que le nombre de sites de sorption disponible après l'extraction à l'acétone est statistiquement équivalent à celui disponible après l'extraction totale. Ce qui met en évidence l'effet majeur de la nature des extraits éliminés par l'acétone. Il faut noter que les constituants majeurs identifiés chez l'espèce *Pterocarpus* et en particulier chez le vène sont essentiellement des substances polyphénoliques principalement du groupe des isoflavonoïdes (Seshadri 1972 ; Surowiec et al 2004). Une quantité importante de ces substances semble, par leur nature chimique, avoir une plus grande capacité à bloquer l'accès de l'eau aux sites de sorption. Ces substances auraient ainsi une plus grande affinité pour l'acétone comparé aux extraits éliminés par les autres solvants pris un à un. Ainsi, l'intensité de l'impact lié au type d'extraction est due, non pas seulement à la quantité de matières dissous, mais aussi et surtout à sa nature chimique qui, dans le cadre du présent travail, est dictée par la nature du solvant d'extraction en question. Fengel et Wegener (1984) donnent plus de précisions sur les groupes de composés chimiques pouvant être extrait par différents types de solvants.

Tableau 20. Influence des extraits sur le PSF du bois de vène

Catégories d'échantillons		Point de saturation de la fibre, PSF (%)			Extrait éliminés, % ³	Augmentation du PSF après extraction, %		
		tangentiel	Radial	Moyenne		tangentielle	Radiale	Moyenne
Duramen non extrait	\bar{x}	19,00 ^a	16,80 ^a	17,90 ^{a2}	-	-	-	-
	s±	1,00	1,00	0,14				
	n	3,00	3,00	3,00				
Duramen extrait par l'hexane	\bar{x}	20,50 ^b	20,00 ^b	20,20 ^b	3,00	7,80	19,00	13,00
	s±	0,50	1,00	0,66	0,26			
	n	3,00	3,00	3,00	3,00			
Duramen extrait par l'eau chaude	\bar{x}	23,70 ^c	21,30 ^b	22,50 ^c	9,00	24,70	26,80	25,70
	s±	0,60	0,60	0,50	0,34			
	n	3,00	3,00	3,00	3,00			
Aubier ⁴ non extrait	\bar{x}	25,30 ^d	22,60 ^{bc}	23,90 ^d		33,15	34,52	33,51
	s±	0,60	1,10	0,86				
	n	3,00	3,00	3,00				
Duramen extrait par l'acétone	\bar{x}	26,70 ^e	23,70 ^c	25,20 ^e	14,20	40,50	41,07	40,70
	s±	0,60	0,60	0,28	0,53			
	n	3,00	3,00	3,00	3,00			
Duramen totalement extrait	\bar{x}	26,30 ^c	25,20 ^c	25,70 ^c	19,80	38,40	50,00	44,00
	s±	0,60	0,80	0,43	0,35			
	n	3,00	3,00	3,00	3,00			
F values		70,58*	33,54*	95,64*				

¹L'extraction totale correspond à l'extraction par l'éthanol-toluène suivi de l'eau chaude; ²les valeurs portant des lettres différentes dans la colonne sont statistiquement différentes pour P = 5% (ANOVA and LSD test); ³basé sur la masse anhydre du duramen non extrait; ⁴la teneur de l'aubier en extrait (par l'éthanol - toluène suivi de l'eau chaude) est de 5%, * Différence statistiquement significative pour P = 5%.

4.4.3 Effet sur le retrait et l'anisotropie du retrait

Les résultats des mesures du retrait sont présentés dans le tableau 21. Au regard de ces résultats, on note clairement une augmentation significative du retrait radial et tangentiel ainsi que du retrait volumique (retrait radial + retrait tangentiel) après l'élimination des extraits par l'acétone, l'eau chaude et par l'éthanol-toluène suivie de l'eau chaude. Le retrait radial et tangentiel du duramen non extrait qui était respectivement 3,8 % et 7,4% est passé à 4,6 % et 8,7 % après extraction à l'eau, à 4,9 % et 9,9 % après extraction à l'acétone et 5,4 % et 9,8 % après l'extraction totale. D'où une augmentation du retrait volumique de 20,9 % ; 34,5 % et 38,2 % respectivement après l'extraction à l'eau, à l'acétone et l'éthanol-toluène suivie de l'eau chaude (extraction totale). Cette augmentation pourrait être attribuée à l'augmentation du nombre de sites de sorption devenu disponible par suite de l'élimination des extraits. Des travaux similaires effectués par Choong and Achmadi (1991) ont aussi trouvé que l'élimination des extraits à l'eau et aux solvants organiques entraînait une augmentation excessive du retrait. Cependant, il faut noter que des probables perturbations dans la structure du bois (augmentation du nombre et des dimensions des micro-capillaires) à l'issue du processus d'extraction pourraient aussi contribuer à modifier la capacité de sorption et donc à expliquer l'augmentation du retrait/gonflement et du PSF (Mantanis *et al.* 1994, Part I, Mantanis *et al.* 1995). En revanche, le retrait demeure invariable après extraction à l'hexane (4 % et 7,5 % respectivement en direction radiale et tangentielle contre 3,8 % and 7,2 pour le duramen non extrait). Il faut rappeler que les composés solubles dans l'hexane, un solvant apolaire, font partie des composés lipophiles (Fengel et Wegener 1984). Ces composés, peu abondants dans le vène (0,26% tableaux 20 et 21), semblent n'avoir aucun effet sur le retrait. Cela s'expliquerait probablement, soit par le faible taux de ces extraits dans le bois de vène, soit que ces extraits n'occupent pas les sites de sorption et sont donc présents que dans les lumens. Des travaux similaires effectués par Hernandez (2007b) ont aussi montrés que les extraits solubles dans le cyclohexane (solvant apolaire comme l'hexane), n'avaient pas d'effet sur le gonflement du bois.

Un autre renseignement intéressant que l'on peut tirer de ces résultats est que les valeurs du retrait volumétrique déterminées sur le duramen totalement extrait sont statistiquement identiques à celles déterminées sur l'aubier (15,2%). Ceci confirme ainsi qu'une des différences fondamentales entre l'aubier et le duramen du bois de vène

repose aussi sur la nature et la teneur en extractibles (Imamura 1989, Nepveu 1994, Holmbolm 1999, Polman et al 1999, Gominho et al 2001). Autrement dit, le nombre de sites de sorption disponibles dans l'aubier est statistiquement identique à celui du duramen totalement extrait. Ce résultat nous paraît très original dans la mesure où dans la littérature aucune étude sur la sorption d'humidité n'a encore rapportée ce constat tant à l'échelle macroscopique qu'à l'échelle des minuscules échantillons de bois.

Défini comme étant le rapport du retrait tangentiel au retrait radial (β_T/β_R), l'anisotropie du retrait est l'un des paramètres importants pour évaluer la stabilité dimensionnelle du bois et plus sa valeur tend vers l'unité, moins le bois a tendance à se déformer quand la teneur en eau varie. Au regard des résultats, seul l'élimination des extraits à l'acétone semble provoquer une augmentation significative de l'anisotropie du retrait. L'anisotropie du retrait déterminée après les autres catégories d'extraction n'a présenté aucune différence significative avec celle déterminée sur le duramen non extrait et l'aubier (tableau 21 et figure 83 et 84). La valeur de l'anisotropie de retrait est passée de 1.89 pour le duramen non extrait à 2.02 après extraction à l'acétone et 1.8 après extraction par les autres solvants (table 21). Parmi les solvants sélectionnés, l'acétone semblerait donc être le solvant le plus à mesure d'éliminer les extraits pouvant infiltrer la paroi cellulaire du bois de vène, libérant ainsi plus de sites de sorption en direction tangentiel que radial.

Tableau 21. Influence des extraits sur le retrait et l'anisotropie du retrait du bois de vène

Catégories d'échantillons	Retrait total, %			Extraits éliminés, % ³	Augmentation du retrait après extraction, %			Anisotropie du retrait β_T/β_R	
	β_T	β_R	β_V		β_T	β_R	β_V		
Duramen non extrait	\bar{x}	7,20 ^a	3,80 ^a	11,00 ^{a2}	-	-	-	1,89 ^a	
	s±	0,20	0,10	0,17					
	n	3,00	3,00	3,00					
Duramen extrait par l'hexane	\bar{x}	7,50 ^a	4,00 ^a	11,50 ^a	3,00	4,16	5,26	4,50	1,87 ^a
	s±	0,30	0,26	0,36	0,26				
	n	3,00	3,00	3,00	3,00				
Duramen extrait par l'eau chaude	\bar{x}	8,70 ^b	4,60 ^b	13,30 ^b	9,00	24,70	26,80	20,90	1,89 ^a
	s±	0,10	0,17	0,30	0,34				
	n	3,00	3,00	3,00	3,00				
Aubier ⁴ non extrait	\bar{x}	9,80 ^c	5,40 ^c	15,20 ^c		36,11	42,10	38,18	1,82 ^a
	s±	0,10	0,26	0,30					
	n	3,00	3,00	3,00					
Duramen extrait par l'acétone	\bar{x}	9,90 ^c	4,90 ^b	14,80 ^c	14,20	37,50		34,54	2,02 ^b
	s±	0,10	0,21	0,10	0,53				
	n	3,00	3,00	3,00	3,00				
Duramen totalement extrait	\bar{x}	9,80 ^c	5,40 ^c	15,20 ^c	19,80	36,11	42,10	38,18	1,81 ^a
	s±	0,17	0,17	0,26	0,35				
	n	3,00	3,00	3,00	3,00				
F values		154,16*	52,37*	152,86*					3,98*

¹L'extraction totale correspond à l'extraction par l'éthanol-toluène suivi de l'eau chaude; ² les valeurs portant des lettres différent dans la colonne sont statistiquement différent pour P = 5% (ANOVA and LSD test); ³ basé sur la masse anhydre du duramen non extrait; ⁴la teneur de l'aubier en extrait (par l'éthanol - toluène suivi de l'eau chaude) est de 5%, * Différence statistiquement significatif pour P = 5%.

