

Table de matières

INTRODUCTION GENERALE	5
CHAPITRE I.....	11
CONTEXTE ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	11
I-1 L'OKOUME AU GABON	13
I-11 Climat du Gabon	13
I-12 Description botanique de l'Okoumé.....	15
I-13 Biologie de l'Okoumé.....	16
I-14 Aire naturelle de l'Okoumé	18
I-15 Sylviculture de l'Okoumé.....	20
I-16 Situation des plantations	21
I-17 Production et exportation du bois de 1980 à 2004.....	22
I-17.1 Production de bois	22
I-17.2 Commerce du bois.....	24
I-2 LE MATERIAU BOIS	26
I-21 Structure du bois.....	26
I-22 Macro structure.....	27
I-22.1 De l'arbre au bois	27
I-22.2 L'accroissement annuel	28
II-23 Micro structure du bois.....	30
I-23.1 Le plan ligneux.....	30
I-23.2 Caractérisation des éléments du plan ligneux.....	32
I-23.3 Limite bois juvénile et bois adulte.....	32
I-24 Propriétés physiques et mécaniques.....	33
I-24.1 Densité ou masse volumique	33
I-24.2 Module d'élasticité longitudinal (E_L)	34
I-24.3 La stabilité dimensionnelle.....	35
I-25 Durabilité naturelle.....	36
I-25.1 Agents de détérioration.....	36
I-25.2 Evaluation de la durabilité naturelle	39
I-25.3 Classes de durabilité naturelle	40
I-25.4 Origine de la durabilité naturelle	41
I-25.41 Facteurs Biologiques et anatomiques.....	41
I-25.42 Les facteurs chimiques	42
CHAPITRE II	45
MATERIEL ET METHODES.....	45
II-1 SITES DE RECOLTE DES ECHANTILLONS	47
II-2 MATERIEL VEGETAL ET AFFECTATION	49
II-21 Matériel végétal	49
II-22 Affectation du matériel végétal.....	50
II-3 ANATOMIE	52
II-31 Matériel et méthode utilisés pour la description anatomique	52
II-31.1 Matériel lignocellulosique.....	52
II-31.2 Méthode (anatomie)	53
II-31.21 Exécution des coupes	53
II-31.22 Montage des coupes	53
II-32 Dendrochronologie	54
II-32.1 Matériel et Méthode	54
II-4 PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES	55
II-41 Masse volumique et Module d'élasticité longitudinal (E_L)	55
II-41.1 Matériel végétal.....	55
II-41.2 Méthode (masse volumique et module).....	55
II-41.21 Masse volumique	55
II-41.22 Module d'élasticité longitudinal (E_L)	56

II-42 Stabilité dimensionnelle	60
II-42.1 Matériel végétal.....	60
II-42.2 Méthode (stabilité)	61
II-5 DURABILITE NATURELLE.....	62
II-51 Matériel végétal	62
II-51.1 Matériel bois.....	62
II-51.11 Découpe des éprouvettes	63
II-51.2 Agents de dégradation	64
II-51.3 Milieu de culture et récipients utilisés.....	64
II-52 Méthode (durabilité).....	64
II-52.1 Evaluation de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores	64
II-52.2 Validité des résultats : test de virulence des souches utilisées.....	67
II-52.3 Calcul d'incertitude expérimentale sur les pertes de masse.....	67
II-52.4 Estimation de la masse anhydre théorique des éprouvettes avant l'essai.....	68
II-6 DEMARCATION DU BOIS JUVENILE (BJ) DU BOIS ADULTE (BA)	68
II-61 Evaluation des fibres.....	68
II-61.1 Matériel.....	69
II-61.11 Matériel végétal.....	69
II-61.12 Appareillage d'analyse de fibres	70
II-61.2 Méthode (fibre)	70
II-61.21 Récupération des fibres	70
II-61.22 Analyse au MorFi.....	71
II-7 ANALYSES CHIMIQUES	72
II-71 Appareillage et méthodes utilisés.....	72
II-71.1 Espace de tête statique ou Headspace.....	72
II-71.2 Extraction et opérations annexes	73
II-71.21 Extraction du bois d'Okoumé.....	73
II-71.22 Dosage de la cellulose	73
II-71.23 Dosage de la lignine Klason	74
II-71.3 Extraction de l'oléorésine.....	75
II-71.31 Hydrodistillation	75
II-71.32 Extraction au soxhlet.....	75
II-71.4 Séparation sur colonne ouverte	75
II-71.5 Chromatographie analytique et préparative sur couche mince (CCM).....	75
II-71.6 Chromatographie en phase gazeuse (GC).....	76
II-71.7 Chromatographie en phase gazeuse couplée avec un spectromètre de masse (GC-MS)	76
II-8 ACTION DES AMYRINES SUR LES CHAMPIGNONS	77
II-81 Activation des souches fongiques.....	78
II-82 Prélèvement des spores.....	78
II-83 Evaluation de l'action des α - et β -amyrines sur les champignons.....	78
II-9 METHODE D'ANALYSE STATISTIQUE	79
CHAPITRE III.....	81
RESULTATS.....	81
III-1 MACRO ET MICRO STRUCTURES DE L'OKOUME	83
III-11 Observations macroscopiques	83
III-11.1 En section transversale.....	83
III-11.2 En section longitudinale.....	85
III-12 Observations microscopiques	85
III-12.1 Les éléments longitudinaux	85
III-12.11 Les vaisseaux	85
III-12.12 Fibres	86
III-12.13 Parenchyme longitudinal.....	87
III-12.2 Les éléments radiaux : les rayons ligneux.....	87
III-13 Dendrochronologie.....	87
III-13.1 Sur le plan anatomique.....	87
III-13.2 Paramètres environnementaux	90
III-13.3 Largeur de cerne au WinDindro [®]	91
III-2 PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES.....	92
III-21 Masse volumique.....	93
III-21.1 Variabilité intra-arbre.....	93
III-21.2 Variabilité inter-arbre.....	94

III-22 Module d'élasticité longitudinal (E_L).....	96
III-22.1 Variabilité intra-arbre de E_L	96
III-22.2 Variabilité inter-arbre du module d'élasticité longitudinal (E_L).....	97
III-23 Stabilité dimensionnelle.....	100
III-23.1 Retraits totaux.....	100
III-23.1.1 Retrait volumique total.....	100
III-23.1.2 Retraits linéaires.....	101
III-23.2 Point de saturation des fibres (PSF).....	103
III-3 DURABILITE NATURELLE.....	105
III-31 Comportement du bois d'Okoumé face aux champignons lignivores.....	105
III-31.1 Méthodes de durabilité utilisées.....	105
III-31.2 Durabilité de l'Okoumé vis-à-vis de <i>Gloeophyllum trabeum</i>	106
III-31.3 Durabilité de l'Okoumé vis-à-vis de <i>Coriolus versicolor</i>	107
III-31.4 Durabilité de l'Okoumé vis-à-vis de <i>Antrodia sp.</i>	108
III-31.5 Okoumé et <i>Pycnoporus sanguineus</i>	109
III-32 Variabilité intra-arbre de la durabilité naturelle de l'Okoumé face aux champignons lignivores... ..	110
III-32.1 Variabilité dans l'arbre vis-à-vis de <i>Gloeophyllum trabeum</i>	110
III-32.2 Variabilité vis-à-vis de <i>Coriolus versicolor</i>	111
III-32.3 Variabilité vis-à-vis de <i>Antrodia sp.</i>	112
III-32.4 Variabilité vis-à-vis de <i>Pycnoporus sanguineus</i>	113
III-33 Variabilité inter-arbre de l'Okoumé.....	113
III-33.1 Variabilité face à <i>Gloeophyllum trabeum</i>	113
III-33.2 Variabilité face à <i>Coriolus versicolor</i>	114
III-33.3 Variabilité face à <i>Antrodia sp.</i>	115
III-33.4 Variabilité face à <i>Pycnoporus sanguineus</i>	116
III-4 DETERMINATION DE LA LIMITE BOIS JUVENILE/BOIS ADULTE (BJ/BA).....	118
III-41 Evaluation des caractéristiques morphologiques des fibres d'Okoumé.....	118
III-42 Retrait longitudinal total.....	120
III-43 Diamètre des vaisseaux.....	121
III-44 Largeur des cernes.....	123
III-5 APPORT DE LA LIMITE BOIS JUVENILE-BOIS ADULTE (BJ/BA).....	123
III-6 EVALUATION DES CONSTITUANTS CHIMIQUES DU BOIS DE CŒUR ET DE L'OLEORESINE DE L'OKOUME....	126
III-61 Constituants pariétaux du bois d'Okoumé.....	126
III-62.1 Analyse des extractibles du bois parfait d'Okoumé.....	127
III-62.1.2 Analyse des fractions isolées du duramen du bois d'Okoumé.....	127
III-62.1.3 Comparaison des fractions brutes F_9 et F_M	127
III-62.1.4 Séparation de la fraction F_M par colonne de silice.....	129
III-62.1.5 Analyse de la fraction F_M par couplage GC-MS.....	129
III-63 Oléorésine.....	133
III-63.1 Analyse des composés volatils.....	133
III-63.2 Analyse des composés non volatils de l'oléorésine.....	135
III-7 ACTIVITE DES AMYRINES SUR LES CHAMPIGNONS.....	138
CHAPITRE IV.....	141
DISCUSSION.....	141
IV-1 FIXITE DU PLAN LIGNEUX.....	143
IV-2 CERNE ANNUEL DE L'OKOUME.....	143
IV-3 LIMITE BOIS JUVENILE ET BOIS ADULTE.....	145
IV-4 MASSE VOLUMIQUE.....	146
IV-5 MODULE D'ELASTICITE LONGITUDINAL (E_L).....	147
IV-6 LA STABILITE DIMENSIONNELLE.....	148
IV-7 CONSTITUANTS CHIMIQUES DE L'OKOUME.....	149
IV-8 DURABILITE NATURELLE DU BOIS D'OKOUME.....	150
IV-9 IMPACT DES AMYRINES.....	153
IV-10 RECAPITULATIF.....	154
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	157
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	165
ANNEXES.....	177

INTRODUCTION GENERALE

Parlant de l'Okoumé, Robert Catinot a dit « je forme l'espoir que les forestiers africains entreprennent des travaux de régénération de la forêt à Okoumé qui par ses énormes possibilités constitue pour leurs pays un des piliers économiques permanents les plus solides et les plus prometteurs ».

L'Okoumé (*Aucoumea klaineana* Pierre) est une essence quasi endémique au Gabon mais qu'on retrouve également dans les pays limitrophes (Cameroun, Congo et Guinée-Équatoriale). Cet arbre est, depuis des décennies, associé à la vie quotidienne des populations du Gabon. Elles s'éclaircissent avec son oléorésine, fabriquent des pirogues, des ustensiles et l'utilisent comme source d'énergie. Pour les Gabonais, ce bois reste avant tout un matériel de construction, tant en milieu rural qu'en milieu urbain (maisons en planches et échafaudages).

L'exploitation de l'Okoumé a commencé à partir de 1889, suite aux conclusions d'un bureau d'études allemand qui qualifie son bois d'excellente qualité pouvant se prêter à de nombreuses applications (Chavannes 1930 dans Brunck *et al.* 1990). L'Okoumé représente à lui seul les trois quarts du volume total récolté chaque année et près de 80% des quantités de bois exportées par le Gabon (Buttoud 1991). A ce jour, la tendance demeure toujours la même. Les caractéristiques de cette essence (rectitude, dimensions des grumes et faible densité) en font un bois très apprécié tant au déroulage que pour d'autres utilisations : menuiserie intérieure, ameublement, moulure, emballage, caisserie pour le bois de second choix, lamellé collé (Brunck *et al.* 1990). La qualité de son bois et son extraordinaire faculté de reconstituer spontanément un peuplement ont incité les forestiers à introduire cet arbre comme une essence de reboisement. Les mises en culture de l'Okoumé hors de son milieu naturel n'ont pas donné de résultats satisfaisants. On a souvent évoqué des difficultés liées au climat. En effet, l'Okoumé supporte mal le déficit hydrique et les températures élevées de la longue saison sèche du climat tropical (Brunck *et al.* 1990 ; Maley 1990).

En plus des propriétés technologiques qu'offre l'Okoumé, il reste de par son origine biologique un matériau potentiellement dégradable par des organismes lignivores (champignons et insectes). Des essais de résistance aux champignons et termites ont été réalisés pour des utilisations sous climat tempéré (CIRAD 2003). Ces tests n'ont concerné que le bois issu des forêts naturelles, particulièrement celui des zones bordant les cours d'eau. Les arbres plantés sont ou arrivent à diamètre minimum d'exploitabilité d'Okoumé en vigueur au Gabon (70 cm à 1,30m de hauteur). Il paraît dès lors judicieux de connaître la valeur

intrinsèque des bois d'Okoumé issus de cet écosystème artificiel et de le situer comparativement aux arbres provenant de la forêt naturelle.

Intérêts et objectifs de l'étude

L'Okoumé est une essence qui reconstitue spontanément des peuplements forestiers dans les zones défrichées puis abandonnées et les trouées. Cette essence joue un rôle particulier, tant sur le plan culturel que sur le plan économique ; nul doute que cette ressource renouvelable restera liée pour une large part à la véritable richesse du Gabon. Ce pays connaît actuellement les méfaits dus aux fluctuations des coûts du baril de pétrole. L'économie du Gabon est basée essentiellement sur les revenus du pétrole et l'horizon pétrolier ne se présente guère rassurant ; de plus cette ressource n'est pas renouvelable et les réserves restent non fiables. Depuis la décennie 90, ce pays cherche à relancer sa politique économique en minimisant les retombées du pétrole. De ce fait, il se tourne à nouveau vers son capital forestier qui était le socle de son économie. Par la position occupée par l'Okoumé dans l'exploitation forestière et l'exportation des produits qui en sont issus (Brunck *et al.* 1990, Buttoud 1991), il s'avère important de gérer rationnellement la forêt et les produits qui en découlent, depuis l'aménagement des massifs forestiers jusqu'à la mise en œuvre des récoltes. Ceci est d'autant plus important que le pays s'est engagé à dynamiser l'industrialisation de la filière bois et la préservation de l'environnement, avec 10% du territoire mis en réserve naturelle.

Le Gabon a réalisé des reboisements dont plus de 85% en Okoumé. Cette activité a démarré en 1935. A ce jour, les propriétés technologiques de l'Okoumé reboisé ne sont pas connues. Leur connaissance faciliterait une maîtrise du potentiel ligneux en fonction des habitats et permettrait une meilleure orientation des usages et des potentiels utilisateurs. Un intérêt particulier est porté sur les produits des plantations dans l'optique de soulager la forêt naturelle des nombreuses sollicitations dont elle est sujette. Buttoud (1991) attire également l'attention sur l'insuffisance du potentiel ligneux de la forêt naturelle pour entretenir une industrie pérenne de la filière bois.