4.4.4 Conclusions

Dans le présent travail, la relation bois – eau a été étudiée avec précision sur de minuscules échantillons à l'aide d'un dispositif original (Perré, 2007). La finesse de l'échantillon nous a permis d'obtenir un taux d'extraction proche de celui de la poudre. Le comportement hygroscopique du bois de vène et l'influence de 4 groupes d'extraits (ceux soluble dans l'hexane, dans l'acétone, dans l'eau chaude et dans l'éthanol-toluène suivi de l'eau chaude) sur la relation bois-eau ont ainsi été évalués et les résultats obtenus ont conduit aux conclusions suivantes :

- Le retrait et le point de saturation de la fibre sont significativement supérieurs dans l'aubier que dans le duramen non extrait,
- Les pentes de la courbe de sorption obtenues sur l'aubier et sur les échantillons extraits, aux différents solvants sont significativement décalées vers la droite par rapport celle obtenue sur le duramen non extrait.
- L'augmentation du retrait et du point de saturation de la fibre suite à l'élimination des extraits est plus importante pour l'extraction totale et l'extraction à l'acétone comparativement à l'extraction à l'eau chaude et à l'hexane. La magnitude de l'effet des extractions dépend des substances extraites qui est en rapport avec le type de solvant d'extraction. Les composés solubles dans l'hexane semblent n'avoir aucune influence sur le comportement hygroscopique du bois de vène.
- Le retrait après extraction totale est pratiquement identique à celui de l'aubier.
- A l'exception de ceux qui sont solubles dans l'acétone, les substances extraites à l'eau chaude, à l'hexane et à l'éthanol-toluène plus à l'eau l'eau chaude semblent avoir peut d'effet sur l'anisotropie du retrait.

5 Conclusion générale et perspectives

5.1 Conclusion générale

Le vène est une espèce des milieux climatiques soudanien et guinéen de l'Afrique de l'Ouest revêtant une importante contribution socio-économique tant au niveau du bois qu'au niveau du fourrage bétail. Au Mali, son bois est fortement apprécié aussi bien pour ses propriétés physico-mécaniques, esthétiques que pour sa durabilité dans des emplois comme la construction traditionnelle, la menuiserie, l'ameublement et surtout pour la facture d'instrument xylophone. Cependant, au regard du parcours bibliographique effectué dans ce travail, les études sur la variabilité de la qualité de ce bois au Mali ainsi que l'influence de la structure anatomique et de la nature des extractibles sont encore inexistantes. L'objectif principal de ce travail de thèse était donc d'étudier la qualité du bois de vène selon ces deux provenances au Mali et selon la position radiale de localisation dans l'arbre ainsi que l'influence des facteurs de variation de qualité liée à l'anatomie et aux métabolites extractibles. Un total de 5 arbres bien conformés, exempts de tout défaut d'altération externe et ayant atteint l'âge d'exploitation (diamètre à hauteur d'homme (1,30 m) comprise entre 45 et 55 cm) ont été prélevés dans chaque région et étudiés selon 3 positions radiales dans l'arbre : le duramen interne-DI, le duramen médian - DM et le duramen externe -DE.

Les travaux se sont organisés autour de quatre principaux volets : la variation des propriétés structurelles et de la teneur en extractibles, la variation des propriétés physico-mécaniques bois de vène, l'influence de la structure anatomique et du taux des extractibles sur les propriétés physico-mécaniques bois et l'influence de la nature des extractibles sur la relation bois – eau à l'échelle des échantillons miniatures.

Pour le premier volet, une étude qualitative et quantitative de la structure anatomique associée à une étude quantitative des extractibles a été effectuée sur des échantillons issus des barreaux qui ont servi à déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques. L'analyse qualitative a consisté à préciser les dimensions des éléments constitutifs, tandis que l'analyse quantitative a porté sur la proportion des tissus, en occurrence le nombre de vaisseaux par mm^2 , la proportion des fibres, des vaisseaux et du parenchyme axial et le nombre de rayons/mm. Des essais d'analyse de cerne couplés avec des tests de Microdensitométrie aux rayons X ont aussi été effectués afin de déterminer l'accroissement moyen du vène et de comprendre la variabilité des

composantes microdensitométriques selon la région géographique de croissance et selon la croissance radiale dans l'arbre.

Pour le second volet, la mesure des caractéristiques mécaniques a été effectuée par usage du dispositif appelé « Bing 2000 » développé au CIRAD de Montpellier pour la caractérisation de routine du module d'élasticité longitudinal du bois. Ce dispositif dont le principe repose sur la théorie de la vibration des poutres flottantes a ainsi permis de déterminer non seulement le module d'élasticité longitudinal selon l'équation d'Euler Bernoulli mais aussi les caractéristiques acoustiques en occurrence le module spécifique et le coefficient d'amortissement du bois pour la facture d'instrument xylophone. Les essais physiques ont essentiellement concerné l'infradensité et le retrait. L'infradensité a été déterminée selon la norme française NF B51-005 et internationale ISO 3131 tandis que le retrait a été mesuré à l'aide du pied à coulisse.

Quant au troisième volet, le but poursuivi a consisté à rechercher une relation entre les caractéristiques anatomiques et les propriétés physiques et mécaniques mesurées. Pour cela, des modèles mathématiques basés sur l'analyse de la corrélation simple et de la régression linéaire multiple ont été appliqués.

Le quatrième volet avait pour objet de déterminer à l'échelle des minuscules échantillons l'influence de la nature des composés extractibles sur le comportement hygroscopique du bois. Pour cela les paramètres caractérisant la relation bois-eau en occurrence les courbes de sorption, le PSF, le retrait et l'anisotropie du retrait ont été examinés et comparés sur de minuscules échantillons témoins (non extraits) et extraits à l'acétone, à l'hexane, à l'eau chaude et à l'éthanol-toluène suivie de l'eau chaude. Ainsi, l'influence de 4 groupes d'extraits (ceux solubles dans l'hexane, dans l'acétone, dans l'eau chaude et dans l'éthanol-toluène suivi de l'eau chaude) sur le comportement hygroscopique du bois de vène a été testée. Les tests de sorption ont été réalisés à l'aide d'un dispositif original d'analyse de la relation bois-eau : le micromètre à balayage laser dont le principal avantage réside non seulement dans la mesure précise de la variation de masse mais aussi et surtout dans l'acquisition continue et sans contact des données.

Les résultats obtenus ont conduit aux conclusions suivantes :

- A l'exception de la hauteur des rayons qui demeure peu variable, les dimensions et la proportion des principaux caractères anatomiques (la longueur et la proportion des fibres, le diamètre et la proportion des vaisseaux, le nombre de vaisseaux par mm², la proportion des cellules de parenchyme etc.) diffèrent significativement d'une région à l'autre mais dans l'arbre elles varient de la moelle vers le duramen médian au delà duquel ils restent stable jusqu'au duramen externe.
- Quant aux extractibles, le taux d'extraction totale et le taux d'extrait à l'éthanol-toluène dans le duramen présentent des valeurs plus élevées chez les bois en région guinéenne (19,5 % et 16,2 %) que chez ceux de la région soudanienne (15,5 % et 11,9%) et quelle que soit la provenance, ces taux augmentent de la moelle vers le duramen externe (transition aubier-duramen) puis diminuent considérablement dans l'aubier (1,5 à 6%). Dans l'aubier, le taux d'extraction totale varie peu d'une région géographique à l'autre (6,2 % en zone guinéenne contre 5,8 % en zone soudanienne) mais les taux obtenus à l'éthanol-toluène sont considérablement inférieurs aux taux obtenus à l'eau chaude (1,5 % contre 4,3 % en région soudanienne et 1,9 % contre 5,3 % en région guinéenne). Le taux d'extraits à l'eau chaude est moins abondant et peu variable d'une région géographique à l'autre mais aussi légèrement élevé dans le DE que dans le DI et dans le DM où il reste très peu variable.
- L'accroissement moyen du vène est de 4,9 mm/an en région guinéenne contre 2,8 mm/an en zone soudanienne. Ainsi, le vène en région guinéenne nécessite 87,5 ans pour atteindre un diamètre d'exploitation de 35 cm contre 125 ans en zone soudanienne. Mais dans l'arbre, l'accroissement annuel déterminé par classe d'âge montre que les cernes les plus larges se situent dans la première tranche d'âge (0-25 ans) puis ils décroissent progressivement vers la périphérie de l'arbre. L'analyse microdensitométrique associée à l'analyse des cernes montre que les composantes densitométriques sont significativement supérieures chez les spécimens issus de la région climatique guinéenne que chez ceux de la région soudanienne. En ce qui concerne la position radiale dans l'arbre, les composantes de densité augmentent de la moelle vers la zone de transition duramen-aubier puis chutent considérablement dans l'aubier.