Par conséquent, une démarche dite « *Démarche Okoumé* » a été entamée. Dans cette étude, elle est orientée sur l'évaluation de certains paramètres partant de l'écorce jusqu'à la moelle, en tenant compte de la spécificité écologique et de l'âge cambial. Ces paramètres sont :

- ❖ La durabilité naturelle du bois d'Okoumé vis-à-vis des champignons lignivores ; en zone tempérée *Gloeophyllum trabeum* (pourriture brune) et *Coriolus versicolor* (pourriture blanche), et en zone tropicale *Antrodia sp.* (pourriture brune) et *Pycnoporus sanguineus* (pourriture blanche). Il a été démontré que la durabilité naturelle d'un bois est à mettre en relation avec l'anatomie, la densité et plus particulièrement la composition chimique de ce dernier (Wise 1944, Hillis 1962, Rowell 1984). Ladite étude s'intéresse non seulement à la durabilité mais aussi à l'anatomie et aux composés chimiques.
- ❖ Sur le plan anatomique, il s'agira essentiellement de faire une description du plan ligneux et voir l'aspect structural en mettant en évidence les vaisseaux, les fibres, les rayons ligneux. Cette description sera mise à profit pour apprécier les relations avec les propriétés physiques et mécaniques (densité, retrait et module d'élasticité longitudinal) des différents types de bois.
- ❖ L'étude de la dendrochronologie de l'Okoumé à l'aide des paramètres environnementaux (pluviométrie et température), de la description anatomique et de la biologie de cette essence va amener une nouvelle définition simplifiée de la limite du cerne d'Okoumé, à une détermination des différents types de bois dans ce cerne et sur le rythme de croissance en diamètre.
- ❖ Sur le plan chimique, une identification des composés de faible poids moléculaire sera effectuée, les constituants pariétaux seront également dosés. Les composés isolés de l'oléorésine seront confrontés à des souches fongiques dans le cadre de l'amélioration de la durabilité du bois d'Okoumé.

La mise en relation de ces paramètres avec l'âge cambial conduira d'une part à déduire une limite entre le bois juvénile et le bois adulte de l'Okoumé, d'autre part à comparer le bois des plantations à celui de la forêt naturelle. La distinction de cette limite permettra un meilleur emploi du bois. Ladite étude peut apporter un éclairage sur la vaste entreprise de l'industrialisation de la filière bois au Gabon. Ce travail peut servir de guide :

- ✓ à la valorisation des bois d'éclaircie et de petit diamètre chus lors des exploitations forestières ;
- ✓ en amont de la filière bois sur les itinéraires sylvicoles, compte tenu des données en anatomie, dendrochronologie, propriétés physico-mécaniques, durabilité naturelle et constituants chimiques ;

- ✓ à la gestion rationnelle du capital forestier de façon à optimiser le rendement et à préserver l'environnement ;
- ✓ En aval de la filière, le classement des produits entraînera une meilleure valorisation de nos bois et une traçabilité du produit.

La présente étude se répartit en quatre chapitres :

1. **chapitre 1** fait un bref état de lieu de la situation de l'Okoumé partant de son aire d'origine au Gabon et un bref rappel bibliographique.
2. **chapitre 2** présente le matériel végétal, l'appareillage et les techniques qui ont été mis à profit dans ce travail.
3. **chapitre 3** révèle les résultats relatifs aux méthodologies appliquées au chapitre précédent.
4. **chapitre 4** synthétise les résultats en présentant de façon sommaire les causes susceptibles de conduire à leur acquisition. Il est également fait état des relations transverses possibles entre les propriétés évaluées.

Une conclusion met fin au présent travail en laissant une lucarne ouverte sur les perspectives.

CHAPITRE I
CONTEXTE ET REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

Avant de faire état de nos résultats et discussions, qu'il nous soit permis de vous parler brièvement dans ce chapitre de l'Okoumé dans son milieu, particulièrement au Gabon et de le situer dans un contexte général en fonction des propriétés qui seront développées par la suite.

I-1 L'Okoumé au Gabon

I-11 Climat du Gabon

Le Gabon appartient au domaine de l'Alizé dévié sud atlantique, dans lequel on trouve également le Sud Cameroun, le Nord Angola et une grande partie de la cuvette congolaise. Les critères de distinction des régimes climatiques du Gabon sont fonction de la distribution et du régime des précipitations (Figure 1.1). Le climat est désigné en général chaud-humide de type équatorial, avec des paramètres physiques moyens :

- des températures qui oscillent entre 22° et 32°C ;
- un taux d'humidité de 85% ;
- des précipitations qui atteignent 2000 à 3800 mm/an.

Le pays est généralement caractérisé par quatre saisons (Figure 1.1):

- deux saisons sèches : Juin à Août (grande saison sèche) et Décembre à Janvier (petite saison sèche).
- deux saisons de pluies : (Septembre à Décembre (grande saison de pluies) et Février à Mai (petite saison de pluies).

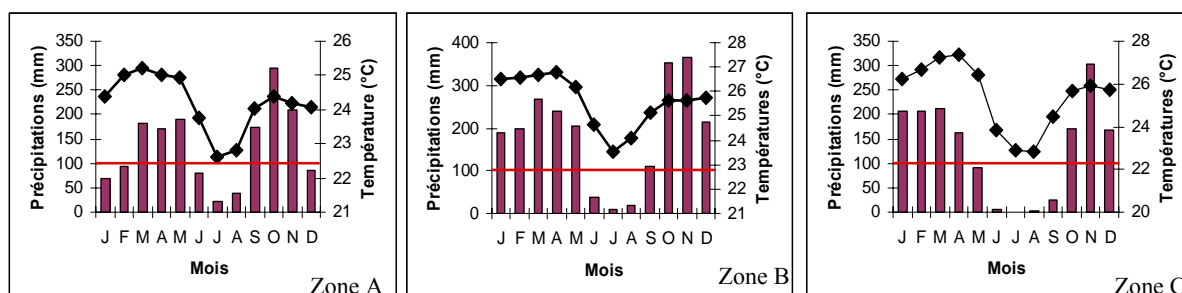


Figure 1.1 : Moyennes des précipitations et températures en fonction des trois zones écologiques du Gabon (Source de données : Direction Nationale de La Climatologie au Gabon, de Météo France et du Centre Africain de la Météorologie Appliquée au Développement, Niger). La ligne à 100 mm de précipitation marque le seuil hydrique. En dessous de cette valeur, un stress hydrique s'installe.

La figure 1.1 présente les moyennes climatiques de l'ensemble des 14 stations météorologiques du Gabon selon les différentes zones écologiques. La période de Juin à Août est très remarquable et presque identique pour toutes les zones, avec une particularité d'une saison sèche de cinq mois (Mai à Septembre) dans la zone C. C'est pendant cette période de

basses eaux que les températures sont plus douces (moins de 23°C) : « *c'est la saison d'hiver au Gabon* ». La petite saison sèche correspond en fait plus à une réorganisation du régime des pluies qu'à une réelle péjoration de la pluviométrie ; il ressort cependant une opposition entre une saison sèche très marquée (grande saison sèche) avec des précipitations inférieures à 100 mm/mois et une longue saison humide de neuf mois (Léonard et Richard 1993). Pendant la saison sèche, l'indice de Brirot ($P = 4T$ dont P =précipitations et T =température) passe sous la courbe thermique moyenne. On se trouve alors en situation de déficit hydrique potentiel (Figure 1.1). Léonard et Richard (1993) subdivisent le Gabon en trois zones climatiques ou écologiques (Figure 1.2) :

1. le climat équatorial pur dans la région Nord-Est (zone **A**), caractérisé par deux véritables saisons sèches.
2. le climat tropical de transition dans la région centrale (zone **B**), de Libreville à Mbigou, caractérisé par une saison sèche de trois mois et une saison humide de neuf mois.
3. le climat tropical (zone **C**), du Sud-Ouest du pays au sud d'une ligne Omboué-Ndendé, caractérisé par une saison sèche de cinq mois et par une saison humide de sept mois.



Figure 1.2 : Carte climatologique du Gabon (Léonard et Richard, 1993)

I-12 Description botanique de l'Okoumé

La présence de cette espèce sur la presque totalité du Gabon, son utilisation quotidienne par les populations et la pluralité ethnique de ce pays ont donné lieu à des appellations diverses de cet arbre. Pour des besoins de communication sur le plan national, cet arbre est communément appelé « Okoumé ». Cette appellation traditionnelle est originaire des groupes ethniques : Mpongwé, Galoa, Nkomi, Orungu, Ivea et Mitsogo. C'est elle qui a été transcrite comme Okoumé ; transcription qui est également retenue comme nom commercial (et pilote) par l'Association Technique Internationale des Bois Tropicaux (ATIBT) et la norme française AFNOR (Brunck *et al* 1990). Signalons également que les Anglo-Saxons dénomment cet arbre « Gaboon », certainement pour signifier la spécificité gabonaise en matière de bois.

L'Okoumé est une espèce arborée et longévive à croissance rapide. Sa durée de vie est estimée à plus au moins 150-200 ans, avec une croissance radiale moyenne d'un peu moins de 10 mm/an (Nasi 1997), un tronc pouvant atteindre 2 m de diamètre au dessus des contreforts (Leroy-Deval 1973, Brunck *et al.* 1990) et dépassant 50 m de hauteur (Brunck *et al.* 1990). Dans des peuplements dominés par l'Okoumé, il existe une forte compétition pour la lumière qui débute à l'âge de 15 ans (Brunck *et al.* 1990, Koumba-Zaou *et al.* 1998). Contrairement aux Okoumés de gros diamètre, ceux de faible diamètre (20 à 40 cm) présentent une légère flexuosité (Brunck *et al.* 1990).

L'Okoumé a été décrit en 1896 par le botaniste Pierre du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, à partir des échantillons envoyés de Libreville en 1895 par le Père Klaine. Cet arbre est d'abord dénommé *Santiriopsis klaineana*, puis *Aucoumea klaineana* actuel nom scientifique. Le genre *Aucoumea* appartient à la famille des Burséracées, qui renferme 17 genres et environ 500 espèces (Watson et Dallwitz 2000) et fait partie de l'ordre des Sapindales. Chez l'Okoumé adulte, le port présente de nombreuses branches groupées en pseudo-verticilles de deux ou plusieurs branches (Hallé et Oldman 1970). Chaque branche est orthotrope, morphologiquement identique au tronc. La tige originelle peut être dominée par une ou plusieurs branches. Des descriptions ont été faites sur l'Okoumé et sont pratiquement identiques. Nous avons établi une sorte de synthèse des différentes descriptions (tableau 1.1).

Nom scientifique	<i>Aucoumea klaineana</i> Pierre
Nom pilote ou commercial	Okoumé
Famille	Burséracées
Base	Contreforts (de 2 à 3 m de haut, le plus souvent épais) ou empâtements
Tronc	Brun rougeâtre, écailles en plaques brunes qui laissent des taches orangeâtre quand elles tombent, lenticelles (jeunes arbres à tronc lisse)
Tranche	Rouge-rose, fibreuse à légèrement granuleuse vers l'extérieur, épaisseur 5-20 mm
Exsudat	Ecorce souvent mouillée par un liquide transparent, souvent des concrétisations de résine sur le tronc (blanchâtre à l'état frais et noir à l'état vieux)
Odeur	Résineuse forte
Aubier	Blanchâtre à grisâtre
Feuille	Foliole avec de longs pétioles, longueur 15-30 cm, rachis à 3-6 paires de folioles opposées Feuillage gris-vert, léger, jeunes feuilles rougeâtre
Fruit	En forme de toupie, 5 valves, longueur 3 à 6 cm, drupe déhiscente (tombée)
Fleur	Regroupées en grappes composées très ramifiées. Espèce dioïque
Gaine (pyrène)	Ailée, brune (tombée)
Ecologie	Forêt secondaire et vieille forêt, souvent en peuplement.
Formule florale	5S + 5P + 2 x 5E + (5C)

Tableau 1.1 : Description synthétisée de l'Okoumé.

I-13 Biologie de l'Okoumé

Du point de vue écologique l'Okoumé est une espèce de lumière dont le comportement et le dynamisme sont ceux des espèces pionnières (Maley 2001). Son écologie présente cependant certaines particularités qui semblent l'empêcher de pousser ailleurs qu'en Afrique Centrale (Brunck *et al.* 1990, Maley 1990, Nasi 1997). L'Okoumé a la faculté d'améliorer la fertilité de son support grâce à l'humus issu de leur litière essentiellement composée de feuilles riches en matières organiques. Cette amélioration de son sol sur terrain pauvre favorise la réputation de plasticité édaphique de cette essence (Sarlin 1969). L'Okoumé supporte les sols acides et semble être peu exigeant vis-à-vis des réserves minérales, mais n'est pas indifférent aux déficits hydriques des saisons sèches (Brunck *et al.* 1990, Sarlin 1969). Il a été démontré par Nasi (1997), White *et al.* (2000), White (2001) que l'extension des peuplements d'Okoumé se fait par des fronts forestiers pionniers qui progressent sur les savanes.

L'Okoumé est une espèce sempervirente, dont de nouvelles feuilles apparaissent sur de jeunes rameaux vers décembre (Mariaux 1970 ; Brunck *et al.* 1990). En revanche, sa floraison s'étale de la fin de la saison sèche (août) dès le début des premières pluies (septembre) jusqu'au mois de décembre (Leroy-Deval 1976). C'est au cours de ce mois que la fructification commence

également pour s'arrêter vers mi-mars ; parallèlement se déroule la chute de graines (Mariaux 1970, Leroy-Deval 1976). Le pouvoir germinatif des graines d'Okoumé est de faible durée. On a une perte totale au bout de trois mois (Brunck *et al*, 1990).

L'Okoumé est principalement une espèce anémochore. La dispersion par le vent est facilitée par la graine ailée. Un semencier qui a un houppier assez développé (36 m de diamètre environ) peut répandre ses graines jusqu'à 200 m de son pied (Grisson, 1975). La distribution de l'Okoumé dans une moindre mesure est également zoochore. Le chevrotin aquatique (*Hyemoschus aquaticus*), grand consommateur de graines d'Okoumé, favorise également la dispersion de cette espèce au travers de ses excréments.

La croissance en hauteur de l'Okoumé présente une hiérarchisation (existence de strates) qui est l'une des principales originalités de cette espèce. L'évolution moyenne en hauteur se présente comme suit :

- ✓ jusqu'à 8 ans ; c'est la phase d'installation du peuplement. Il est de type monostrate ;
- ✓ entre 8 et 10 ans le peuplement est de type bistrates. La strate dominante représente 5 à 10% des arbres ;
- ✓ dès 10-15 ans, le peuplement est reparti en trois strates (dominante comptant 10 à 20% de tiges, codominante de 40 à 60% de tiges et dominée de 20 à 40% de tiges) ;
- ✓ vers 20 ans la strate dominante est toujours en extension au détriment des deux autres strates.
- ✓ vers 30 ans, la strate dominante atteint son état d'équilibre. L'étage codominant est en régression (Figure 1.3)

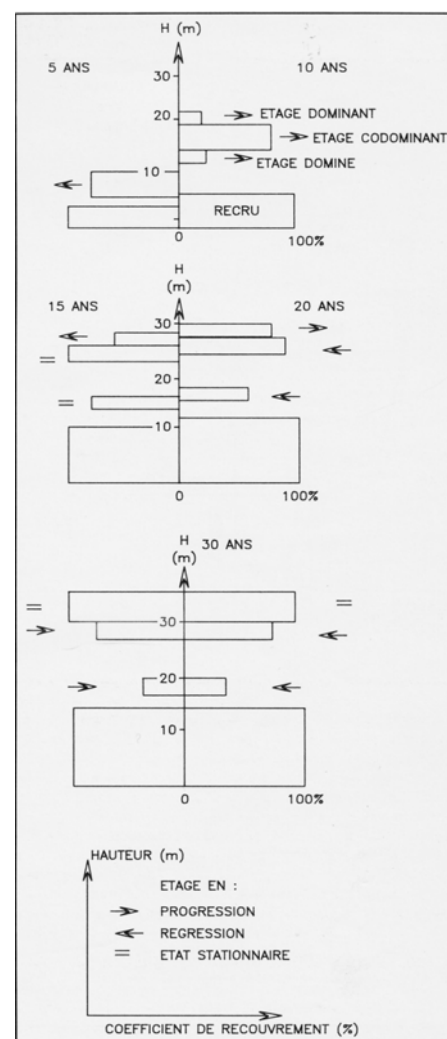


Figure 1.3 : Pyramide de végétation à différents âges de peuplement d'Okoumé non soumis à l'éclaircie (Brunck *et al*. 1990)

Cette dynamique hiérarchisée a été également décrite dans les plantations d'Okoumé à Kiendé au Cameroun (Dupuy 1984) où l'on a également une évolution en diamètre à trois vitesses (Brunck *et al.* 1990). La strate dominée est composée des arbres à croissance ralentie sous la canopée (Leroy-Deval 1973). L'Okoumé est une espèce grégaire mais également sociale par son organisation en cellule de base. L'arbre dominant est relié aux surcimés et dominés par un réseau d'anastomoses racinaires (Leroy-Deval 1974).

I-14 Aire naturelle de l'Okoumé

La limite de l'aire naturelle de l'Okoumé demeure assez ambiguë. Un regroupement de nombreux travaux réalisés par Brunck (1990), donne un tracé de cette probable limite (Figure 1.4). L'Okoumé est présent dans la majeure partie du Gabon, depuis la côte jusqu'à une ligne passant par Okondja à l'Est et entre Mitzié et Oyem au Nord du Gabon. Vers le Sud, l'Okoumé est présent au Congo dans le massif du Chaillu situé au Nord-Est du Niari, ainsi que dans une zone littorale atlantique au Nord de l'estuaire du Kouilou dans le massif de Mayombe (Groulez, 1983). Au Nord du Gabon, on le rencontre sur la presque totalité de l'ensemble de la Guinée équatoriale, sauf dans deux poches au Nord-Est et Nord-Ouest de ce pays. L'Okoumé est également rencontré en petites taches au Sud du Cameroun dans la région de Maan et Nyabessan (Letouzey, 1978). Dans son aire naturelle, l'Okoumé pousse à toutes les altitudes et est présent sur des types de sols variés : sols hydromorphes de fonds de vallées et sur tous les types de sols ferrallitiques rencontrés au Gabon.

Les limites de cette distribution ne sont toujours pas clairement élucidées. Nombre d'hypothèses sont émises quant aux facteurs limitants, ainsi :

- ✓ **le facteur limitant serait l'intensité de la petite saison sèche de décembre à février**, période de fructification de l'Okoumé. Saint Aubin (1963) émet l'hypothèse que dans le Nord et l'Est de son aire, la petite saison sèche est plus longue et plus sèche que dans les autres régions du pays. Les graines d'Okoumé disséminées à cette période tombent sur un sol sec ; leur pouvoir germinatif étant de courte durée fait qu'il est perdu avant le retour des pluies.
- ✓ **le facteur limitant serait l'intensité de la grande saison sèche de juin à septembre**. L'Okoumé serait adapté à un climat équatorial où la longue saison sèche est relativement froide, le ciel reste couvert, le niveau d'humidité de l'air est élevé.

Ainsi les hautes températures et le déficit prolongé en eau de la saison sèche des climats tropicaux, plus loin de l'équateur et la faible pluviométrie de décembre-janvier, seraient un facteur limitant pour le sud de l'aire de distribution (Brunck *et al.* 1990).

- ✓ **le facteur limitant serait la pluviométrie et l'humidité.** Dans les zones où l'on a essayé d'introduire l'Okoumé en dehors de son aire naturelle ; les meilleurs résultats ont été obtenus dans les premières années pour les régions de pluviométrie annuelle élevée, mais l'Okoumé n'a jamais été retenu comme essence de reboisement à cause des problèmes de conformation et de croissance (Brunck *et al.*, 1990).
- ✓ **le facteur limitant serait le climat passé.** Selon Muloko *et al.* (1998), l'aire de distribution de l'Okoumé aurait été réduite et probablement fractionnée en zones de refuge durant la période plus aride d'il y a 20000 à 15000 ans, et récemment, il y a 2800 à 2000 ans. Selon ce qui précède l'aire de distribution actuelle de l'Okoumé serait le résultat de l'extension de la forêt à partir des zones de refuge, spécialement les monts de Cristal et le Massif du Chaillu.
- ✓ **le facteur limitant serait l'activité de l'homme.** L'Okoumé se serait développé dans les savanes côtières et se serait répandu récemment en suivant les défrichements agricoles de l'homme. Cependant cette théorie (Aubreville 1948) est à écarter, car Reynaud-Farrera *et al.* (1996) ont démontré que l'Okoumé existait dans le Sud du Cameroun, à 170 Km de son aire de distribution actuelle, il y a 7500 et 3000 ans.

Les services forestiers gabonais des zones dites d'exclusion de l'Okoumé font état de la production de cette essence dans ces zones et une expérimentation par un particulier en cours dans les environs de Minvoul (Nord du Gabon) donne de bons résultats. La dénomination dans toutes les langues du Gabon pousse à croire que cette essence a une couverture nationale. Néanmoins, une étude sur la dynamique de cette espèce au périmètre de la limite de son aire de distribution (Figure 1.4) tracée par Capdevielle (1949), Groulez (1983), Centre Technique Forestier Tropical (1975) rapporté dans Brunck *et al.* (1990), permettrait de cerner ou de se fixer au mieux sur l'extension de cette espèce. Le tracé de la limite d'extension de l'Okoumé par Maley (1990), en englobant toute la circonscription d'Oyem en allant vers Bitam, jette de plus belle le flou sur l'aire naturelle de l'Okoumé au Gabon.

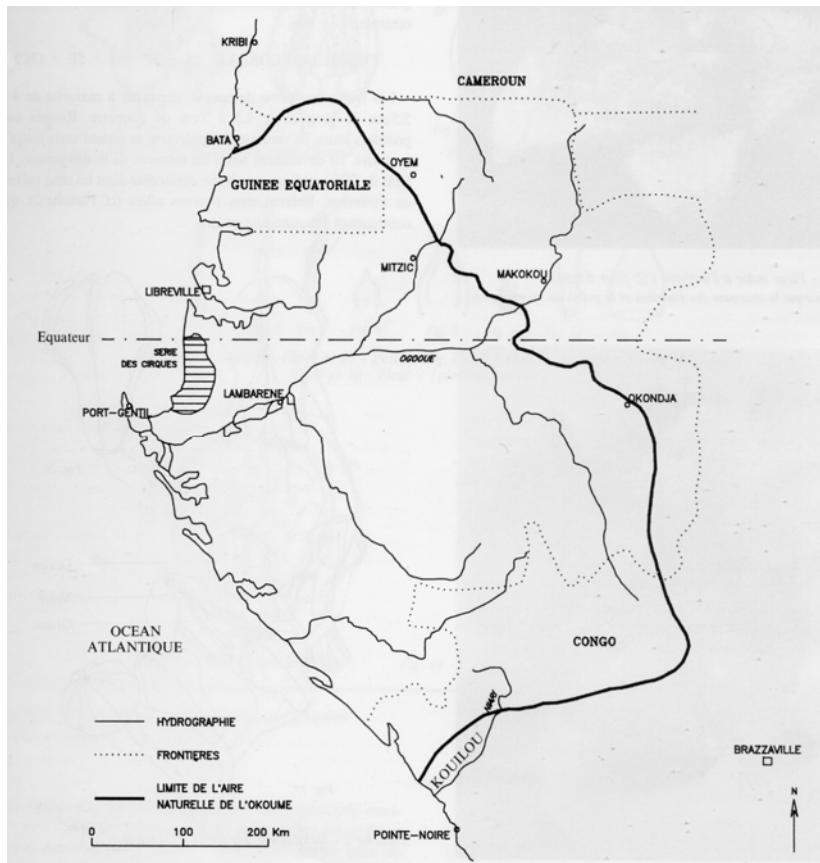


Figure 1.4 : Aire naturelle de l'Okoumé tracée par CTFT (1975), Groulez (1983) et Capdevielle (1949) dans Brunck *et al* (1990)

I-15 Sylviculture de l'Okoumé

Le recours à la sylviculture avait pour vocation première la production de bois de déroulage : c'est la notion de qualité qui s'est imposée au reboisement. On pratique pour cet arbre, deux types de sylviculture :

- Sylviculture naturelle : Des expérimentations ont été entreprises pour améliorer des peuplements naturels. L'Okoumé se constitue par endroit en des formations presque pures grâce à une régénération naturelle abondante. On a alors cherché à les éduquer mais cette démarche a été abandonnée pour mauvais résultats.
- sylviculture artificielle : L'échec enregistré sur le premier type de sylviculture cité a conduit à concentrer tous les efforts sur ce deuxième type. L'étendue et le potentiel productif des peuplements naturels ont été jugés insuffisants pour assurer le remplacement progressif du volume d'Okoumé prélevé par l'exploitation forestière (Brunck *et al.* 1990 ; Ministère des eaux et forêt 1986). Dans ce contexte, le reboisement reste le seul recours.

La sylviculture de l'Okoumé est assez complexe. C'est une essence de lumière. Paradoxalement, à partir de 12 à 18 mois, cette essence a besoin d'être engainée par un recrû qui puisse être maintenu au niveau du bas de la cime afin d'éviter l'exposition du tronc à l'ensoleillement et ce jusqu'à l'âge de 5 à 8 ans. D'où l'appellation ou qualification de sylviculture dite de « recrû » par les chercheurs du Centre Technique Forestier Tropical (CTFT) cité par (Brunck *et al*, 1990). La domestication de l'Okoumé a conduit à la mise en place de différentes techniques sylvicoles dont la méthode des layons, la méthode en bande, la méthode classique, la méthode des andains et la méthode à blanc (Leroy-Deval 1976). Le même auteur reconnaît que ce n'est que dans la décennie 70 qu'on a commencé à maîtriser la sylviculture de l'Okoumé. Ceci a permis à Maître *et al* (1982) de mettre au point une courbe de croissance de l'Okoumé en plantation.

I-16 Situation des plantations

La forêt gabonaise est depuis la fin du 19^{ème} siècle soumise à une intense activité forestière basée essentiellement sur l'exploitation de l'Okoumé. L'intensité de l'exploitation de cette essence a conduit le Gabon à mettre en place dès 1930 une politique de reboisement afin de compenser les prélèvements en forêt naturelle. Ainsi environ 30000 hectares de plantations ont été réalisés (Tableau 1.2) dont les trois quarts en Okoumé. Le tableau 1.2 illustre la répartition des stations par superficie reboisée et zone géographique. Les travaux de reboisement ont effectivement commencé en 1935, dans la forêt classée de la Mondah mais en 2000 le reboisement est définitivement arrêté.

A ce jour, les plantations n'ont jamais été éclaircies. Elles demeurent dans un état serré qui ne favorise pas un développement harmonieux des individus. Cependant, dans les peuplements dits « équiennes » d'Okoumé, la problématique d'éclaircie doit être abordé suivant les objectifs visés et avec beaucoup de réserves.

La biologie de cette essence n'est pas parfaitement maîtrisée, encore moins les qualités technologiques qui en résultent. Il ressort de la littérature que ce traitement n'est pas nécessaire et encore moins indispensable. Quelle que soit la densité initiale de la plantation, les arbres de la strate dominante croissent de façon uniforme (Leroy-Deval, 1974). Il reste donc l'option d'éliminer dans la strate dominante, des arbres mal conformés. On veillera à ne pas toucher les arbres accompagnateurs (arbres qui entourent le dominant) pour ne pas

fragiliser l'équilibre biologique mis en place (l'Okoumé dominant est relié aux dominés par les anastomoses racinaires).

Brigade de reboisement.	Superficie plantée à l'origine (hectares)	Début et fin des travaux	Zones géographiques
Mondah	1120	1935-	Estuaire
Nkoulounga	4176	1953 à 1961	Estuaire
Bokoué	12126	1960 à 1989	Estuaire
Mvoum	8596	1962 à 1985	Estuaire
Haut-Como	2887	1966 à 1978	Estuaire
Mbiné	1112	1970 à 1993	Moyen ogooué
Bakoumba	73	-	Haut ogooué
Total	30090		

Tableau 1.2: Superficies des plantations et zones géographiques.

Les superficies mentionnées au tableau 1.2 doivent être qualifiées << **d'origine**>>. Les plantations ont été soumises au cours du temps à des pressions considérables (extraction illégale de bois, cultures vivrières, appropriation des terrains, construction d'habitations...). Il ressort également du tableau 1.2 que 5 des 7 sites de reboisement sont localisés dans la province de l'Estuaire et que tous les 7 sont dans la même zone écologique dite **B** avec un climat tropical de transition. Les parcelles ont été réalisées avec des semis en provenance de tout le Gabon. Cependant, il a été démontré que ces déplacements du matériel génétique ne sont pas favorables pour l'Okoumé (Koumba Zaou *et al.* 1998).

I-17 Production et exportation du bois de 1980 à 2004

Les produits ligneux issus de la forêt gabonaise sont généralement présentés en deux groupes : le premier constitué de l'Okoumé et de l'Ozigo (*Dacryodes buttneri*) alors que le second regroupe le reste sous la dénomination « bois divers ».

I-17.1 Production de bois

L'extraction de bois au Gabon à but commercial et industriel a commencé avant 1900. Elle était concentrée dans la zone côtière qui constitue aujourd'hui la première zone forestière du Gabon. Les exploitants recherchaient en particulier certaines essences telles que : Padouk (*Pterocarpus soyauxii*) utilisé principalement pour la teinture, Ebène (*Diospyros crassiflora*) utilisé pour la sculpture, Azobé (*Lophira alata*) encore appelé bois de fer utilisé pour les rails de chemin de fer et certaines essences comme Acajou (*Khaya ivorensis*), Bilinga (*Nauclea diderrichii*), Dibetou (*Lovoa trichilioïdes*), Iroko (*Milicia excelsa* Berg), Kevazingo (*Guibourtia tessmannii*), Tali (*Erythrophleum ivorense*), utilisées en ameublement et menuiserie intérieure.

L'introduction de l'Okoumé comme essence (au sens forestier¹) est à l'origine de l'évolution rapide de l'exploitation forestière au Gabon. L'extraction de cette essence commence en 1889, à la suite des conclusions de l'expertise faite sur la bille d'Okoumé envoyée à Hambourg, par le gérant de la maison de commerce Woerman, Emile Schultz, consul d'Allemagne à Libreville. Il est dit de cet arbre « bois d'excellente qualité.... pouvant se prêter aux plus nombreuses applications... ». Depuis cette date l'Okoumé n'a cessé de dominer les exportations de bois.

Dans cette étude, la tranche de 1980 à 2004 a été choisie afin de présenter une étape de l'activité d'exploitation forestière. La limitation de la borne supérieure est essentiellement due à la disponibilité des données statistiques et marque la mise en place au Gabon de nouvelles dispositions en matière forestière en vue d'une exploitation à faible impact écologique et du développement de la filière bois. Quant à la borne inférieure, les deux décennies qui précèdent 1980 ont été des périodes assez fortes pour le secteur forestier. En 1960, le Gabon accède à la souveraineté internationale. La forêt est la principale richesse du pays ; le bois représente 75% des exportations. L'Okoumé est la principale essence exploitée et exportée (plus de 90%). Cette période est dite « cycle Okoumé » avec des quantités de bois extraites en progression chaque année. Toutes les productions sont exportées (soit 13 millions m³) durant la décennie 60 alors que commence l'exploitation pétrolière et minière. La production forestière atteint un pic en 1972 (près de 2500000 m³). Au cours de cette année, le Gabon connaît également le « boom pétrolier ». C'est le cycle pétrolier-minier. A partir de 1973, commence la chute des volumes de production de bois jusqu'en 1982 (1612500m³). L'année suivante (Figure 1.4), on a une reprise de production, qui prend de l'ampleur d'année en année malgré la baisse de 1998 (conséquence des effets pervers de la crise asiatique) pour atteindre en 2000 un pic avec plus de 4000000 m³.