- Le module dynamique d'élasticité est significativement supérieur chez les spécimens provenant de la région guinéenne que chez ceux de la région soudanienne. Mais dans l'arbre et quelle que soit la provenance il reste plus faible dans le duramen interne que dans le duramen médian à partir duquel il reste stable jusqu'au duramen externe. Quant au module spécifique, il est plus élevé chez les spécimens provenant de la région guinéenne que chez ceux de la région soudanienne et augmente significativement du duramen interne au duramen externe. En revanche le bois issu de la région climatique soudanienne est plus amortissant que celui issu de la région climatique guinéenne. Dans l'arbre l'amortissement est plus important dans le duramen interne (portion de bois juvénile) que dans le duramen médian mais il reste stable entre le duramen médian et le duramen externe. Le bois de vène présenterait ainsi une meilleure qualité acoustique en zone guinéenne qu'en zone soudanienne une meilleure qualité acoustique dans le duramen médian et le duramen externe que dans le duramen interne (proche de la moelle).
- Pour ce qui concerne les caractéristiques physiques, le retrait et l'anisotropie du retrait varient peu d'une provenance à l'autre et du duramen interne vers le duramen externe tandis que l'infradensité diffère significativement d'une provenance à l'autre et d'une position de localisation radiale à l'autre dans l'arbre. En effet l'infradensité est significativement plus élevée chez les spécimens issus de la région climatique guinéenne que chez leur homologue de la région climatique soudanienne et dans l'arbre elle augmente significativement de la moelle vers le duramen externe.
- Le module dynamique et le module dynamique spécifique évoluent positivement avec la proportion et la longueur des fibres ainsi qu'avec la teneur en extrait mais diminue significativement avec le nombre de vaisseaux par mm^2 , la proportion des vaisseaux et du parenchyme (axial et de rayon). Le coefficient d'amortissement évolue positivement avec le nombre de vaisseaux par mm^2 , la proportion des vaisseaux et du parenchyme (axial et de rayon) mais diminue avec la teneur en extrait et la longueur des fibres. L'infradensité évolue positivement avec la teneur en extrait, la longueur des fibres et la proportion des fibres et diminue considérablement avec la proportion des vaisseaux et le

nombre de vaisseaux par mm^2 . Dans le présent travail, l'infradensité bien corrélée avec les caractéristiques mécaniques, semble donc être un bon critère d'appréciation de la qualité du bois de vène. Parmi les différentes variables explicatives, la longueur des fibres, la teneur en extraits et la proportion des fibres sont les plus influentes variables avec lesquelles le module dynamique, l'infradensité et la qualité acoustique pour la facture d'instrument xylophone évolue positivement tandis que les vaisseaux (par leur nombre par mm^2 et leur proportion) et la proportion des cellules de parenchyme les affectent négativement. Aucune corrélation significative ne s'est cependant avérée entre le retrait volumique et les caractères anatomiques mesurés. Ceci s'expliquerait probablement par le fait que l'évolution du retrait suite aux modifications anatomiques semble être perturbée par la forte teneur en extraits du bois de vène ; ces derniers ayant la capacité de réduire considérablement le retrait. Les résultats du présent travail ne révèlent aucun effet de la largeur de cerne sur les propriétés du bois.

- Le retrait et le point de saturation de la fibre évoluent positivement avec l'élimination des extraits mais cette augmentation est plus importante pour l'extraction totale et l'extraction à l'acétone comparativement à l'extraction à l'eau chaude et à l'hexane. L'influence des extractibles est due non pas seulement à la quantité de substances présentes dans le bois mais aussi et surtout à leur nature chimique qui dans le cadre du présent travail est associée à la nature du solvant d'extraction en question. Les composés solubles dans l'hexane se sont avérés avoir peu d'influence sur le comportement hygroscopique du bois de vène. Le retrait et le point de saturation de la fibre sont significativement supérieurs dans l'aubier que dans le duramen non extrait. Les pentes de la courbe de sorption obtenues sur l'aubier et sur les échantillons extraits, aux différents solvants sont significativement décalées vers la droite par rapport à celle obtenue sur le duramen non extrait. Le retrait après extraction totale est similaire à celui du l'aubier. A l'exception de ceux qui sont solubles dans l'acétone, les extraits semblent avoir peu d'effet sur l'anisotropie du retrait.

5.2 Perspectives

Les résultats du présent travail ont non seulement montré la variabilité des caractéristiques physico-mécaniques, structurelles et chimiques mesurées mais aussi un effet important de la variation de la structure anatomique et des métabolites secondaires sur les propriétés physico-mécaniques du bois. Un autre point important a été la mise en évidence de l'effet de la nature des extraits sur le comportement hygroscopique du bois. Cette recherche à caractère purement fondamental a en effet mis en évidence un éventail de renseignements aidant à mieux comprendre la qualité du bois de vène en vue d'une valorisation rationnelle et adéquate.

Ainsi, des recommandations d'utilité pratique peuvent être envisagées à partir de ce travail:

- Pour des structures de qualité dans le bâtiment et une meilleure qualité sonore des instruments xylophones, nous recommandons l'usage du bois de vène issus des formations naturelles de la région guinéenne et de la zone de duramen médian et externe dans l'arbre ;
- Pour sa densité élevée associée à la présence de veines colorées laissant apparaître un beau dessin de même pour sa teneur élevée en extractibles et son caractère très stable tant à l'échelle de la provenance qu'au niveau de la position radiale dans l'arbre, le bois de vène issu de la bille de pied devrait être réservé à des usages plus nobles en occurrence l'ébénisterie et la menuiserie interne et externe, la facture d'instruments xylophone et l'usage en structure dans le bâtiment tandis que le bois des branches devrait servir comme bois d'énergie (charbon de bois) ;
- Pour des projets de reboisement et de gestion durable de l'espèce, il est important de garder dans l'esprit que le vène qui croît en forêt naturelle dispose d'un taux d'accroissement de 4,9 mm en région climatique guinéenne contre 3,1 mm en région climatique soudanienne. Cependant, ce taux de croissance pourrait être amélioré si les spécimens bénéficiaient d'une protection adéquate contre les mauvais traitements (émondage répété, feu de brousse, pâture etc.) ;

- Sur le plan anatomique, le caractère unisérié à bisérié des rayons constitue un bon critère d'identification du vène parmi les autres *Pterocarpus* du continent (*Pterocarpus soyauxii*, *Pterocarpus angolensis* etc.). La quantification de la variabilité des caractères anatomiques et chimiques en relation avec la variabilité des caractéristiques physiques et mécaniques renseigne au mieux sur la qualité du bois de vène.
- La mise en évidence de l'effet de la nature des extraits sur le comportement hygroscopique du bois est un pas essentiel afin d'explorer les composés pouvant le plus améliorer la stabilité dimensionnelle du bois.

Plusieurs pistes de recherche sont cependant envisageables :

- sur la base d'un plus grand nombre d'échantillons, la variabilité des caractéristiques acoustiques et d'autres propriétés non abordées dans ce travail et visant à explorer d'avantage le potentiel d'emploi du vène en occurrence la dureté, la compression, la traction, la durabilité etc. (selon la provenance, la hauteur et le long du rayon) doivent faire l'objet d'une étude approfondie,
- Une question en perspective demeure importante à résoudre chez le vène, il s'agit de comprendre, qu'à âge cambial égal, comment les composantes densitométriques varient avec la variation de largeur de cerne,
- Des essais d'imprégnation visant à renforcer la stabilité dimensionnelle chez d'autres bois à l'aide de certains composés chimiques issus du bois de vène pourrait être intéressant,
- Vu leur effet considérable sur les propriétés du bois de vène, des analyses chimiques sur les composés extractibles associés à une observation microscopique de leur localisation cellulaire seraient intéressantes. De même une étude des caractéristiques mécaniques avant après extraction pourrait donner des renseignements précis sur l'effet des extraits sur les performances mécaniques du bois de vène,
- Au regard de la variabilité des caractéristiques physiques et mécaniques constatée dans ce travail, une étude de l'angle des microfibrilles et de dosage des

différentes composantes chimiques constitutives du bois en l'occurrence la cellulose, la lignine, les hémicelluloses et les cendres reste une piste de recherche très pertinente,

- Une autre question de recherche pourrait concerner l'influence de la provenance génétique sur la qualité du bois de vène,
- Dans un contexte de renseignement sur les modifications climatiques et leur effet sur l'environnement en zone soudanienne et guinéenne durant des années, une étude dendrochronologique serait aussi très intéressante.
- Une étude similaire intégrant plusieurs espèces provenant du Mali devrait aussi contribuer à une meilleure valorisation des autres espèces.