La figure 1.5 montre la fin des méfaits des décennies précédant les années 80 sur l'activité forestière et surtout l'empreinte de la production des bois divers qui s'accroît à partir de 1995. Les chutes remarquables de production à partir du pic de l'an 2000 tiennent principalement au recadrage des orientations forestières dont l'aménagement avec une vision multi fonctions de la forêt et davantage de considération de l'environnement. Le recadrage des orientations forestières et les tendances environnementales en sont les principales causes.

¹ Essence (terme forestier) : espèce ou groupe d'espèces qui correspond à un bois d'intérêt commercial.

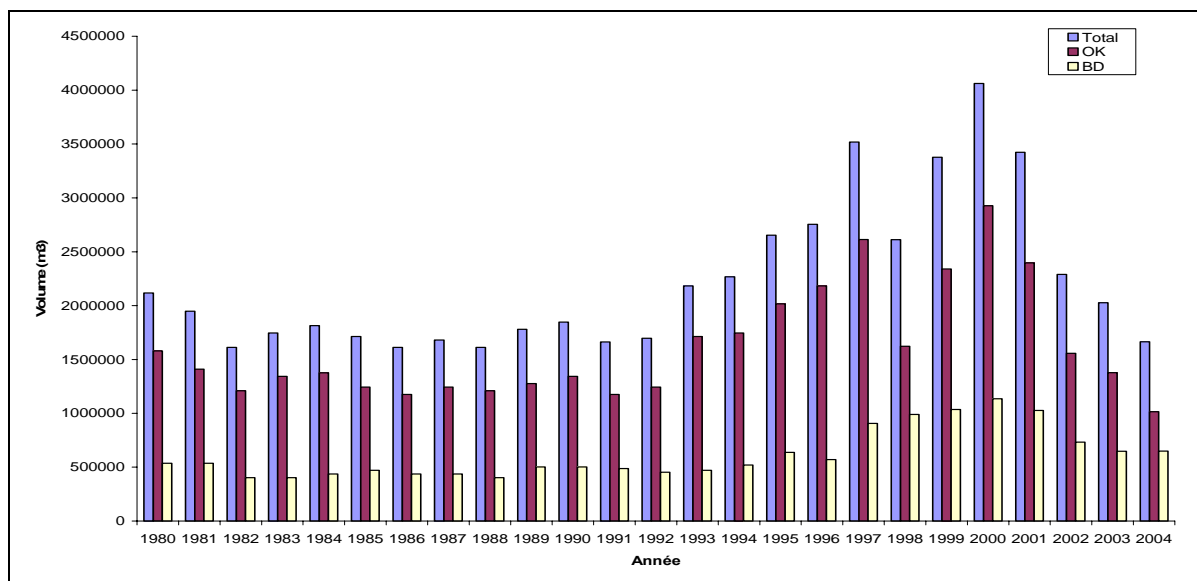


Figure 1.5 : Etat de production de bois toutes essences confondues. Total= production Okoumé et bois divers, OK= Okoumé, BD= Bois Divers. (Direction Générale des Eaux et Forêts)

I-17.2 Commerce du bois

Les exportations de bois connaissent pratiquement les mêmes fluctuations que la production. Cependant force est de constater la tendance à la hausse de la vente des bois divers (figure 1.6). Cette figure montre une tendance générale à la baisse assez remarquable des exportations à partir de l'année 2001. Celle-ci marque l'amorce de l'objectif 2025 (Ministère des Eaux et Forêts 1998) en vue de transformer localement plus de 75% de la production forestière. En 2004 le taux de transformation (18%) a plus que doublé par rapport à 1996 (7,5%) sur l'ensemble de la production (Ministère des Eaux et Forêts 2005). Les volumes d'exportation d'Okoumé sont en chute principalement à cause de la redynamisation des industries de déroulage et de tranchage.

Jusqu'en 1994 l'Europe était la principale destination des bois en provenance du Gabon. La France représentait plus de la moitié de ce commerce, soit un peu plus de 60% ; mais à partir de 1995 le continent asiatique prenait la tête des exportations de bois du Gabon. Cette année, l'Asie consommait plus de 47% (première) des grumes de bois et a atteint en 2003 plus de 63% (dont un peu plus de 50% exportés vers la Chine).

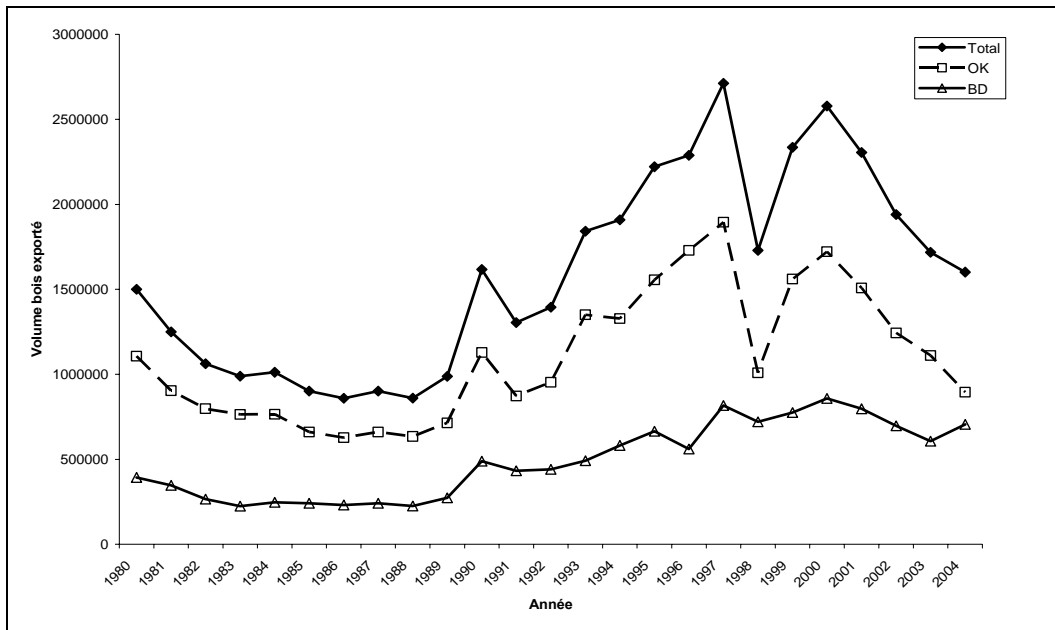


Figure 1.6 : Exportation des grumes de 1980 à 2004 (sources : direction générale des eaux et forêts, société d’exploitation des ports à bois du Gabon, société nationale des bois du Gabon et direction générale des statistiques et enquêtes économiques)

La figure 1.7 présente la tendance actuelle des destinations des bois du Gabon. La différence notée entre 2003 et les données relatives à l’Asie est l’une des conséquences des nouvelles orientations évoquées plus haut. Les principaux pays d’exportation du Gabon au cours de ces deux années sont : pour l’Asie, la Chine (79,3%), pour l’Europe, la France (55,6%) et pour l’Afrique, le Maroc (90%)

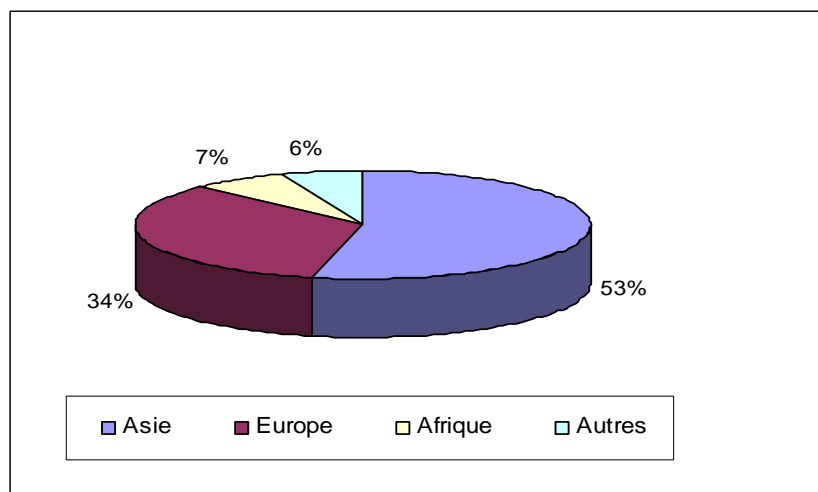


Figure 1.7 : Proportion des grands ensembles de destination des bois en provenance du Gabon

I-2 Le matériau bois

I-21 Structure du bois

Produit par l'arbre, le bois est un matériau naturel différemment défini selon l'utilisateur et l'intérêt porté :

- Pour le biologiste, le bois est le xylème secondaire qui assure la conduction de la sève brute chez les plantes ligneuses Gymnospermes (conifères) et Angiospermes Dicotylédones. Chez les plantes pérennes (arbres, arbustes et buissons), le xylème secondaire ou bois se développe chaque année et forme un tissu résistant qui assure à la fois la conduction de la sève et la résistance mécanique de la plante.
- L'anatomiste le distingue en bois homoxylé (caractéristique des Gymnospermes) et bois hétéroxylé (caractéristique des Angiospermes Dicotylédones). Le bois des Gymnospermes est dit homoxylé parce qu'il ne contient que des trachéides qui assurent à la fois le soutien mécanique et la conduction de la sève. Alors que le bois des Angiospermes dit hétéroxylé, contient plusieurs éléments verticaux. Les fibres (et/ou fibres-tachéides, trachéides) pour le soutien et, les vaisseaux et le parenchyme qui assurent la conduction.
- Pour les spécialistes du "matériau bois", les bois se distinguent selon leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques mais aussi par bon nombre de propriétés particulières (durabilité naturelle, veinage, couleur, etc.) qui amènent le spécialiste à choisir les bois en fonction de leur utilisation.

Le bois est un ensemble de tissus d'origine secondaire à parois lignifiées, résultant du fonctionnement, vers l'intérieur, de l'assise génératrice cambiale libéro-ligneuse (Guinier ; botaniste du début du 20^e siècle dans Dirol *et al.* 2001, Keller 1994). Les couches successives de tissus qui se forment sous le cambium constituent l'aubier qui correspond au bois physiologiquement actif (Figure 1.8). Ces tissus cessent peu à peu d'alimenter l'arbre après quelques années. Ils se bouchent et s'imprègnent de différentes substances : tanins, résines. Cette transformation progressive en bois parfait, ou duramen, est appelée duraminisation. L'assise est sensible aux manifestations environnementales : température, pluviométrie, lumière, topographie, réserve en eau, sylviculture, pollution, etc.

Le bois est un matériau qui présente des caractéristiques assez singulières. Il est à la fois hétérogène, en raison d'une part des cellules qui le composent qui sont de nature et de formes différentes et d'autre part de ses propriétés physiques, mécaniques et chimiques qui varient horizontalement et verticalement pour une essence donnée voire pour un arbre. Il est hygroscopique, susceptible de perdre ou de prendre de l'humidité en fonction de l'ambiance du milieu.

I-22 Macro structure

I-22.1 De l'arbre au bois

Les arbres vivent dans des écosystèmes susceptibles d'influencer directement ou indirectement leur croissance et par conséquent la production du bois. La forme de l'Okoumé est déterminée principalement par les conditions du milieu qui agissent non seulement sur la croissance mais également sur la forme des arbres et la qualité du bois produit, en procurant aux Okoumés un habile dosage d'éclaircissement, d'ombrage, de soleil et d'humidité (Brunck *et al.* 1990). Quel que soit le groupe (angiospermes ou gymnospermes) l'arbre peut être divisé en trois grandes parties : racines, tronc et houppier. La coupe transversale de l'arbre (Figure 1.8) présente de l'extérieur vers l'intérieur : l'écorce, le bois et la moelle (ou cœur de l'arbre).

- ❖ L'écorce est constituée d'une partie externe inerte ou suber qui sert de barrière de protection, et d'une écorce interne collée à la première citée. C'est le liber ou l'écorce vivante responsable de la conduction de la sève élaborée ou sève libérienne des feuilles aux autres organes.
- ❖ Le bois est constitué généralement de l'aubier et du duramen (Figure 1.8). L'aubier est la partie fonctionnelle du bois : il renferme les cellules vivantes et les matières de réserve (amidon). Au fil des années, il se transforme en bois parfait, en passant par une zone de transition que l'on peut distinguer selon les essences, car elle est variable au cours d'un cycle de duraminisation (Bergström 2000). Le bois parfait peut avoir une teinte distincte de l'aubier (on parle de duramen généralement de couleur foncée) par exemple chez l'Okoumé et le Chêne (*Quercus sp.*). Parfois, le bois parfait ne se duraminise pas et il ressemble à un prolongement de l'aubier par exemple chez le Doussié (*Azelia africana*) et le Sapin (*Abies sp.*) (Dirol *et al.* 2001). Le processus de duraminisation n'est pas parfaitement connu ; cependant, la formation du duramen serait le résultat de bouleversements biochimique et physiologique au niveau des cellules du parenchyme (Datta *et al.* 1987, Magel *et al.* 1994). Quand les parties du bois se distinguent, leur proportion varie horizontalement et verticalement.

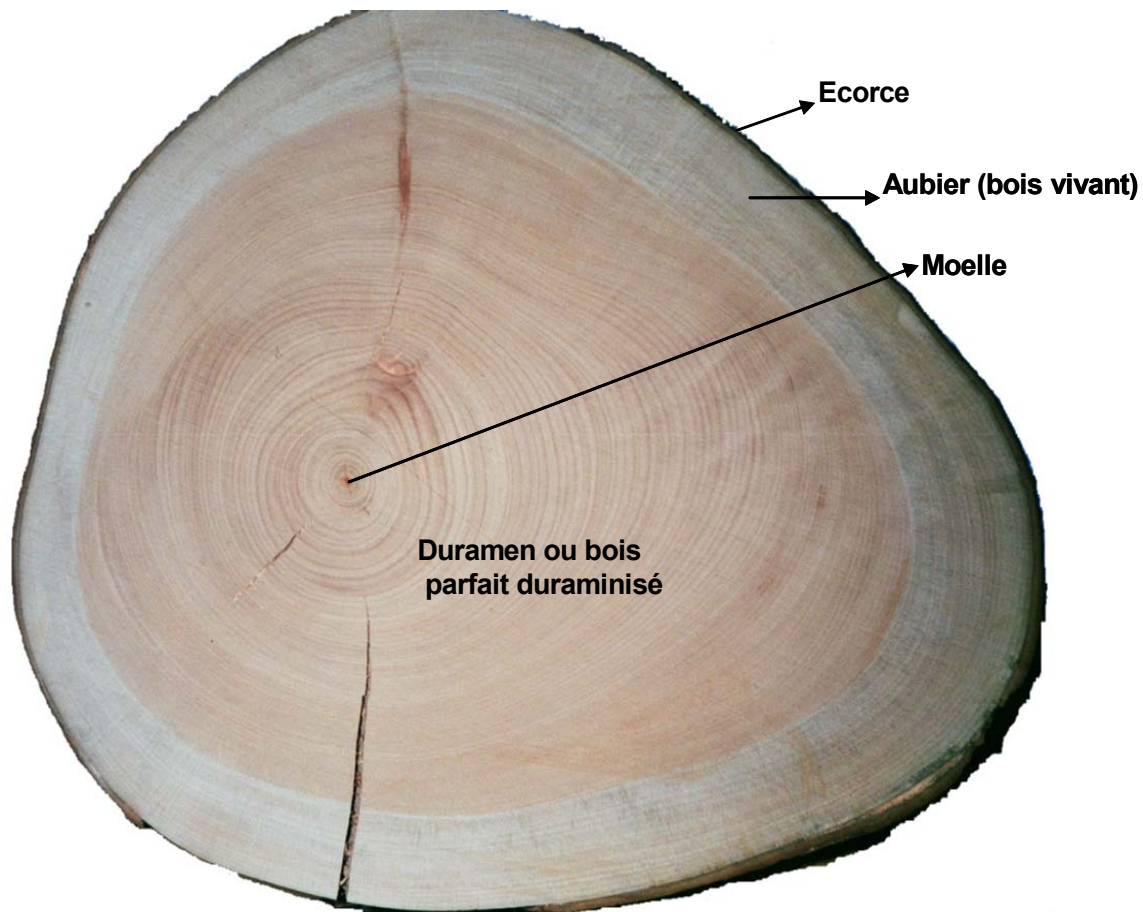


Figure 1.8: Section transversale de l'Okoumé

I-22.2 L'accroissement annuel

Chaque année, le cambium forme une nouvelle couche de bois dont on peut ou non distinguer la limite à l'œil nu ou au microscope. Son fonctionnement saisonnier est bien connu pour les espèces des zones et climats tempérés. Au printemps, l'arbre fabrique le bois initial ou bois de printemps, avec des lumens grands et des parois cellulaires de faible épaisseur contrairement à l'aspect de la saison suivante. En été et en hiver, l'arbre fabrique le bois final ou bois d'été. Ce dernier est moins dense avec des pores de faible diamètre (radial). L'ensemble de ces deux types de bois mis en place au cours de l'année calendaire, forme le cerne annuel (accroissement annuel).

Cependant, à cause de la luxuriance de la forêt tropicale et de l'absence de saison bien différenciées comme sous les climats tempérés, on a longtemps admis qu'aucun cerne annuel ne pouvait être décelé dans le bois des essences tropicales. En 1927, Coster démontre le contraire, sur l'Acajou de Cuba (*Swietenia mahogoni*), le Lilas de Perse (*Melia azedarch*) et le Teck (*Tectona grandis*). Dans les années 50, Catinot et Mariaux font remarquer que les

stries concentriques visibles en bout des billes d'Okoumé pouvaient traduire un certain rythme de formation de ce bois. Pour vérifier leur hypothèse, ils mirent au point une expérimentation originale basée sur la destruction localisée du cambium, la méthode de travail est décrite par Mariaux (1970) et reprise par Détéienne *et al* (1998).

L'assertion sur la visibilité des cernes et le climat est à la fois vraie et fausse (Détéienne *et al*, 1998). Ainsi, le bois des espèces de Chêne poussant au Canada ou en Mongolie présente des cernes bien visibles à l'oeil nu, alors que celui des espèces du Guatemala ou du Vietnam ne montre les limites de ses cernes annuels que sous une loupe. Par contre, s'il est souvent possible de compter à l'oeil nu les cernes annuels du Doussié ou de l'Iroko, il faut utiliser une loupe pour détecter avec certitude ceux du Bouleau (*Betula* spp) ou du Sorbier (*Sorbus* spp) poussant en Finlande. L'Acajou d'Afrique, genre *Khaya*, ne présente pas de cernes visibles alors que l'Acajou d'Amérique, genre *Swietenia*, de la même famille, montre des cernes annuels bien nets alors qu'il pousse dans des forêts semblables et aux mêmes latitudes. En définitive, la présence et/ou la visibilité des cernes annuels dans le bois semblent dépendre plus du genre botanique que du climat sous lequel a poussé l'arbre (Détéienne *et al*. 1998). Ceci montre la complexité ou l'immense variabilité du bois.

Chez l'Okoumé, Mariaux (1970) met en évidence l'existence de cernes qui traduisent le rythme de formation de cette espèce. Les cernes d'accroissement chez l'Okoumé sont très généralement bisannuels, mais un rythme annuel est distinct sur le bois (Brunck *et al*. 1990). En 1970, Mariaux suggère deux types de lecture de cernes possibles de l'Okoumé (Figure 1.9) : le cerne normal avec une alternance continue de 4 bandes et d'autres types de cernes. Cette dernière catégorie est caractérisée par l'absence ou le dédoublement ou la fusion de certaines couches. L'alternance de quatre bandes correspondrait, pour un cerne normal, aux quatre saisons climatiques observées au Gabon.

- Une large bande claire, correspondant à la grande saison de pluies,
- Une large bande sombre, correspondant à la grande saison sèche,
- Une fine bande claire, correspondant à la petite saison de pluies,
- Une fine bande sombre correspondant à la petite saison sèche.

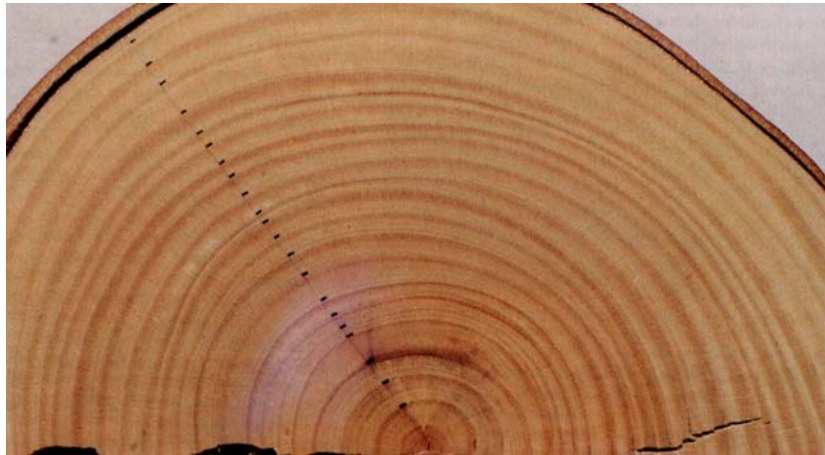


Figure 1.9 : Coupe transversale d'un Okoumé, sur lequel on peut dénombrer les accroissements annuels (Brunck *et al.* 1990)

Pour les arbres à croissance lente ou très lente, le repérage des cernes annuels n'est pas évident : la deuxième bande de bois clair est souvent absente et les deux bandes sombres se trouvent alors fusionnées (Mariaux 1970, Détiéne et Mariaux 1978, Détiéne *et al.* 1998). D'où la proposition de Détiéne *et al.* (1998) de limiter le cerne d'Okoumé à la moitié du nombre de bandes sombres, soit au nombre de bandes du même type par la teinte comme par la largeur. Cette proposition restée à ce jour sans suite est à mettre en exergue. Par une exploration anatomique de chaque type de bande, il serait possible de proposer une lecture unique du cerne de l'Okoumé quel que soit l'arbre.

II-23 Micro structure du bois

I-23.1 Le plan ligneux

L'examen microscopique du plan ligneux d'un bois donne une bien meilleure connaissance de sa structure et de la fonction remplie par chaque élément constitutif dans l'arbre. Le plan ligneux est formé de trois (3) coupes faites dans trois (3) plans perpendiculaires : coupe transversale perpendiculaire à l'axe de la tige, coupe radiale dans un plan passant par la moelle, coupe tangentielle dans un plan excentré et parallèle à l'axe de la tige. Les trois directions axiale, radiale et tangentielle constituent les directions d'anisotropie du bois pour un grand nombre de ses propriétés physiques, mécaniques et technologiques. L'étude de ce plan conduit à la description du bois et permet d'apprécier les relations entre l'anatomie et les caractéristiques de ce matériau. Pour une espèce donnée, il est constant, présente des analogies pour des espèces voisines et a des caractères généraux pour une famille ou un groupe. Les tissus du bois dans l'arbre remplissent plusieurs fonctions : conduction ascendante de la sève brute du poil absorbant à la feuille, soutien, résistance mécanique, stockage, restitution, élaboration et transformation chimique de substances.

Le tissu est élaboré par le cambium, situé entre le liber et le bois. L'assise cambiale se divise indéfiniment pour former les cellules de la zone cambiale (cellules mères) (Keller 1994). Ces dernières se divisent en un certain nombre de fois pour donner des cellules filles qui se différencient et se spécialisent en divers types de cellules du liber et du xylème. L'assise génératrice est constituée de deux types de cellules initiales :

- les initiales fusiformes qui donnent naissance aux cellules allongées. Chez les résineux, on a les trachéides longitudinales, les cellules sécrétrices longitudinales et les canaux sécréteurs longitudinaux. Quant aux feuillus, on y trouve les vaisseaux, les fibres libriformes, les fibres trachéides, le parenchyme longitudinal, les trachéides vasculaires, les trachéides vascicentriques et les canaux sécréteurs. Les trois derniers éléments sont présents chez quelques espèces. Les canaux sécréteurs n'existent pas chez l'Okoumé (Brunck *et al* 1990, Richter et Dallwitz 2000, Minkué 2000)
- les initiales isodiamétriques dont sont issus les éléments transversaux perpendiculaires aux dérivés des initiales fusiformes. On rencontre chez les résineux les rayons ligneux qui sont constants pour toutes les espèces quant aux trachéides transversales et aux canaux sécréteurs, on trouve seulement chez certaines espèces. En revanche chez les feuillus, on a les rayons ligneux qui sont des éléments constants, contrairement aux canaux sécréteurs qui n'existent pas chez toutes les espèces.

La vision microscopique permet de connaître la distribution des cellules dans le plan ligneux. Ainsi, on peut savoir chez les feuillus si un bois est à zone initiale poreuse ou à zone semi-poreuse ou à pores diffus ; c'est le cas de l'Okoumé (Mariaux 1970, Richter et Dallwitz 2000). La disposition des cellules adjacentes peut être définie ou qualifiée à l'exemple du parenchyme qui peut être paratrachéal ou apotrachéal. Il est paratrachéal chez l'Okoumé (Mariaux 1970, Minkué 2000, Richter et Dallwitz 2000). La cellule du bois après sa différenciation est multicouche et présente de l'extérieur vers l'intérieur :

- Une couche intercellulaire qui sépare une cellule de sa voisine,
- Une paroi primaire qui tapisse la couche intercellulaire. L'ensemble constitué par la première couche citée et les parois primaires des cellules adjacentes est appelé « lamelle moyenne ou mitoyenne »,

Une paroi secondaire qui se dépose sur la paroi primaire. Cette dernière paroi se subdivise en trois couches (S1, S2 et S3). Cependant, dans les fibres de bois de tension, on a une modification de la paroi cellulaire par le développement d'une couche gélatineuse (couche G). Trois scénarios sont possibles : S1+S2+S3+G ou S1+S2+G ou S1+G.

Les cellules communiquent de proche en proche par les ponctuations. Dans un vaisseau les éléments se communiquent par les perforations. Chez l'Okoumé, elles sont totales, mais ces éléments de vaisseaux sont souvent bouchés par les thylles (Bruncks *et al* 1990, Richter et Dallwitz 2000), par conséquent rendent difficile le passage de substances.

I-23.2 Caractérisation des éléments du plan ligneux

Les cellules constitutives du bois sont pluritailles et multiformes. Ces morphologies sont attribuées à diverses sources : appartenance à un groupe d'arbres, type de bois, position dans le cerne, position par rapport à la moelle et au houppier, etc. Le tableau 1.3 montre un exemple de grandeurs qui permettent en particulier de qualifier le tissu de bois de feuillus.

Vaisseaux	Ø tangentiel (µm)	$100 \leq \emptyset < 150$ Fin	$150 \leq \emptyset < 200$ Moyen	$\emptyset \geq 200$ Grossier
	Largeur (l) (µm)	$100 \leq l < 150$ Fin	$150 \leq l < 200$ Moyen	$l \geq 200$ Gros
	Nombre/mm ²	2 à 6 Rare	6 à 20 Moyen	20 et plus Nombreux
	Taille des ponctuation (µm)	4 à 7 Fine	7 à 10 Moyenne	10 et plus Grosse
Rayon	Nombre (n)/mm	$n < 4$ Rare	$4 < n < 10$ Moyen	$n > 10$ Nombreux
	Largeur (l) (µm)	$25 < l < 50$ Étroit	$50 < l < 100$ Moyen	$l > 100$ Large
	Hauteur (h) (µm)	$h < 1000$ Petit	$1000 < h < 3000$ Moyen	$h > 3000$ Grand
Fibre	Longueur (L) (µm)	700 à 900 Courte	900 à 1600 Moyenne	1600 à 2200 Longue
	Largeur (l) (µm)	$l < 24$ Étroite	$24 < l < 40$ Moyenne	$l > 40$ Large

Tableau 1.3 : Extrait du tableau des valeurs moyennes des caractéristiques anatomiques pour les bois de feuillus (tiré de Normand, 1972)

I-23.3 Limite bois juvénile et bois adulte

L'ensemble des accroissements annuels proches de la moelle forme le bois juvénile (Polge 1964). Il est assez difficile de définir ces deux types de bois, mais on peut les caractériser. La littérature fait plus état de la caractérisation du bois juvénile et de cette dernière, on déduit le bois adulte. La caractérisation du bois juvénile varie selon l'essence, la sylviculture pratiquée, la largeur du cerne, la hauteur dans l'arbre, la topographie du terrain. Ces facteurs influencent sur un bois le comportement des propriétés biologiques, anatomiques, physiques, mécaniques et chimiques. Zobel et Sprague (1998) ont montré que la détermination de la limite du bois juvénile et du bois adulte varie en fonction de la caractéristique étudiée. Parmi les propriétés émergentes du bois juvénile peu sensibles à l'effet largeur de cerne, on trouve :

- Chez les Gymnospermes : la longueur des fibres, l'angle des microfibrilles, le retrait longitudinal, la dimension tangentielle des trachéides, la densité minimum du bois dans le cerne.
- Chez les Angiospermes : la longueur des fibres, l'angle des microfibrilles, le retrait axial, le diamètre des vaisseaux.

Deux méthodes permettent de déduire le bois adulte du bois juvénile :

- La première est une estimation faite par interprétation visuelle. Elle consiste à suivre la représentation graphique de l'évolution des caractères (longueur des fibres, surface des vaisseaux, etc.) sur le gradient radial de la moelle vers l'écorce (Shiokura 1982 ; Bendtsen et Senft 1986 ; Clark et Saucier 1989 ; Fujiwara et Yang 2000)
- L'analyse mathématique est une méthode qui offre l'avantage de s'affranchir de l'interprétation visuelle souvent subjective. La régression linéaire segmentée définit l'âge cambial limite et les intervalles de chaque type de bois (Abdel-Gabir et Krahmer 1993, Sauter *et al.* 1999, Alteyrac *et al.* 2006, Medzegue 2007).

La détermination de la limite entre ces deux types de bois revêt un caractère assez important pour un emploi rationnel du bois, dans un pays résolu à faire de la filière bois l'un de ses principaux axes économiques.

I-24 Propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés qui entrent dans cette catégorie sont nombreuses. On évoque ici les caractéristiques (masse volumique, module d'élasticité longitudinale et la stabilité dimensionnelle) facilement accessibles qui permettent de classer un bois comme d'envisager ses utilisations possibles.