Références bibliographiques

- Ajuong, E.A. and Breese, M. (1997). The role of extractives on short-term creep in compression parallel to the grain of Pai wood (*Afzelia africana* Smith). *Wood and Fiber Science*, vol. 29(2), 161-170.
- Almeida et Hernandez (2006). Changes in physical properties of tropical and temperate hardwoods below and above the fiber saturation point. *Wood Science and Technology* vol. 40(7), p. 599-613.
- Almeida G., Brito. J. O., Perré P. (2009). Change in wood-water relationship due to heat treatment assessed on micro-samples of three *Eucalyptus* species. *Holzforschung*, 63, p. 80-88.
- Allehaux F. (1999). Les Bois de lutherie : épicéa de résonance, érable ondé, érable maillé. *Memoire de fin d'étude*, ENGREF. Nancy 155p.
- APA (1997). Staining of finishes from water-soluble wood extractives. *The Engineered Wood Association*.
- Aramakia M. Baillères H. and Brancheriau L. Kronland-Martinet R. and Ystad S (2007). Sound quality assessment of wood for xylophone bars. *J. Acoust. Soc. Am.* 121 (4), p. 2407–2420
- Arévalo Fuentes, R. L. (2002). Influence des composantes secondaires et de la structure anatomique sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'Acajou (*Swietenia macrophylla* King). PhD, Département des sciences du bois et de la forêt/ Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, 145 pp.
- ASTM (1996). Standard Test Method for preparation of extractives-free wood. ASTM D 1105-96
- Aubreville A. (1959). La flore forestière de la Côte d'Ivoire, éd. 2, tome 2. CTFT, Nogent-sur-Marne, 343p.
- Aubreville A., 1950. Flore forestière soudano-guinéenne AOF, Cameroun, AEF. Soc. D'éd. Géo. Mar. et Col. Paris, 523 p.
- Aubreville A., 1938. La Forêt Coloniale. Vol.1 Paris.
- Badel E et Perré. P. (1999). Détermination des Propriétés élastiques d'éléments individuels du plan ligneux du chêne par des essais de traction sur micro-échantillons. *Ann.For.Sci.*, vol. 56, p. 467-478.
- Barkas, W. (1936). Wood-water relationships: (I) Molecular sorption and capillary retention of water by sitka spruce wood. *The Proceedings of the Physical Society*. 48, p. 1-17

- Beery W. H., Ifju G., Mclain T. E (1983). Quantitative wood anatomy-Relating anatomy to transverse tensile strength. *Wood and Fiber Science*, vol. **15**(4), p. 395-407.
- Bergander et salmén (2002). Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. *J. of Materials Science*, vol. **37**(1), p. 151-156.
- Berges L. (1998). Variabilité individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* (Matt.)Liebl. en relation avec les facteurs écologiques. ENGREF. Nancy.
- Bezuidenhoudt B., Brandt V. and Ferreira D. (1987). Flavonoid analogues from *Pterocarpus* species. *Phytochemistry*, vol. **26**(2), p. 531-535.
- Bhat K. M., Bhat K. V., Dhamodaran T. K. (1990). Wood density and fiber length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala, India. *Wood and Fiber Science*, vol. **22**(1), p. 54-61.
- Bhat K. M. et Priya P. B. (2004). Influence of provenance variation on wood properties of teack from the western Ghat region in Inde. *IAWA Journal*, vol. **25**(3), p. 273-282.
- Boizot N., Charpentier J. P. (2006). Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. Le Cahier des Techniques de l'INRA - Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières. Laboratoire d'Analyses Biochimiques, 82p.
- Bonkougou E. G. (1998), *Pterocarpus erinaceus*: an important legume tree in African savannas, ICRAF, Farm, and Community Tree Network (FACT Net). Bamako, Mali. Disponible sur :
- http://www.winrock.org/fnrm/factnet/factpub/FACTSH/P_erinaceus.html
- Bordonné, P.A., 1989. Module dynamique et frottement intérieur dans le bois. Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Doctorat, Sciences du Bois, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 109 pp.
- Borgin K., Parameswaran N., Liese W. (1975). The effect of aging on the ultrastructure of wood. *Wood Science and Technology*, vol. **9**(2), p. 87-98.
- Bowyer J.L., Shmulsky R., Haygreen J. G. (2007). *Forest Products & Wood Science*. Blackwell Publishing, 532p.
- Bork I. Meyer J. (1985). On the tonal evaluation of xylophones. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, Germany (Cited in Rujinirun et al 2005).

- Brancheriau L., Baillères H., Détienne P., Kronland R., Gril J. et al. (2006). Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. *J. Wood Sci.*, vol. **52**(6), p. 270-273.
- Brancheriau L., Baillères H., Détienne P., Kronland R., Metzger B. (2006). Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomical analysis. *Ann. For. Sci.*, vol. **63**, p. 73-81.
- Brancheriau L. (2002). Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique. Doctorat, Mécanique option Acoustique, Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II. Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille. Marseille, 267 p
- Brémaud I. (2006). Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique, Thesis. Montpellier, Université Montpellier II.
- Brigade d'études forestières de la Guinée Portugaise. (1956). Essences floristiques de la Guinée Portugaise: *Pterocarpus erinaceus* Poir, Jardin et Musée Agricole d'outre mer.
- Brunow G., Lundquist K. and Gellerstedt G. (1999). Lignin. In Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulp and Papermaking. T. E. Timell. Germany, Springer-Verlag: p. 77-124.
- Bucur V., Clement A., Bitsch M., Houssement C. (1999). Acoustic properties of resonance wood and distribution of inorganic components of the cell wall. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. **57**, p. 103-104.
- Bucur V., Clément A., Thomas D. (2000). Relationships between the inorganic components of cellular wall and the acoustic properties of wood for violins, *Catgut Acoustic. Soc. J.*, Vol. **4**(2).
- Bucur, V. (2006). Acoustics of wood. 2nd Edition; Springer verlag, Berlin Heidelberg 420p.
- Buvat, R. (1989). Ontogeny, Cell Differentiation and Structure of Vascular Plants. Berlin Heidelberg New York.
- Cardon, D., 2006. Natural dyes. Archetype Books (sous presse), London. (cite par Bremaud 2006).
- Chafe S. C. (1987). Collapse, volumetric shrinkage, specific gravity and extractives in *Eucalyptus* and other species. *Wood Science and Technology*, vol. **21**(1), p. 27-41.

- Chanson, B. (1988). Etude de la variabilité de quelques propriétés physiques et anatomiques du bois de rejets de taillis de châtaignier (*Castanea sativa* Mill.). Application à l'étude de la roulure. Thèse 3^e cycle, USTL, Montpellier.
- Charron S. (2000). Etude des propriétés technologiques et de durabilité naturelle de deux espèces de mélèzes (*Larix decidua* Mill. Et *Larix leptolepis* Lindl.) et de leur hybride (*Larix eurolepis* Henry.). Fac. Sc. Agron. Gembloux, travail de fin d'étude.
- Chen, Y., Choong, Elvin T. (1994). Determining the effect of extractives on moisture movement using a "continuous" measuring system. *Wood and Fiber Science*, vol. **26**(3), p. 390-396.
- Choong, E. T., Achmadi, Suminar S. (1991). Effect of extractives on moisture sorption and shrinkage in tropical woods. *Wood and Fiber Science*, vol. **23**(2), p. 185-196.
- Cinotti, B. (1991). Recherche des propriétés intrinsèques du bois pouvant expliquer la sensibilité à la gélivure de *Quercus petraea* Liebl et *Q. robur* L. *Ann. For. Sci.*, vol. **48**, p. 453-468.
- Choong E. T. and Fogg P. J. (1989). Difference in moisture content and shrinkage between innerwood and outerwood of two shortleaf pine trees. *FPJ* 39; p. 13-18.
- CIRAD. (2003). Résultats des observations et des essais effectués, information techniques, N°210 [en ligne]. Disponible sur World Wide Web : <http://www.cirad.fr/activites/bois/en/syst/africa/acajoucail.pdf>. Consulté le 10/12/03
- Cloutier, A. (2007). Anatomie du bois avancée SBO-63955. Université Laval.
- CNRST. (2000). Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques : Communication initiale du Mali. Ministère de l'équipement de l'aménagement du territoire de l'environnement et de l'urbanisme, Bamako, 106p.
- Committee, IAWA. (1989). IAWA BULLETIN: list of microscopic features. *IAWA Journal*, vol. **10**(3): 219-332.
- Coster (1927). Zur Anatomie und Physiologie der Zuwachszonen-und Jahresringbildung in den Tropen. II. *Jard. Bot. Jard. Bot. Buitenzorg*, vol. **38**, p. 1-114.
- Coulibaly A. (2003). "Le Mali." En ligne sur <http://www.fao.org/ag/aGp/agpc/doc/Counprof/Mali/malifr.htm#3.%20Le%20Climat%20et%20les%20Zones%20Agroecologiques>.