I-24.1 Densité ou masse volumique

Le terme « densité » est multi usages et peut parfois prêter à confusion. On parle de la densité de circulation, de reboisement, de présence, d'écoulement, etc. Pour éviter certaines confusions, il serait peut-être commode de parler de masse volumique dans le cadre du bois. La masse volumique est la quantité massique de matière ligneuse contenue dans le volume d'un bois donné. Cette propriété physique représente l'une des caractéristiques de base pour classer le matériau bois et son évaluation assez facile en fait un critère qualificatif de choix. Elle conditionne nombre de propriétés et d'aptitudes technologiques du matériau. Elle peut être affectée par les pratiques sylvicoles et les manipulations génétiques (Zobel *et al.* 1989). Il y a également un apport considérable d'autres facteurs à la variabilité de la masse volumique :

La masse volumique du bois influence énormément le rendement et la qualité des fibres. Son influence s'étend sur les qualités technologiques du matériau et l'infrastructure accompagnant l'usinabilité (pâte à papier) de ce matériau. Cette masse volumique résultant des variations du bois constitue aussi un facteur prépondérant pour apprécier son comportement mécanique. De plus, cette propriété est plus ou moins étroitement corrélée avec les principales propriétés physiques et mécaniques du bois ainsi qu'avec certaines caractéristiques de mise en oeuvre (durabilité naturelle, imprégnabilité...). Les travaux réalisés par le CTFT et cités dans Brunck *et al.* (1990), sur des mesures de ce paramètre montrent que les bois des plantations ont une masse volumique moyenne (300 et 400 kg/m³) inférieure à celle des forêts naturelles (300 ; 400 et 500 kg/m³). Un certain nombre d'auteurs (Brunck *et al.* 1990, ATIBT 1986, Christy *et al.* 2003, Gérard *et al.* 1998) trouvent une masse volumique de 440 kg/m³. En revanche Ngavoura (1998) a montré que c'est plutôt le bois juvénile qui a une masse volumique comprise entre 300 et 400 kg/m³. Pour apprécier les bois africains le CIRAD a établi (Tableau 1.4) un classement de la masse volumique en 5 niveaux. En se référant à ce tableau Bakraji *et al.* (2002) placent l'Okoumé dans la catégorie des bois légers avec une masse volumique de 550 à 650 kg/m³.

Masse volumique (mv) en kg/m ³	Catégorie
mv < 500	Bois très léger
500 < mv < 650	Bois léger
650 < mv < 800	Bois mi-lourd
800 < mv < 950	Bois lourd
mv > 950	Bois très lourd

Tableau 1.4 : Classification massique des bois africains (CIRAD-Forêt dans Gérard *et al.* 1998)

I-24.2 Module d'élasticité longitudinal (E_L)

Les propriétés mécaniques du bois varient avec la masse volumique. Cette dernière est influencée par la teneur en eau comprise entre l'état anhydre et l'état de saturation. Par conséquent nombre de caractéristiques des bois sont ramenées à l'humidité de 12% correspondant à la moyenne entre l'état anhydre et l'état de saturation. La connaissance des propriétés mécaniques est à la base de la mise en oeuvre et de l'utilisation adéquate du bois. Il faut connaître les contraintes admissibles et les déformations susceptibles des pièces de bois soumises à divers types de sollicitations afin de réaliser des constructions résistantes et mieux utiliser la matière ligneuse.

Le bois d'Okoumé est un matériau qui est régulièrement utilisé par les populations du Gabon pour les constructions ; d'où la nécessité de déterminer le module d'élasticité longitudinal (E_L) de l'Okoumé quel que soit le type d'écosystème. E_L est une propriété de première nécessité technologique pour les emplois en structure où les pièces de bois sont fréquemment sollicitées en flexion statique suivant leur plus grande direction, parallèle aux fibres. Ainsi, elle constitue un indicateur de la rigidité du bois. Ngavoura (1998) trouve un module de 9360 MPa, sensiblement égal à celui que donne MatWeb (9100 MPa) mais de différence assez remarquable avec Brunck *et al.* (1990). Selon Ngavoura <<les propriétés physiques, mécaniques et calorimétriques des bois de petit diamètre ne sont pas fondamentalement différentes de ceux de gros diamètre>>. Comme pour la masse volumique, le tableau 1.5 donne les classes de E_L pour apprécier les bois africains.

E_L (MPa)	Catégorie
$E_L < 10000$ MPa	Module faible
$10000 \text{ MPa} < E_L < 15000$ MPa	Module moyen
$E_L > 15000$ MPa	Module élevé

Tableau 1.5 : Classification de E_L des bois africains selon CIRAD dans Gérard *et al.* 1998

I-24.3 La stabilité dimensionnelle

L'anisotropie du matériau bois exige que l'on tienne compte des comportements de chaque direction (axiale, radiale et tangentielle) afin de caractériser les différents retraits et leur niveau de visibilité. La rétractibilité est l'ensemble des phénomènes qui accompagnent les variations du degré d'humidité dans le bois (entre l'état anhydre et le point de saturation des fibres). Elle se manifeste par des variations dimensionnelles pouvant entraîner des déformations et des fentes dans le bois. Le retrait apparaît dès que le bois se vide de toute l'eau libre, à ce moment-là l'eau liée commence à se détacher de la matrice cellulaire. L'humidité du bois devient inférieure au point de saturation de fibres (PSF). Ce dernier est généralement de l'ordre de 30% pour la plupart des essences, mais pour l'Okoumé, Brunck *et al.* (1990) trouvent qu'il est de 40%, alors que le CTFT (1989) le situe à 29%. Le PSF est un paramètre important car il détermine partiellement la stabilité dimensionnelle des ouvrages en service (Charron *et al.* 2003). Outre la méthode hydraulique de sa détermination, le PSF peut également être déterminé de façon numérique à partir des valeurs de retrait mesurées par rapport à l'état saturé (Ngavoura 1998, Dumonceaud 2001).

Quel que soit l'état, le bois contient toujours de l'eau, ceci est d'autant remarqué dans l'arbre. En effet bien que le duramen soit un ensemble de cellules mortes, ceci n'empêche pas l'eau d'y circuler de bas en haut de façon intense.

I-25 Durabilité naturelle

En raison de son origine biologique, le bois est un matériau potentiellement dégradable par des organismes lignivores. En analysant les pathologies des charpentes en bois, Giustina (1985) démontre que 50% des désordres sont liés aux spécificités du matériau avec comme principale conséquence le développement d'attaques cryptogamiques. Pour pallier ces désordres, les mesures de protection requises portent en particulier sur le choix des matériaux. Parmi les critères de choix, la durabilité naturelle figure en bonne place puisque cette caractéristique implique seulement un choix adapté des essences utilisées.

La longévité d'un arbre sur pied est assurée à la fois par des mécanismes de défense actifs et passifs ; celle du bois mis en œuvre n'est que la conséquence d'une défense passive (Shigo 1984, Laks 1991). La résultante de cette défense passive face aux agressions biologiques est communément appelée durabilité naturelle.

I-25.1 Agents de détérioration

Les êtres vivants susceptibles de dégrader le bois peuvent être de trois types (Fougerousse 1960) :

- ❖ les micro-organismes ;
- ❖ les insectes, responsables de la piqûre ou vermoulure ;
- ❖ certains animaux (térébrants marins), appartenant aux mollusques et aux crustacés.

Les deux derniers sont cités ici à titre indicatif, compte tenu du travail présenté qui sera exclusivement réalisé sur un groupe de micro-organismes (champignons lignivores du groupe des basidiomycètes). Outre les classifications des champignons par les mycologues, les professionnels du bois distinguent les champignons selon les types de dégâts qu'ils occasionnent sur le bois :

- ✓ **Les champignons de décoloration** : Ils sont incapables d'altérer les parois des cellules ligneuses mais ils peuvent provoquer des modifications d'aspect et de volume (Vernay *et al.* 1997). Ils créent cependant un milieu favorable à d'autres agents de dégradation du bois (Medzegue 2003), on y distingue :

- Les champignons de bleuissement : ils n'entraînent pas de changement appréciable de la consistance du bois et de ses propriétés mécaniques (Figure 1.10). Ils provoquent seulement une coloration spécifique du bois (bleu à noir). Colling (2002), note cependant qu'ils pénètrent souvent de plusieurs centimètres dans le bois.
- L'échauffure : lorsqu'elle est importante, elle est capable d'entraîner un changement très accentué de la consistance du bois (Figure 1.10). Elle est causée par une attaque enzymatique du bois semblable à celle de la pourriture fibreuse (voir plus bas).

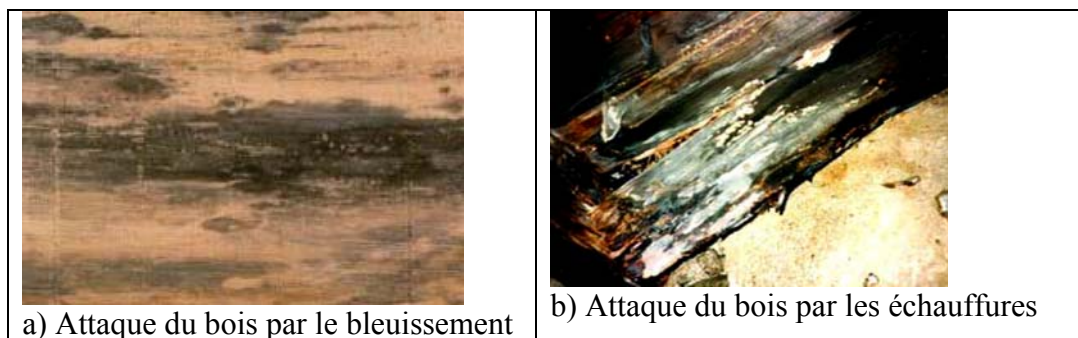


Figure 1.10 : Actions des champignons de décoloration sur du bois (Colling 200).

- ✓ **Les champignons lignivores ou de pourriture** : Leur hyphe se répand au travers du bois désintégrant les parois cellulaires, réduisant ainsi la résistance du bois (Figure 1.11). En considérant la pourriture du bois comme une modification irréversible du matériau, cette catégorie de champignons peut alors être considérée comme celle qui occasionne les dégâts les plus graves. Chacun d'eux dégrade majoritairement et de façon préférentielle l'un des constituants cellulaires ce qui se traduit par différents effets en termes de modification des propriétés du matériau. On distingue :
 - **Les champignons de pourriture brune**, également appelé pourriture cubique (*Gloephyllum trabeum*, *Antrodia sp*), dégradent préférentiellement les polysaccharides (cellulose et hémicellulose), laissant la lignine plus ou moins intacte.
 - **Les champignons de pourriture blanche** encore appelés pourriture fibreuse (*Coriolus versicolor*, *Pycnoporus sanguineus*), dégradent particulièrement la lignine, ils touchent également, mais en moindre intensité, les hémicelluloses et la cellulose. Ce type de pourriture affecte moins rapidement les propriétés mécaniques du bois que le type précédent bien qu'ils appartiennent tous au groupe des Basidiomycètes.

- **Les champignons de pourriture molle** : ces champignons appartiennent aux Ascomycètes du type *Chaetomium globosum* ou *Hypocrea rufa* et Deutéromycètes du type *Trichoderma harzianum* ou *Cladosporium cladosporioides*. Ils se rencontrent dans des milieux d'extrême humidité et à des taux d'oxygène moindre. La pourriture molle est provoquée par une attaque conjuguée de plusieurs champignons microscopiques qui érodent les parois cellulaires du bois et détruisent préférentiellement la cellulose comme la pourriture cubique.

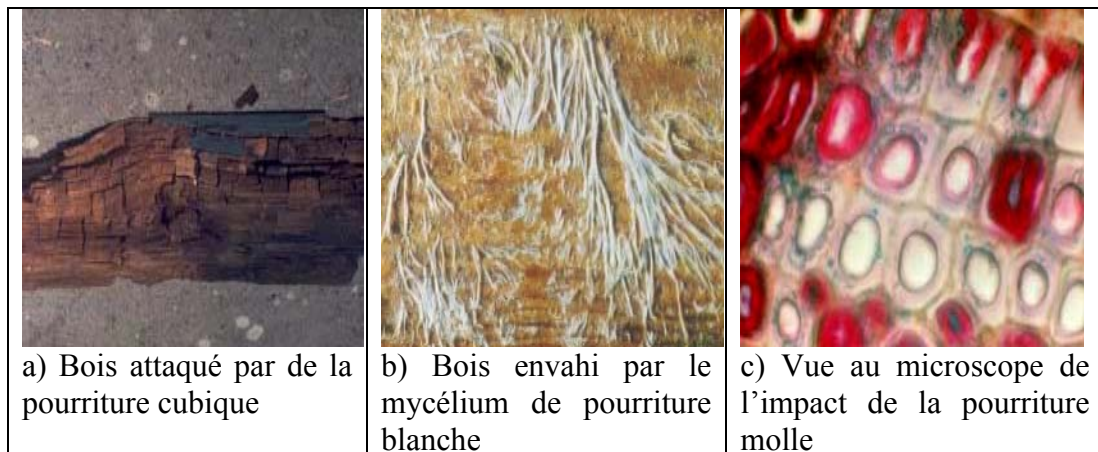


Figure 1.11 : Représentation de dégâts causés par différents champignons lignivores (Colling 2002).

Le Tableau 1.6 présente la spécificité écologique des micro-organismes avec les conséquences qui en découlent.

Agents de détérioration	Types de pourritures	Constituant dégradé préférentiellement dans le bois	Inconvénients majeurs sur le bois	Conditions de croissance (H ₂ O, O ₂ , T°)
Champignons lignivores	brune ou cubique	cellulose	perte de la résistance mécanique	H = 35-40% O ₂ = 20% T° = 20-36°C milieu très humide et pas assez oxygéné
	blanche ou fibreuse	lignine		
	molle (pâte)	cellulose + hémicellulose + lignine		
Champignons de décoloration	Echauffures Bleuissement	Contenu des celluloses de parenchyme (aubier)	modification de la couleur du bois	milieu très humide
Moisissures				
Bactéries			Augmentation de la perméabilité	

Tableau 1.6 : Conditions de croissance de micro-organismes destructeurs du bois.

I-25.2 Evaluation de la durabilité naturelle

Des siècles avant notre ère, l'estimation de la résistance du bois face aux intempéries et autres attaques biologiques, était faite de manière empirique par l'homme, aidé dans ce choix par l'expérience de la pratique. L'emploi des essences naturellement durables est démontré dans la Bible. Le Livre des Rois indique le choix des essences qui ont été utilisées pour la construction du Temple et du palais royal par le Roi Salomon. Willeitner *et al.* 1997 rappelle l'utilisation du cèdre du Liban (*Cedrus libani*) dans les constructions anciennes. Au 20^e siècle, l'azobé (*Lophira alata*) a longtemps servi comme traverses de rails dans la construction des chemins de fer. L'usage par expérience de certaines essences naturellement durables a fortement contribué à l'histoire de l'homme mais cette pratique allait menacer à terme une partie de notre patrimoine biologique par la destruction de la biodiversité et l'induction aux adaptations. Devant cette menace d'autres méthodes d'appréciation de la durabilité naturelle ont été mises au point.

Les essais *in situ* (essais de champ) consistent à tester la durabilité du bois au contact du sol. Ils présentent l'avantage de restituer les actions et interactions dont le bois peut être sujet dans la nature. Cependant ces essais sont très longs, les résultats ne pouvant être obtenus avant au moins 5 ans (Dirol *et al.* 2001).

Les essais de laboratoire sont basés sur la quantification de la perte de masse des éprouvettes exposées aux organismes biologiques. L'obtention de résultats est assez rapide (quelques mois) par rapport au test précédent. Dans le souci d'obtenir rapidement et de manière représentative les résultats pour apprécier la résistance du bois face aux agents de dégradation, des techniques basées sur la réduction du temps sont pratiquées (Barbara *et al.* 1999, De Groot *et al.* 2000, Aloui *et al.* 2004). Entre ces techniques hâtives et l'ensemble terminologie et classes de durabilité proposées par le Comité Européen de Normalisation (Tableau 1.8), il n'y a pas de différence significative (Van Acker *et al.* 1999).

I-25.3 Classes de durabilité naturelle

Les chercheurs qui ont travaillé sur la résistance naturelle du bois, se sont souvent heurtés sur une vision commune de la terminologie, la méthode à mettre au point et la correspondance à établir entre classes et zones (tempérée et tropicale). Willeitner *et al.* (1997) relèvent cette divergence de terminologie entre 4 auteurs qui classent une perte de masse de 11% mesurée en laboratoire, successivement très durable (Bavendamm 1941), durable (Scheffer et Duncan 1947), moyennement durable (Roosen 1954) et non-durable (Findlay 1938). Quant aux utilisations transversales du bois (régions tropicales en régions tempérées, et inversement), Findlay (1985) dans Eaton *et al.* (1993) fait une proposition entre classes de durabilité naturelle, pertes de masse mesurées en laboratoire et durée de vie du bois en extérieur (Tableau 1.7).