- Croteau R., Kutchan T. M., Lewis N. G. (2000). Natural Products (Secondary Metabolites). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. W. G. B. Buchanan, R. Jones, *American Society of Plant Physiologists*, p.1250-1318.
- Dakak, J. E. (2002). La qualité du bois de Thuya de Maghreb (*Tetraclinis articulata*) et ses conditions de développement sur ses principaux sites phytoécologiques de son bloc méridional au Maroc, ENGREF Nancy.
- Degron R. (1994). Modélisation de la qualité du bois de chêne rouvre (*Quercus petraea* Liebl.). INRA. Champenoux, ENGREF.
- Degron R., Nepveu G. (1996). Prédiction de la variabilité intra- et interarbre de la densité du bois de chêne rouvre (*Quercus petraea* Liebl) par modélisation des largeurs et des densités des bois initial et final en fonction de l'âge cambial, de la largeur de cerne et du niveau dans l'arbre. *Ann. For. Sci.*, vol. **53**, p. 1019-1030.
- Deon G. et Schwartz R. (1988). Résistance naturelle des bois tropicaux aux attaques biologiques. *Bul. Soc. Bot. Fr.*, vol. **135**(3), p. 37-48.
- De Bie S., Ketner P., Paasse M. and Geerling C. (1998). Woody Plant Phenology in the West Africa Savanna. *Journal of Biogeography*, Vol. **25** (5), p. 883-900.
- Détienne P., Oyono F., Durrieu de Madron L., Demarquez B., Nasi R. (1998). L'analyse de cernes: applications aux études de croissance de quelques essences en peuplement naturels de forêt dense africaine. Montpellier, CIRAD-Forêt.
- Dev. S. (1989). Terpenoid. In *Natural Products of Woody Plants T. II*. R. J. W. Berlin, p. 691-791.
- Devineau J. L. (1999). Seasonal Rhythms and Phenological Plasticity of Savanna Woody Species in a Fallow Farming System (South-West Burkina Faso). *Journal of Tropical Ecology*, Vol. **15**(4), p. 497-513.
- Dunlop J. et Shaw M. (1991). Acoustic properties of some Australian woods. *Catgut Acoust. Soc. J.*, vol. **1** (7).
- Dupon G. (1983). Densité du bois. Le Matériau Bois Propriétés Technologie Mise en Œuvre. A.R.B.O.LOR. ALBE (68).
- Durrieu De Madron L. (2003). Accroissement diamétrique du bété et de l'iroko. *Bois et Forêts des Tropiques*, 275 p. 63-74
- Durrieu De Madron L., Nasi R., Détienne P. (2000). Accroissements diamétriques de quelques essences en forêt dense africaine. *Bois et Forêts des Tropiques*, 263 p. 63-74

- Fahlén et Salmén. (2003). Cross-sectional structure of the secondary wall of wood fibers as affected by processing. *J. of Materials Science*, vol. **38** (1), p. 119-126.
- FAO/SMIARHHTTP (2004). Situation Météorologique et Etat des cultures. Rapport N°: 1. [En ligne] en ligne sur : www.fao.org/giews/french/smiar.htm.
- Favrichon M. (1985). Projet d'inventaire et surveillance continue des ressources ligneuses au Mali. Nancy.
- Felber et Diallo (1991). Un programme de recherche en foresterie paysanne dans le sud du Mali: présentation et premiers résultats. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol. **142**(12), p. 983-998.
- Fengel D. and Wegener G. (1984). Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter, Berlin, 613 p.
- Fichtler E., Trouet V., Beeckman H., Coppin P., Worbes M. (2004). Climatic signals in tree rings of *Burkea Africana* and *Pterocarpus angolensis* from semiarid forest in Namibia. *Trees*, 18, p. 442-451
- Giffard P. L. (1974). L'arbre dans le paysage Sénégalais. Sylviculture en zone tropicale sèche. CTFT, 429p
- Gierlinger, N., Wimmer, R. (2004). Radial trends of heartwood extractives and lignin in mature European larch. *Wood Fiber Science*, vol. **36**, p. 387-394.
- Gierlinger N., Jacques D., Schwanninger M., Wimmer R., Pâques L. E. (2004). Heartwood extractives and lignin content of different larch species (*Larix* sp.) and relationships to brown-rot decay-resistance. *Tree - Structure and Function*, vol. 18(2), p. 230-236.
- Goulet M. (1967). Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Première partie: Hypothèse de travail et expériences préliminaires. Note de Recherches N° 2, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, Québec.
- Goulet M. (1968). Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Seconde partie: Essais du bois d'érable à sucre en compression radiale. Note de recherches N° 3, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, Québec.

- Gominho J., Figueira J., Rodrigues J. C. and Pereira H.(2001). Within-tree variation of heartwood, extractives and wood density in the eucalypt hybrid *urograndis* (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). *Wood and Fiber Science*, vol. **33**(1), p. 3-8.
- Grabner M., Muller U., Gierlinger N., Wimmer R. (2005). Effect of heartwood extractives on mechanical properties of larch. *IAWA Journal*, vol. **6** (2), p. 211-220.
- Grabner M., Wimmer R., Gierlinger N., Evans R., and Downes G. (2005). Heartwood extractives in larch and effects on X-ray densitometry. *Can. J. For. Res.*, vol.**35**, p. 2781-2786.
- Guilley E et Nepveu G. (2003). Interprétation anatomique des composantes d'un modèle mixte de densité du bois chez le Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.):Âge de cerne compté depuis la moelle, largeur de cerne, arbre, variabilité interannuelle et duraminisation. *Ann. For. Sci.*, vol. **60**, p. 331-346.
- Guilley E., Hervé J.C., Huber F., Nepveu G. (1999). Modelling variability of within-rings density components in *Quercus petraea* Liebl. with mixed-effects models and simulating the influence of contrasting silvicultures on wood density, *Ann. Sci. For.* 56, 449-458.
- Guitard D. et Fournier M. (1994). Comportement mécanique du bois. In: P. Jodin (Editor), *Le Bois Matériau d'Ingénierie*. ARBOLOR, Nancy, pp. 91-125.
- Guy Neuvy. (1993). L'évolution rétrograde des ressources forestières au Mali (en ligne).In M. Denis RETAILLE. *Pauvreté et crise dans le monde tropical*, Cinquièmes journées de géographie tropicale, Rouen 8-9-10 septembre 1993. Disponible sur http://www.univ-rouen.fr/ledra/E_CGR/E_CGR39_40/CGR00.html, consulté le 12/04/04.
- Haluk, J.-P. (1994). Composition chimique du bois. *Le bois matériau d'ingénierie*. ARBOLOR. ENGREF Nancy, p. 53-89.
- Hannrup B., Danell O., Ekberg I., Moell M. (2001). Relationships between wood density and tracheid dimensions in *Pinus sylvestris* L. *Wood and Fiber Science*, vol. **33**(2), p. 173-181.
- Harborne J. B. (1989). Flavonoïdes. In *Natural Products of Woody Plants T. II*. R. J. W. Berlin, p. 533-569.
- Hart J. H. (1989). The Role of Wood Exudates and Extractives in Protecting Wood from decay. *Natural Products of Woody Plants T. II*. R. J. W. Berlin, p. 861-880.

- Hébert J., Herman M., Jourez B. (2002). Sylviculture et qualité du bois de l'épicéa en région Wallonne. ASBL Forêt Wallonne, Belgique, 157p.
- Hemingway R. W. et Hillis W. E (1970). Heartwood formation in living stumps of Douglas - fir. *Wood Science and Technology*, vol. 4(4), p. 246-254.
- Hernández R. (1989). Influence des composantes secondaires et du contrefil sur les propriétés physico-mécaniques de bois tropicaux. Thèse de Ph.D., Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, 186 p.
- Hernández, R. (1993a). Influence of moisture sorption history on the swelling of sugar maple wood and some tropical hardwoods. *Wood Sci. Technol.*, 27(5): p. 337-345.
- Hernandez, et Restrepo (1995). Natural variation in wood properties of *Alnus acuminata* H.B.K. grown in Colombia. *Wood and Fiber Science*, vol. 27(1), p. 41-48.
- Hernandez R. (2007). Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods. *Wood Science and Technology*, vol. 41, P. 249-265.
- Hernandez, R. (2007a). Moisture sorption properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density and interlocked grain. *Wood and Fiber Science*, 39: p. 132-145.
- Hernández R. (2007b). Swelling properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density and interlocked grain. *Wood Fiber Sci.*, 39(1): p.146 – 158.
- Hernández R. (2007). Effects of extraneous substances, wood density and interlocked grain on fiber saturation point of hardwoods. *Wood Material Science and Engineering*, 2: p. 45-53.
- Hillis W. E (1971). Distribution, properties and formation of some wood extractives. *Wood Science and Technology*, vol.5 (4), p. 272-289.
- Hillis W. E. and Sumimoto M. (1989). Effects of extractives on pulping. In *Natural Products of Woody Plants T. II*. R. J. W. Berlin, p. 880-920
- Hock R. et Mariaux A. (1984). Vitesse de croissance et retrait du bois: Relation entre la largeur des cernes d'accroissement et le retrait au séchage dans quelques arbres tropicaux. *Bois et Forêt des Tropiques*, vol. 203.
- Holmbom B. (1999). Extractives. In *Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping and Papermaking*. T. E. Timell. Germany, Springer-Verlag: p. 124-148.

- Holz D. (1996). Acoustically important properties of xylophone-bar materials: can tropical woods be replaced by European species? *Acta Acust* **82**:878–884 (Cited in Rujinirun et al 2005).
- Hse Y. and Kuo L. (1988). Influence of extractives on wood gluing and finishing-a review. *Forest Products Journal*, vol. **38**(1), p. 52-58.
- Huang C. L., Lindström H., Nakada R. and Ralston J. (2003). Cell wall structure and wood properties determined by acoustics - a selective review. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. **61**(5), p. 321-335.
- Huber, F. (1993). Déterminisme de la surface des vaisseaux du bois des chênes indigènes (*Quercus robur* L, *Quercus petraea* Liebl). Effet individuel, effet de l'appareil foliaire, des conditions climatiques et de l'âge de l'arbre. *Ann. For. Sci.*, vol. **50**, p. 509-524.
- Hwang W. J., Kartal S. N., Yoshimura T., Imamura Y. (2007). Synergistic effect of heartwood extractives and quaternary ammonium compounds on termite resistance of treated wood. *Pest Management Science*, vol. **63**, p. 90-95.
- Imamura H. (1989). Contribution of Extractives to Wood Characteristics. Natural Products of Woody Plants T. II. R. J. W. Berlin, p. 842-860.
- Ismail. O. Toure. Programme de partenariat). C.-F. (1998-2002. Bamako, Mali: en ligne: <http://www.fao.org/docrep/004/X6794F/X6794F00.HTM>.
- ISO 3129 (1975). Bois-Méthodes d'échantillonnage et conditions générales pour les essais physiques et mécaniques. IBN, Bruxelles, 4p.
- Jardim e museu agricola do ultramar (1956). Essências florestais da Guiné portuguesa 2 *Pterocarpus erinaceus* poir. Ministerio do ultramar.
- Jodin, P. (Editor), 1994. Le Bois Matériau d'Ingénierie. ARBOLOR, Nancy, 433 pp.
- Keita B. (2000). Les sols dominant au Mali (en ligne). In FAO. *Quatorzième Réunion du Sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres*. Disponible sur <http://www.fao.org/DOCREP/005/Y3948F/y3948f00.htm#toc> consulté le 29/04/04.
- Keller (1983). Anatomie. Le matériau bois Propriétés technologie mise en œuvre. A.R.B.O.LOR. ALBE (68): 1-59.
- Keller, R., 1994. La Constitution du Bois. In: P. Jodin (Editor), Le Bois Matériau d'Ingénierie. ARBOLOR, Nancy, pp. 13-51.

- Keller, R. (1994). La constitution du bois. In le bois Matériau d'ingénierie. ARBOLOR. ENGREF, Nancy, 11-52.
- Kelly, B.A et Diallo O. I. (1992). Evaluation de la faculté de rejeter des essences locales dans la zone humide au sud du Mali (Sikasso). Sikasso, IER/CRRAS Note technique N°13.
- Kelly et Cuny (2000). Afforestation using local forest tree species on hydromorphic soil: Results of a forestry experiment in southern Mali. *Revue Forestière Française*, vol. **52**(5), p. 453-466.
- Keunecke D., Sonderegger W., Pereteanu K., Lüthi T., Niemz P. (2007). Determination of Young's and shears modulus of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*, vol. **41** (4), p. 309-327.
- Kliger I. R., Perstorper M., Johansson G. (1998). Bending Properties of Norway spruce timber. Comparison between fast-and slow-grown stands and influence of position of sawn timber. *Ann. For. Sci.* vol. **55** p. 349-358.
- Klumpers, J. (1994). Le Déterminisme de la couleur du bois de chêne: Etude sur les relations entre la couleur et des propriétés physiques, chimiques et anatomiques ainsi que des caractéristiques de croissance. INRA. Nancy, ENGREF.
- Kojima et Yamamoto (2004). Effect of microfibril angle on the longitudinal tensile creep behavior of wood. *J. Wood Sci.*, vol. **50** (4), p. 301-306.
- Kojima et Yamamoto (2005). Effect of moisture content on the longitudinal tensile creep behavior of wood. *J. Wood Sci.*, vol. **51**(5), p. 462-467.
- Koubaa A., Zhang S. Y., Isabel N., Beaulieu J., Bousquet J. (2000). Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce. *Wood and Fiber Science*, vol. **32**(1), p. 61-71.
- Kuo M. L., and Arganbright D G. (1980). Cellular distribution of extractives in redwood and incense cedar. I. Radial variation in cell wall extractive content. *Holzforschung* 34; p.17-22.
- Leclercq A et Jourez B. (1992). Aperçu de la qualité du bois de chêne rouge d'Amérique. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, vol. **27** (3): 309-325.
- Leclercq A. (1977). Relation entre la croissance, la structure et la densité du bois de hêtre. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, vol. **12**(4), p. 321-330.

- Leclercq A. (1979). Influence du milieu sur les propriétés physico-mécaniques du bois de hêtre (*Fagus sylvatica*) .*Bull. Rech. Agron. Gembloux*, vol. **14**(3-4), p. 213-240.
- Leclercq A. (1980). Les relations entre la sylviculture du hêtre (*Fagus sylvatica* L) et les propriétés physiques et mécaniques de son bois. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, vol. **15**(2), p. 121-148.
- Leclercq A. (1981). Relation entre la structure anatomique du bois de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et ses propriétés physiques et mécaniques. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, vol.**16**(1), p. 3-26.
- Leclercq A. (1982). Influence du milieu sur la structure anatomique du bois de hêtre (*Fagus sylvatica* L). *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, vol.**17**(4), p. 363-376.
- Leclercq A. (1983). Influence de la sylviculture sur la structure anatomique du bois de hêtre (*Fagus sylvatica* L). *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, vol. **18**(3), p. 197-209.
- Leclercq A. (1985). Relation entre la technologie et la sylviculture dans la production de bois de qualité. *Annales de Gembloux*, vol. **91**, p. 173-190
- Lei H., Gartner B. L. and Milota M. R. (1997). Effect of growth rate on the anatomy, specific gravity and bending properties of wood from 7 – year-old red alder (*Alnus rubra*). *Can. J. For. Res.* 27 ; p. 80-85
- Lenger B., Pierson J., Poncelet J. (1999). Transformation utilisation et industries du bois en Europe. Edition du perron, Liège.
- Loupe D., Ouattara N. (1993). Les problèmes de semences forestières, notamment en Afrique (Tree seed problems, with special reference to Africa). In : Somé L.M. (ed.), De Kam M. (ed.). Leiden : Backhuys. Symposium du groupe de travail IUFRO 'problèmes des semences', 1992-11-23/1992-11-28, Ouagadougou, Burkina faso, p.393-407.
- Machado et Cruz (2005). Within stem variation of Maritime pine timber mechanical properties. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. **63**(2), p. 154-159.
- Maïga A. (1999). Ressources forestières naturelles et plantations au Mali. PROJET GCP/INT/679/EC, CE-FAO. [en ligne]; Disponible sur <http://www.fao.org/DOCREP/004/X6811F/X6811F00.HTM>, consulté le 03/05/04.
- Mariaux, A. (1967). Les cernes dans les bois tropicaux africains, nature et périodicité. *Bois et Forêt des Tropiques*, vol. **113**, p. 3-14.

- Mariaux, A. (1968). Les cernes dans les bois tropicaux africains, nature et périodicité. *Bois et Forêt des Tropiques*, vol. **114**, p. 23-37.
- Mariaux, A. (1983). Ultrastructure du bois. Le matériau bois propriétés technologie mise en œuvre. A.R.B.O.LOR. ALBE (68): A2-1 à A2-21.
- Mantanis G., Young R. and Rowell R. (1994). Swelling of wood. Part 1. Swelling in water. *Wood Sci.Technol.*, 28(2): p. 119–134.
- Mantanis G., Young R., and Rowell R. (1995). Swelling of Wood; Part III. Effect of Temperature and Extractives on Rate and Maximum Swelling. *Holzforschung*, 49: p. 239-248.
- Matsunaga M. Obataya E., Minato K., Nakatsubo F. (2000). Working mechanism of adsorbed water on the vibrational properties of wood impregnated with extractives of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng.). *J. Wood Sci*, vol. **46**, p. 122-129.
- Matsunaga, M., Sugiyama, M., Minato, K. and Norimoto, M. (1996). Physical and mechanical properties required for violin bow materials. *Holzforschung*, 50: 511-517.
- Matsunaga, M., Minato, K. and Nakatsubo, F. (1999). Vibrational properties changes of spruce wood by impregnation with water soluble extractives of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng.). *Journal of Wood Science*, 45: 470-474.
- Maurya R., Ray A. B., Duah F. K., Slatkin D. J., Schiff P. L. (1984). Constituents of *Pterocarpus marsupium*. *Journal of Natural Products*, vol. **47**(1), p. 179-181.
- Maydell Von H. J. (1983). Arbres et arbustes du Sahel: leurs caractéristiques et leurs utilisations. Eschborn, GTZ, 531p.
- Mazet J.F., Nepveu G.(1991). Relations entre caractéristiques de retrait et densité du bois chez le Pin sylvestre, le Sapin pectiné et l'Epicéa commun. *Annales des Sciences Forestières*, **48** (1), p. 87-100.
- MDRE. (2002). Contribution du Mali au rapport sous-régional sur l'état de l'environnement. MDRE, Bamako.
- Ministère de l'Environnement du Mali (1998). Rapport intérimaire National sur la conservation de la diversité biologique. En ligne <http://www.biodiv.org/doc/world/ml/ml-nr-01-fr.pdf>.
- Mothée F., Duchanois G., Zannier B., Leban J.M. (1998a). Analyse microdensitométrique appliquée au bois: une méthode de traitement des données