Classes de durabilité naturelle	Pertes de masse mesurées en laboratoire (%)	Durées de vie (année)	
		Milieu tempéré	Milieu tropical
Très durable	< 1	> 25	> 10
Durable	1 à 5	15 à 25	5 à 10
Moyennement durable	5 à 10	10 à 15	Non attribuée
Non-durable	10 à 30	5 à 10	2 à 5
Périssable	> 30	< 5	< 2

Tableau 1. 7: Correspondances entre classes de durabilité naturelle, pertes de masse en laboratoire et durées de vie en conditions tempérées et tropicales.

Devant la difficulté d'entente entre auteurs et soucieux d'une harmonisation européenne, le CEN établit en juillet 1994 la norme NF EN 350-1. Elle propose entre autres la classification de la durabilité naturelle des bois selon une échelle à cinq niveaux pour les champignons lignivores. L'opposition du bois (Tableau 1.8) face aux champignons (basidiomycètes) est estimée en s'appuyant sur la perte de masse relative (**X**). Cette dernière est obtenue en rapportant la perte de masse absolue corrigée (**x**) du bois à tester à celle relevée sur les essences de référence dont le duramen du Hêtre (*Fagus sylvatica*) pour les feuillus et l'aubier du Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) pour les résineux.

Classes de durabilité	Description	Perte de masse absolue x (%)	Perte de masse relative X (%)
1	Très durable	$x \leq 5$	$X \leq 0,15$
2	Durable	$5 < x \leq 10$	$0,15 < X \leq 0,30$
3	Moyennement durable	$10 < x \leq 20$	$0,30 < X \leq 0,60$
4	Peu durable	$20 < x \leq 30$	$0,60 < X \leq 0,90$
5	Non-durable	$x > 30$	$X > 0,90$

Tableau 1.8 : Classes de durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons lignivores, (norme EN 350-1).

Le bois d'Okoumé n'a rien à redouter des insectes de types lyctus. En revanche, il présente une résistance notoirement insuffisante face aux agents de pourriture (Brunck *et al.* 1990). Mais l'Association Technique Internationale des Bois Tropicaux (1986) place cette essence dans la classe 3 (moyennement durable). Cette caractéristique revêt une grande importance pour le bois d'Okoumé, tant pour son utilisation quotidienne par les populations du Gabon que pour une meilleure orientation des utilisations durables.

I-25.4 Origine de la durabilité naturelle

De nombreux facteurs : anatomiques, biologiques, chimiques, spatio-temporels, etc... peuvent expliquer pourquoi les bois opposent une bonne ou une mauvaise résistance face aux organismes lignivores (champignons et insectes). Dans ce contexte de barrière, la singularité revient aux constituants chimiques, surtout aux biocides (Schultz *et al.* 1995). On peut finalement dire que les facteurs contribuant à la durabilité naturelle d'un bois reflètent le potentiel génétique d'une essence (Dirol *et al.* 2001).

I-25.41 Facteurs Biologiques et anatomiques

La zone aubieuse renferme en grande quantité des substances très appréciées (cellulose, amidon, substances protéiques...) par les organismes xylophages. Il en est de même du bois parfait non duraminisé. Un processus rapide de transformation de l'aubier en duramen ou une faible proportion de la première partie (radial) du xylème en bois parfait augmenterait certainement la résistance du bois. La durabilité du bois face aux champignons est plus élevée dans le duramen proche de l'aubier (Dumoncaud 2001, Kokutse 2002, Aloui 2004).

La structure même de certains éléments du plan ligneux réduit fortement la détérioration du bois. Chez les résineux, lors du séchage, le torus se colle à la membrane bouchant ainsi le

passage au mycélium et limitant fortement la reprise de l'eau. Le phénomène de thylose souvent rencontré chez les feuillus (Okoumé) obstrue partiellement ou totalement les vaisseaux et entraîne également la fermeture des punctuations, rendant difficile la progression des hyphes et la reprise de l'humidité. Les essences qui ont des vaisseaux de petit diamètre ($\text{\O} < 50\mu\text{m}$) ne favorisent pas le développement de certains insectes xylophages tels que le lyctus qui ne peut pondre ses œufs dans le bois (Dirol *et al.* 2001).

I-25.42 Les facteurs chimiques

Les champignons apprécient le bois selon sa comestibilité. Cette dernière est spécifique de la composition chimique du bois. L'état moléculaire d'un corps jouerait donc un rôle assez important en termes de durabilité suivant que le bois renferme des substances appétissantes ou toxiques pour les agents biologiques. Toutefois la durabilité naturelle de certaines espèces est attribuée en particulier à l'activité des extractibles qu'elles renferment (Schultz *et al.* 1995).

A) Le rôle des substances macromoléculaires

Les parois cellulaires sont constituées de polysaccharides (cellulose et hémicellulose) et de lignine. Leur proportion varie selon leur appartenance aux Gymnospermes ou aux Angiospermes. Quant à l'Okoumé, le tableau 1.9 donne les polysaccharides largement dominants (en moyenne 70,7% des constituants). Les agents de pourriture apprécient fortement ces constituants cellulaires et leur grande proportion à l'état amorphe fragilise le matériau. Néanmoins les phases de cristallinité de la cellulose réduisent la surface moléculaire accessible aux enzymes des champignons et empêchent la progression et/ou l'épanouissement du mycélium dans le bois.

La lignification de la paroi cellulaire est un facteur très important dans le système de défense du bois ; les lignines jouent le rôle de barrière physique. Ces polymères localisés dans la lamelle moyenne et dans les parois secondaires empêchent les enzymes de rupture des polysaccharides des champignons d'atteindre un nombre suffisant de liaisons glycosidiques pour permettre une hydrolyse suffisante (Scheffer et Cowling, 1966). La structure de la lignine semble jouer un rôle prépondérant. Il existe des différences structurales entre les lignines de conifères et de feuillus.

Celles des conifères sont essentiellement constituées d'unités guaïacyles alors que celles des feuillus sont constituées de mélange d'unités guaïacyles, syringyles et parahydroxyphényles. Cette constitution monomérique est un caractère important pour la durabilité. Syafii *et al.*

(1988) ont démontré que chez des feuillus tropicaux, les espèces les plus durables vis-à-vis de *Coriolus versicolor* sont celles qui possèdent une proportion d'unités guaiacyles élevée. Quant à l'Okoumé, le rapport S/G est de 1,5 (Vitiello 1983).

	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Extrait	Cendre
Savard (1960)	47,9%	15%	31,4%	2,3%	0,4%
Lal (1977)	47,8%	36,9%	21,3%	16,8%	1,8%
Brunck et al. (1990)	46%	15%	30%	1,5%	0,33%
Minkuè (2000)	50,88%	15,71%	30,87%	3,23%	0,43%
Safou (2005)	48,4%	30%	19%	2,1%	0,55%

Tableau 1.9 : Données (littérature) sur les proportions des substances chimiques de l'okoumé

B) Le rôle des extractibles

Les extractibles sont des produits du métabolisme secondaire de l'arbre que l'on peut extraire à l'eau ou à l'aide des solvants organiques. Les composés extractibles représentent généralement 1 à 5% de la masse du bois (Zobel *et al.* 1992). Les études sur les processus de vieillissement de l'arbre laissent penser que les substances responsables de la durabilité du bois se forment lors de la duraminisation. Les cellules de parenchyme semblent être le lieu de synthèse des substances extractibles du duramen (Bamber et Fuzakawa 1985). Il est évident que ces cellules jouent un rôle important puisqu'elles constituent les seuls éléments vivants du bois avant la duraminisation.

Par le système de communication (ponctuations et perforations) les extraits diffusent dans les autres cellules du plan ligneux et se déposent dans les lumens ou les parois cellulaires. Leur analyse révèle une grande diversité, on y rencontre des hydrates de carbones (amidon, glucose...), des composés phénoliques (tanins, stilbènes, flavonoïdes, terpénoïdes, tropolones ...) et des composés aliphatiques. La qualité, la quantité et la distribution des constituants secondaires influencent la résistance du bois (Haupt *et al.* 2003). Plusieurs études sur le rôle des extractibles dans la durabilité ont montré une augmentation parallèle des deux de la moelle vers la périphérie (Aloui *et al.* 2004).

L'extraction et l'étude de la structure moléculaire de ces composées ont fait l'objet de plusieurs études. Chez les angiospermes, les tanins inhibent les phénols-oxidases extracellulaires.

Chez les gymnospermes, les thujaplicines sont des agents de dissociation qui inhibent la phosphorylation oxydative, principale source d'énergie du champignon. Il peut également exister une action conjuguée (synergie) entre différents composés pour augmenter la

résistance du bois ; c'est le cas chez le Teck où le latex joue le rôle de barrière physique alors que d'autres composés (anthraquinone) sont répulsifs voir toxiques (Yamamoto *et al.* 1998), par exemple la tectoquinone qui inhibe le *Coniophora puteana* (Haupt *et al.* 2003). Les extraits du bois auraient donc en réalité deux propriétés : une antifongique et une autre qui serait celle d'élimination des radicaux libres (antioxydant). Le mode d'attaque des pourritures brune et blanche montre que ces champignons utiliseraient certains radicaux libres pour casser la paroi cellulaire afin de permettre la pénétration des enzymes extracellulaires. La combinaison entre ces deux propriétés des extractibles du bois serait donc à l'origine de la durabilité vis-à-vis des champignons (Schultz et Nicholas 2000). La présence de deux composés de types stilbènes (oxyresvératrol et dihydromorin) dans l'oranger des osages (*Maclura pomifera*), semble être garante de la bonne durabilité de cette espèce. L'extraordinaire durabilité naturelle du robinier faux acacia (*Robinia pseudoacacia*) et du mûrier noir est attribuée à la synergie impliquant les deux stilbènes cités et d'autres composés en moindre quantité (Schultz *et al.* 1995).

De l'entaille de l'écorce de l'Okoumé exsude une oléorésine, qui a fait l'objet de quelques études. Cet exsudat renfermerait des triterpènes pentacycliques (α - et β -amyrine) qui peuvent servir de fonction protectrice contre les attaques microbiennes et insectes pathogènes (Dupont *et al.* 1930/1948, Tessier *et al.* 1982, Guang-Yi *et al.* 1988/1989, Gardrat *et al.* 2005). Cette essence renferme un taux de silice quelquefois élevé (0,042 à 0,335%), Brunck *et al.* (1990).

CHAPITRE II

MATERIEL ET METHODES

Ce chapitre décrit le matériel utilisé et la méthodologie suivie, partant des sites de récolte. Il évoque successivement la description en anatomie, les propriétés physico-mécaniques, la durabilité naturelle, les composants chimiques, particulièrement les composés extractibles.

La détermination de la limite du cerne du bois d'Okoumé permettra de mener l'étude en fonction de l'âge cambial et d'établir une évolution de la largeur de l'accroissement annuel de la moelle à la périphérie. L'âge cambial correspond à l'âge compté depuis la moelle (Thibaut 1997). La mise en relation de l'âge cambial avec les caractères à évaluer conduira d'une part au regroupement des valeurs intrinsèques du bois d'Okoumé, en fonction des écosystèmes (plantation et forêt naturelle) et des zones écologiques (zones **A** et **B**) et à définir d'autre part la zone limite entre le bois juvénile (BJ) et le bois adulte (BA) par une méthode mathématique (régression linéaire segmentée). La définition de la limite BJ/BA ne se fera que pour l'écosystème artificiel dont la date de mise en culture des parcelles est connue.

Cerner les valeurs intrinsèques du bois d'Okoumé pourra conduire à une réorientation des emplois de ce bois ; par conséquent à une utilisation raisonnée du matériau et à un recul sur les pressions en forêt naturelle.

II-1 Sites de récolte des échantillons

Les échantillons ont été récoltés en deux étapes dans deux écosystèmes différents (artificiel et naturel). La première campagne de récolte d'échantillons a été faite dans des plantations d'Okoumé (Figure 2.1), situées dans la région de l'Estuaire en zone écologique « **B** ». Les produits récoltés sont issus des massifs forestiers aménagés dont le massif forestier de Bokoué (situé entre 0°1' de latitude nord et 0°28' de latitude sud et entre 10°07' et 10°24' de longitude ouest) et celui de M'Voum (situé entre 0°26' et 0°37' de latitude nord et entre 9°40' et 10°07' de longitude ouest). La seconde campagne se déroule en milieux naturels non aménagés (Figure 2.1), respectivement dans les localités de Cocobeach, Ndjolé (tous deux situés en zone écologique « **B** ») et Mitzic (en zone écologique « **A** »). Cette dernière localité a la particularité d'être située dans les environs de la limite de l'aire naturelle de l'Okoumé (Brunck *et al.* 1990).

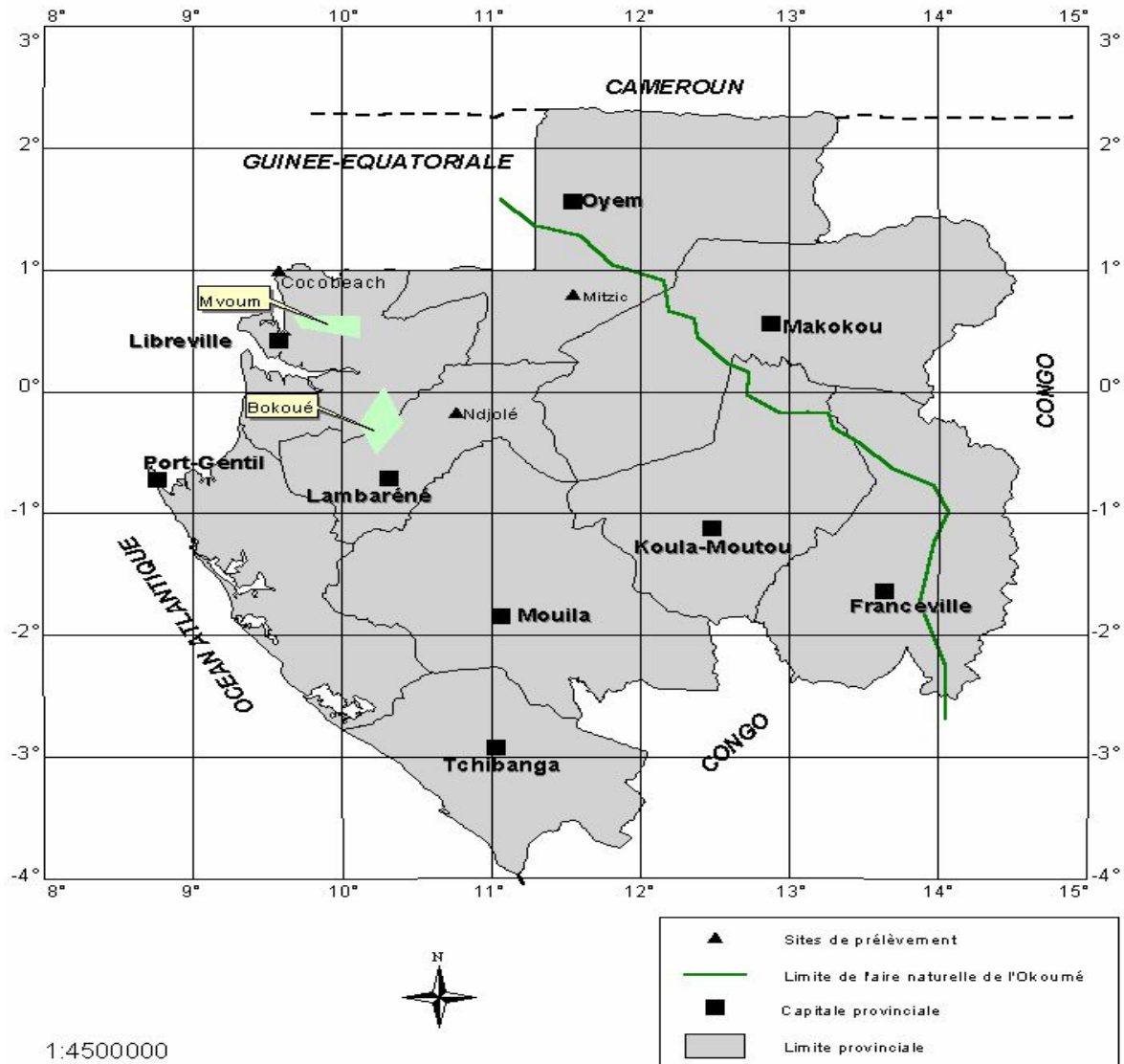


Figure 2.1 : Localisation des sites d'échantillonnage en forêt naturelle et en plantations (massifs forestiers de la Bokoué et de la M'Voum en vert).