- aboutissant à la description synthétique et homogène des profils de cernes (programme CERD), *Ann. Sci. For.* 55, 301-315.
- Mothée F., Sciama D., Leban J.M., Nepveu G. (1998b). Localisation de la transition bois initial - bois final dans un cerne de Chêne par analyse microdensitométrique, *Ann. Sci. For.* 55, 437-449.
- Müller U., Gindl and Teischinger A. (2003). Effect of cell anatomy on the plastic and elastic behavior of different wood species load perpendicular to grain. *IAWA Journal*, vol. 24(2), p. 117-128.
- Narayanamurti, D. (1957). Die Bedeutung der Holzextraktstoffe. *Holz als Roh- und Werkstoff* vol. 9, p. 370-380.
- Nasi R. and Sabatier M. (1988a). Projet Inventaire des ressources ligneuses au Mali. Rapport de synthèse, première phase. Les formations végétales. Ministère chargé des Ressources Naturelles et de l'Élevage. Direction Nationale des Eaux et Forêts. BDPA/SCET-AGRI, CTFT (Département CIRAD), 205 p.
- Nasi R. and Sabatier M. (1988b). Projet Inventaire des ressources ligneuses au Mali. Rapport technique, première phase. Inventaire des formations végétales. Ministère chargé des Ressources Naturelles et de l'Élevage. Direction Nationale des Eaux et Forêts. BDPA/SCETAGRI, CTFT (Département CIRAD), I 15 p.
- Nearn W. T. (1955). Effect of water soluble extractives on the volumetric shrinkage and equilibrium moisture content of eleven tropical and domestic woods. *Bull. 598, Agricultural Experiment Station, Pennsylvania State University, University Park, PA.* 32 pp.
- Nepveu G. et Tran Ngoc. (1984). Relations entre les composantes densitométriques et l'état de surface de planches rabotées chez *Pseudotsuga mnziesii*. *Ann. For. Sci.*, Vol. 41 (2) p.171-194.
- Nepveu, G. (1994). Variabilité. In: P. Jodin (Editor), *Le Bois Matériau d'Ingénierie*. ARBOLOR, Nancy, pp. 127-199.
- NF B51-002 (1942). Bois-Caractéristiques mécaniques des bois. AFNOR, Paris, 16p.
- NF B51-003 (1985). Bois-Conditions générales d'essais. AFNOR, Paris, 4p.
- NF B51-004 (1985). Bois-Détermination de l'humidité. AFNOR, Paris, 3p.
- NF B51-005 (1985). Bois-Détermination de la masse volumique. AFNOR, Paris, 5p.
- NF B51-006 (1985). Bois-Détermination du retrait. AFNOR, Paris, 5p.

- Nicault A., Rathgeber C., Tessier L., Thomas A. (2001). Observations sur la mise en place du cerne chez le pin d'Alp (*Pinus halepensis* Mill.): Confrontation entre les mesures de croissance radiale, de densité et les facteurs climatiques. *Ann. For. Sci.*, vol. **58**, p. 769-784.
- Norimoto M., Tanaka F., Ohogama T. & Ikimune R. (1986). Specific dynamic Young's modulus and internal friction of wood in the longitudinal direction. *Wood Res. Tech. Notes* **22**, p. 53-65.
- Noshiro S., Joshi L., Suzuki M. (1994). Ecological wood anatomy of *Allnus nepalensis* (*Betulaceae*) in East Nepal. *J. Plant Research*, vol. **107**(4), p. 399-408.
- Noshiro S. and Suzuki M. (1995). Ecological wood anatomy of Nepalese Rhododendrom (*Ericaceae*). 2. Intraspecific variation. *J. of Plant Research*, vol. **108**(2), p. 217-233.
- Nzokou P. and Kamdem P. D. (2006). Influence of wood extractives on the photo-discoloration of wood surfaces exposed to artificial weathering. *Color Research & Application* vol. **31**(5), p. 425-434.
- Nzokou P. and Kamdem P. D. (2004). Influence of wood extractives on moisture sorption and wettability of red oak (*Quercus rubra*), black cherry (*Prunus serotina*), and red pine (*Pinus resinosa*). *Wood Fiber Science*, vol. **36**(4), p. 483-492.
- Obataya E, Umezawa T, Nakatsubo F, Norimoto M. (1999). The effects of water soluble extractives on the acoustic properties of reed (*Arundo donax* L.). *Holzforschung*, vol. 53, p. 63-67.
- Obataya E., Ono T., Norimoto, M. (2000). Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Materials Science*, **35**: p. 2993-3001
- Obst J. R. (1998). Special (Secondary) Metabolites from Wood. In *Forest Products Biotechnology* ; Taylor & Francis.
- Oger et Leclercq A. (1977). L'échantillonnage appliqué à la détermination des propriétés physiques et mécaniques du bois. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, vol. **12** (4), p. 331-338.
- Ono T. et Norimoto M. (1985). Anisotropy of dynamic yong's modulus and internal friction in wood. *Japan Journal of Applied Physics*, vol. **24**(8), p. 960-964.
- Ono, T. (1983). On Dynamic Mechanical Properties in the trunks of Wood for Musical Instruments. *Holzforschung*, vol. **37**, p. 245-250.

- Ouedraogo S. K., Kaboré C. Y. Z., Ledin I. (2007). Importants characteristics of some browse species in an agrosylvopastoral system in West Africa. *Agroforest Syst* DOI 10. 007/s10457-007-9095-0.
- Ouis D. (2002). On the frequency dependence of the modulus of elasticity of wood. *Wood Sci Technol* **36**; p. 335–346
- Owoundi, R. E. (1992). Modélisation de la rétractibilité du bois en relation avec des paramètres de la structure de l'accroissement annuel et de la position dans l'arbre chez *Quercus robur* L. et *Quercus petraea* L. L'ENGREF. Nancy, 184p.
- Parker M. L., Smith J. H., Johnso S. (1978). Annual-ring width and density patterns in red alder. *Wood and Fiber Science*, vol. **10**(2), p. 120-130.
- PDM (Partenariat pour le Développement Municipal) (2004). Aménagement du Territoire en Afrique de l'Ouest et du Centre. En ligne http://www.aménagement-afrique.com/article.php3?id_article=167.
- Perré P. (2007). Experimental device for the accurate determination of wood-water Relation on micro-sample. *Holzsforschung*, vol. **61**, p. 419-429
- Peter et Sengbusch. (2003). Bordered Pit of a Pine's (*Pinus silvestris*) Secondary Xylem. En ligne <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e06/hoftupf.htm7>.
- Pétit, S. (2000). Environnement, conduite des troupeaux et usage de l'arbre chez les agropasteurs peuls de l'ouest burkinabé. Approche comparative et systématique de trois situations Barani, Kourouma, Ouangolodougou. Thèse d'Université Nouveau régime.
- Petit. S. et Mallet B. (2001). L'émondage d'arbres fourragers : détail d'une pratique pastorale. *Bois et Forêt des Tropiques*, vol. **270** (4).
- Piedra T. E. et Zobel B. J. (1986). Georaphic variation in wood properties of *Pinus tecunumanii*. *Wood and Fiber Science*, **18** (1), p. 68-75.
- Polge HetKeller R. (1973). Qualité du bois et largeur d'accroissements en forêt de Tronçais. *Annales des Sciences Forestières*, vol. **30**(2), p. 91-125.
- Polge H (1973). Etat actuel des recherches sur la qualité du bois de hêtre. *Bulletin Technique de l'Office National des Forêts*, n°4, p. 13-22.
- Polge H(1973). Qualité du bois et largeur d'accroissements en forêt de Tronçais. *Revue Forestière Française*, XXV, n°5, p. 361-370.
- Polge H. (1973). Facteurs écologiques et qualité du bois. *Ann. For. Sci.*, vol. **30** (3), p. 307-328.

- Polman J. E., Michon S. G. L., Militz H., Helmink A. Th. F. (1999). The wood of *Metasequoia glyptostroboides* (Hu et Cheng) of Dutch origin, *Holz als Roh- und Werkstoff* 57: p. 215-221, Springer-Verlag.
- Prat R., Mosiniak M., Roland J. C. (2002). La paroi primaire de la cellule végétale. Disponible en ligne :<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/paroi/cellulose.htm>; consulté le 06 avril 2009.
- Projet Inventaire des Ressources Terrestres (PIRT) (1983). Les ressources terrestres au Mali. Vol I, Vol II et Vol III. Ed. TAMS, New York.
- Rao R. V., Aebischer D. P. & Denne M. P. (1997). Latewood density in relation to wood fiber diameter, wall thickness, and fiber and vessel percentages in *Quercus robur* L. *IAWA Journal* vol. **18** (2) p. 127-138.
- Rao R.V., Shashikala S., Sreevani P., Kothiyal V., Sarma C.R. and Piarelal (2002). Within tree variation in anatomical properties of some clones of *Eucalyptus tereticornis* Sm. *Wood Science and Technology*, 36 : p. 271-285.
- Ravishankara (2002). Evaluation of antioxidant properties of root bark of *Hemidesmus indicus* R. Br. (Anantmul). *Phytomedicine*, vol. **9** p. 153-160.
- Richard M. E. (1981). Molecular and Cell Wall structure of Wood. *Wood: Its Structure and Properties*. F. F. Wangaard. State University of New York.
- Richter H. G. (1988). *Holz als Rohstoff für den Musikinstrumentenbau*, Moeck Verlag Celle.
- Rodríguez et al. (2006). Anatomical wood variation of *Buddleja cordata* (Buddlejaceae) along its natural range in Mexico. *Tree - Structure and Function*, vol. **20**(2), p. 253-261.
- Roffael E., Poblette H., Torres M. (2000). Über die Acidität von Kern-und Splintholz der Kastanie (*Castanea sativa*) aus Chile. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. **58**(1-2) p. 120-122.
- Rouessac Francis, R. A. (1997). *Analyse chimique, Méthodes et techniques instrumentales modernes*. Paris Milan Barcelone.
- Rowe J. W. (1989). *Natural Products of Woody Plant Book T. I*. Berlin Heidelberg New York.
- Rowe J. W. (1989). *Natural Products of Woody Plants Book T.II*. Berlin Heidelberg New York.

- Rujinirun, C., Phinyocheep, P., Prachyabrued, W. and Laemsak, N., (2005). Chemical treatment of wood for musical instruments. Part I: acoustically important properties of wood for the Ranad (Thai traditional xylophone). *Wood Science and Technology*, 39(1): p. 77-85.
- Salsar S. R. (1994). *Instrumentos musicales del folclor Costarricense*. Editorial Tecnologica de Costarica
- Schneider P. (1996). *Sauvegarde et Aménagement de la forêt classée de Farako (Région de Sikasso, Mali-sud)*. Zurich, Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich.
- Sekha A. C. and Rajput S. S. (1967). Some Studies on the Shrinkage Behaviour of Wood. *Wood Sci. Technol.*, 1: p. 99-108.
- Seshadri T. R. (1972). Review Article, Polyphenols of *Pterocarpus* and *Dalbergia* woods. *Phytochemistry*, vol. **11 (3)**, p. 881-898
- Shackleton C. M. (2002). Growth patterns of *Pterocarpus angolensis* in savannas of the South African lowveld. *Forest Ecology and Management*; 166, p. 85-97.
- Simpson L. A.; Barton A. E. M. (1991). Determination of the fiber saturation point in whole wood using differential scanning calorimetry *Wood Sci. Technol.*, 25: p. 301-308.
- Singh (1987). Wood density variations in thirteen Canadian tree species. *Wood and Fiber Science*, vol. **19(4)**: 362-369.
- Skaar C. (1988). *Wood-water relations*. Springer-Verlag, New York, NY. 283p.
- Snackers G., Nepveu G., Guilley E. et Cantagrel R. (2000). Variabilité géographique, sylvicole et individuelle de la teneur en extractibles de chênes sessiles français (*Quercus petraea* Liebl.): polyphénols, octalactones et phénols volatils. *Ann. For. Sci.*, vol. 57, p. 251-260.
- Spalt, H. A. (1958). The fundamentals of water vapor sorption by wood. *Forest Products Journal*, 8: p. 288-295
- Spalt, H. A. (1957). The Sorption of Water Vapor by Domestic and Tropical Woods. *Forest Products Journal*, 7: p. 331-335.
- Stahle D. W., Mushove P. T., Cleaveland M. K., Roig F., Haynes G. A. (1999). Management implications of annual growth rings in *Pterocarpus angolensis* from Zimbabwe. *Forest Ecology and Management*; 124, p. 217-229
- Stamm, A. J. (1971). Review of nine methods for determining the fiber saturation points of wood and wood products. *Wood Sci.*, 4, p.114-128.

- Stevanovic T. (2008). Cours de Chimie du bois, CHM-22170. Université Laval.
- Surowiec, I., Nowik, W. and Trojanowicz, M. (2004). Identification of "insoluble" red dyewoods by high performance liquid chromatography-photodiode array detection (HPLC-PDA) fingerprinting. *Journal of Separation Science*, 27: 209-216.
- Sylla S. N.; Ndoye I.; Ba A. T.; Gueye M.; Dreyfus B. (1998). Assessment of nitrogen fixation in *Pterocarpus erinaceus* and *P. lucens* using ¹⁵N labeling techniques. *Arid Land Research and Management*, vol. 12 (3), p. 247 – 254
- Tabarsa T. et Chui H. Y. (2000). Stree-strain response of wood under radial compression. Part I. Test method and influence of cellular properties. *Wood and Fiber Science*, vol. 32(2), p. 144-152.
- Therrell M. D., Stahle D. W., Mukelabai M. M., Shugart H. H. (2007). Age and radial growth dynamics of *Pterocarpus angolensis* in southern Africa. *Forest Ecology and Management*; 244, p. 24-31.
- Thibaut B., Baillières H., Chanson B., Fournie-Djimbi M. (1997). Plantations d'arbres à croissance rapide et qualité des produits forestiers sous les tropiques. *Bois et Forêt des Tropiques*, vol. 252, p. 49-53.
- Thomas R. J. (1981). *Wood Anatomy and Ultrastructure. Wood: Its Structure and Properties*. F. F. Wanggrd. The Pennsylvania State university.
- Thor, E. (1964). Variation in Virginia pine. Part I: Natural variation in wood properties. *Jour. For.* 62: 258-262.
- Till, C. (1986). L'influence des facteurs écologiques sur l'épaisseur des cernes du cèdre de l'atlas (*Cedrus atlantica* (End.) Carrière) au Maroc. *Ecologia mediterranea XII* (3-4), p. 33-47.
- Torelli N., Trajkovi'J., Vladimir S. J. (2006). Influence of phenolic compounds in heartwood of Silver fir (*Abies alba* Mill.) on the equilibrium moisture content *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: p. 341–342
- Toure, I. O. (2001). *Revue des données du Bois-Energie au Mali*. FAO, Rome, Italy
- Treacy M., Evertsen J. and Dhubháin A. (2000). A comparison of mechanical and physical wood properties of a range of Sitka spruce provenances COFORD-National Council for Forest Research and Development ; final report. Ireland

- Tsoumis et Panagiotidis (1980). Effect of growth condition on wood quality characteristics of black pine (*Pinus nigra* Arn.). *Wood Science and Technology*, vol.14 (4), p. 301-310.
- Veenin T., Fujita M., Nobuchi T. & Siripatanadilok S. (2005). Radial variations of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. *IAWA Journal*, vol. **26** (3), p. 353-361.
- Venäläinen M., Harju A. M., Terziev N., Laakso T., Saranpää P. (2006). Decay resistance, extractive content, and water sorption capacity of larch (*Larix sibirica* Lebed.) heartwood timber. *Holzforschung*, vol. 60, p. 99-103.
- Walker J.C.F. and Butterfield B.G. (1996). The importance of the microfibril angle for the processing
- Wangaard F.F. et Granados L. A. (1967). The effect of extractives on water - vapor sorption by wood. *Wood Science and Technology*, vol. **1**(4), p. 253-277.
- Washusen R., Ades P., Evans R., Ilic J. and Vinden P. (2001). Relationships between Density, Shrinkage, Extractives Content and Microfibril Angle in Tension Wood from Three Provenances of 10-Year-Old *Eucalyptus globulus* Labill). *Holzforschung*55 176–182
- Wilkins (1991). Sapwood, heartwood and bark thickness of silviculturally treated *Eucalyptus grandis*. *Wood Science and Technology*, vol. **25**, p. 415-423.
- Wilkins A. P. and Papassotirious S. (1989). Wood anatomical variation of *Acacia melanoxylon* in relation to latitude. *IAWA Bulletin new series* 10; p.201–207.
- Wu Y.Q., Hayashi K., Liu Y., Cai Y., Sugimori M. (2006) Relationships of anatomical characteristics versus shrinkage and collapse properties in plantation-grown eucalypt wood from china. *J. Wood Sci*52:p. 187-194.
- Yano H. (1994). The change in acoustic properties of West red cedar due to methanol extraction. *Holzforschung* 48; p.491–495.
- Yano H., Kajita H. and Minato K. (1994). Chemical treatment of wood for musical instruments. *Journal of the Acoustical Society of America*, **96**(6): p. 3380-3391.
- Yano H., Kyou K., Furuta Y. et al (1995). Acoustic properties of Brazilian Rosewood used for guitar back plates. *Mokuzai gakkaiishi* 41; p. 17-24.
- Yoshimoto T. (1989). Effect of extractives on the utilization of wood. *Natural Products of Woody Plants T. II. R. J. W. Berlin*, p. 920-952.

- Zhu J., Nakano T., Hirakawa Y. (1998). Effect of growth on wood properties for Japanese larch (*Larix kaempferi*): Differences of annual ring structure between corewood and outerwood. *J. Wood Sci* **44**(5): p. 392-396.
- Zinkel D.F. (1989). Naval Stores. In *Natural Products of Woody Plants T. II*. R. J. W. Berlin, p. 953-988.
- Zink-Sharp, A., Stelmokas J. S., Gu H-M. (1999). Effects of wood anatomy on the mechanical behavior of single bolted connections. *Wood and Fiber Science*, **31**(3), p. 249-263.
- Zobel et Buijtenen (1989). *Wood Variation—Its Causes and Control*. Springer-Verlag. Berlin Germany, 363p.
- Zobel B. J. and Sprague J. R. (1998). *Juvenile wood in forest trees*. Springer-Verlag. Berlin, Germany 300p.