Trois de nos sites d'intervention (Bokoué, M'Voum et Ndjolé) ne disposant pas de stations météorologiques, les données climatiques des stations proches, situées dans la même zone écologique ont été alors utilisées.

Ces données ont été fournies par Direction Nationale de la Climatologie (Gabon), Météo France et Centre Africain de la Météorologie Appliquée au Développement (Niger). Pour chaque paramètre physique, nous avons établi des moyennes mensuelles :

- ✓ Pour Cocobeach et le massif forestier de M'Voum (massifs mitoyens), la station de Cocobeach a été considérée. Elle se caractérise par une pluviométrie de 3126 mm/an, les températures oscillant entre 24,5°C et 27,1°C et une humidité relative moyenne de 85%.

- ✓ Pour Ndjolé et le massif forestier de Bokoué, les stations de Lambaréné et de Libreville ont été prises en compte pour les caractéristiques des mêmes facteurs physiques :
 - Lambaréné : 1969 mm/an de pluies avec 23,9 à 27,8°C de température et 82% d'humidité relative.
 - Libreville : 2842 mm/an de pluies, la température oscille entre 23,9 et 27,8°C et 86% d'humidité relative.
- ✓ Pour Mitzic : 1589 mm/an de pluies, la température oscille entre 22,7 et 25,6°C et 83% d'humidité relative.

Les stations climatiques de la zone **B** ont des niveaux de précipitations plus élevés, alors que les températures sont plus douces en zone **A**. La figure 1.1 (chapitre 1) donne l'évolution de l'ensemble des trois zones écologiques du Gabon.

II-2 Matériel végétal et affectation

II-21 Matériel végétal

On a abattu 54 arbres de l'étage dominant dont 28 arbres des plantations (13 pieds de Bokoué et 15 de M'Voum) et 26 arbres dans l'écosystème naturel (6 pieds de Mitzic, 10 de Ndjolé et 10 de Cocobeach). Les arbres d'intérêt présentaient tous un état sanitaire satisfaisant. Au niveau des plantations les arbres abattus avaient tous 43 ans révolus en 2003 (année de l'abattage). Les parcelles ont été mises en place en 1960 à écartement initial et final de 6 x 6 pour une densité moyenne environ de 270 Okoumé/hectare (Leroy Deval 1976). Nous avons fréquemment rencontré des sujets ayant des diamètres supérieurs ou égaux au diamètre minimum d'exploitabilité de l'Okoumé (DME = 70 cm) en vigueur au Gabon. Les détails sur les valeurs dendrométriques sont donnés en annexe (page 182). Quant à la forêt naturelle, ne connaissant pas la date d'établissement des plants, la récolte a plutôt porté sur des sujets ayant un diamètre au-dessus des contreforts supérieur ou égal au DME. L'abattage, le tronçonnage et le sciage ont été réalisés à la scie à chaîne (tronçonneuse).

Sur chaque arbre abattu, on a prélevé à une hauteur moyenne de 7 m, un billon de 0,6 m de long dans le sens du fil sur lequel une rondelle de 50 mm a été tirée et diamétralement un plateau incluant la moelle a été débité. Le prélèvement des billons à différentes hauteurs est dû principalement au fort développement de contreforts. Par conséquent la partie souche-culée était assez grande. Cette situation est plus marquée sur les Okoumé de Bokoué où l'arbre B7 présentait des contreforts dépassant 4m (annexe page 182).

L'oléorésine est un exsudat de l'Okoumé. Elle a été prélevée sur des arbres à environ 1,5m du sol par incision oblique sur l'écorce de façon à atteindre sa partie vivante (liber). Chez les Burseraceae (famille botanique à laquelle appartient l'Okoumé) les canaux sécréteurs sont situés dans le phloème (Wannan et Quinn 1990). L'exsudat coagule au contact de l'air en formant des agglomérats. Ces derniers ont été récupérés collés aux écailles de l'écorce de l'arbre. Il est de couleur blanchâtre, parfois verdâtre, translucide, dégage une odeur caractéristique des élémis (Dupond *et al.* 1930). La récolte des échantillons a été réalisée sur 12 arbres dont :

- ❖ Huit arbres en milieu naturel (deux à Ntoum qui est situé à 35km de Libreville et six à Cocobeach) ;
- ❖ Quatre arbres en plantation (Bokoué).

Par commodité de transport du Gabon en France, l'oléorésine provenant des arbres d'une même localité a été rangée dans un même flacon. Dans ces conditions pour la détermination des constituants, un prélèvement « bas-milieu-haut » a été effectué afin de préparer un échantillon moyen homogénéisé par broyage dans un mortier. L'oléorésine récoltée présente des aspects différents : celle de Ntoum est solide, celle de Cocobeach est collante et celle de Bokoué offre un aspect intermédiaire (semi-collante).

II-22 Affectation du matériel végétal

Le plateau est divisé en deux sous-plateaux (Figure 2.2). Sur chacun, trois paires de blocs aux dimensions et orientations de 350 mm longitudinale x 50 mm radiale x 50 mm tangentielle (éprouvette de **type A**) ont été prélevées pour servir à la datation, à l'anatomie et à l'analyse des fibres. Les parties des sous-plateaux restant sont divisées après délimitation des cernes en barreaux suivant les directions et dimensions de 400 mm longitudinale x 20 mm radiale x 20 mm tangentielle (éprouvette de **type B**). Ces barreaux en moyenne 5 à 7 par sous-plateau serviront pour l'évaluation de la masse volumique et du module d'élasticité longitudinal. Les éprouvettes de **type B** sont redimensionnées en **type C** pour la stabilité dimensionnelle et en **type D** pour la durabilité naturelle et l'analyse chimique. Outre les prélèvements effectués sur le bois, l'oléorésine d'Okoumé a été également récoltée afin de chercher si les constituants de cet exsudat peuvent apporter une amélioration de la durabilité du bois d'Okoumé et d'identifier les constituants volatils potentiellement valorisables. La figure 2.2 donne la distribution générale des échantillons. Pour l'évaluation de chaque propriété (Masse volumique, E_L ...) les éprouvettes sont façonnées de manière singulière.

Particulièrement pour la durabilité les arbres sont repartis en 2 lots : lot intra-arbre avec 23 pieds (5 de Bokoué, 5 de M'Voum, 5 de Cocobeach, 5 de Ndjolé et 3 de Mitzié) pour mesurer la résistance selon une orientation horizontale et le lot inter-arbre composé de 31 pieds théoriquement (8 de Bokoué, 10 de M'Voum, 5 de Cocobeach, 5 de Ndjolé et 3 de Mitzié) qui ne serviront pas aux opérations relatives au lot intra-arbre.

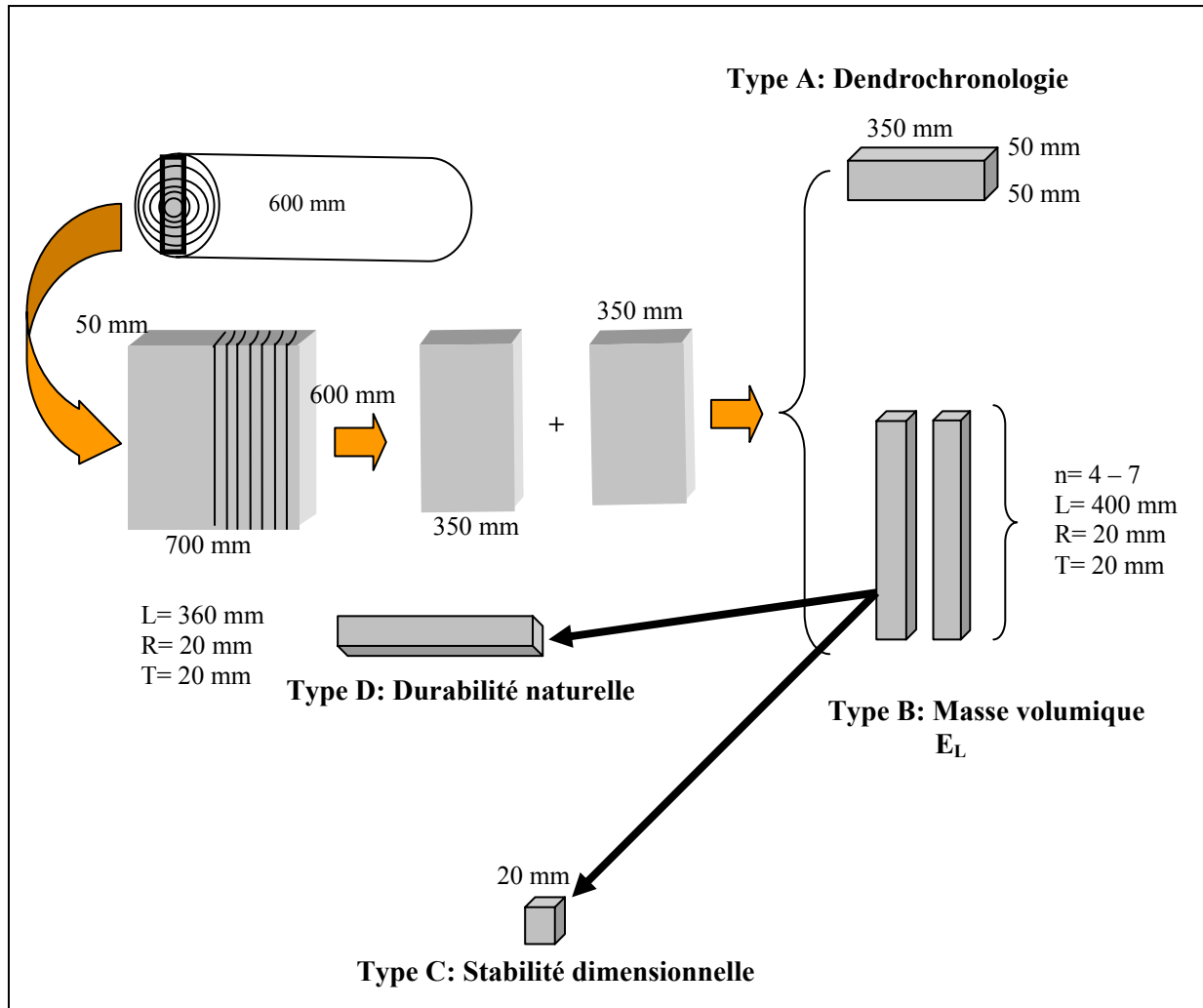


Figure 2.2 : Débit et affectation des échantillons utilisés pour l'étude anatomique, les essais physico-mécaniques et la durabilité naturelle.

La position dans l'arbre de chaque éprouvette a été rigoureusement identifiée par l'âge cambial (cerne central de l'éprouvette) et la distance à la moelle. La variabilité intra-arbre est réalisée sur un gradient radial. Ne connaissant pas encore la limite BJ/BA, le duramen a été divisé en trois (Clark et Saucier 1989). Pour ce faire, les événements marquants de la vie d'un peuplement d'Okoumé lors de sa croissance et la courbe de croissance des Okoumé en plantation (Maître *et al.* 1982) ont servi de repère. Le tableau 2.1 résume cette limitation basée sur l'apparition des strates dans un peuplement d'Okoumé (chapitre 1).

Une correspondance a été établie entre le duramen interne (DI) avec l'âge calendaire de la 1^{re} strate, le duramen intermédiaire (DM) avec la 2^e strate et le duramen externe (DE) prolongé parfois jusqu'à l'aubier avec la 3^e strate. Cette découpe permettra de voir s'il existe une relation avec les différentes caractéristiques à évaluer.

Position radiale	Age cambial	Caractéristique du peuplement
Duramen interne	0 – 10 ans	Monostrate
Duramen intermédiaire	11 – 19 ans	Bistrate
Duramen externe	20 ans et plus	Tristrate

Tableau 2.1: Répartition des positions radiales sur le bois de cœur en fonction de la stratification du peuplement d'Okoumé.

II-3 Anatomie

La connaissance de l'anatomie d'un bois permet d'expliquer et de prévoir ses propriétés physiques et mécaniques. Pour décrire l'anatomie du bois d'Okoumé, les observations sont placées à deux niveaux :

- ❖ Macroscopique afin de mettre en avant les différents types de bois,
- ❖ Microscopique, pour distinguer la microstructure de ce feuillu : Okoumé.

La mise en relation des observations anatomiques et les paramètres environnementaux conduit à la limitation du cerne de l'Okoumé.

II-31 Matériel et méthodes utilisés pour la description anatomique

II-31.1 Matériel lignocellulosique

Une paire d'éprouvettes de type **A** a été prise en compte sur 23 arbres selon la provenance (5 de Bokoué, 5 de M'Voum, 5 de Cocobeach, 5 de Ndjolé et 3 de Mitzié) soit 46 échantillons. Les prélèvements d'éprouvettes sont faits en prenant soin préalablement de localiser à l'aide d'une loupe binoculaire et de délimiter au crayon à papier sur chaque cerne les zones d'intérêt. Par conséquent les observations macroscopiques sont aussi faites en même temps. A l'aide d'une scie à chantourner (DEMEL, model 1371), chaque cerne a été sorti. Les éprouvettes sont façonnées aux dimensions 10 mm x 7mm x **X** mm (**X** varie suivant la largeur du cerne). Le plan radial (coupe passant par la moelle) a servi de base. En effet à partir de ce dernier, il est facile de définir les plans tangentiel et longitudinal.

II-31.2 Méthode (anatomie)

II-31.21 Exécution des coupes

Le matériau utilisé n'étant plus vert, les éprouvettes sont saturées d'eau par cycles successifs de vide et de pression, afin de ramollir les parois des cellules pour faciliter l'exécution des coupes. Les éprouvettes sont maintenues saturées en mettant régulièrement des gouttes d'eau au-dessus. Pour éviter que les coupes s'enroulent, des gouttes d'un mélange non-miscible *alcool-glycérine* sont déposées de manière régulière sur le couteau du microtome.

II-31.22 Montage des coupes

Nous avons monté certaines coupes en l'état naturel afin de localiser facilement l'oléorésine. Celle-ci est nettement visible en l'absence de tout traitement ; car les opérations de blanchiment et/ou de coloration entraînent la dissolution des substances extractibles qui deviennent difficilement observables. La coloration des coupes est précédée d'un blanchiment. Nous avons utilisé un mélange eau distillée (80 ml)-eau de javel trouvée dans le commerce (5 gouttes) dans lequel les coupes sont trempées pendant environ une minute. Ensuite les coupes sont rincées dans de l'eau distillée (80 ml). Puis, elles sont placées dans une solution de safranine ou de phloroglucinol. La déshydratation des coupes est réalisée par un passage successif dans des bains d'alcool éthylique (50%, 80% et 100%). Cette étape est suivie du montage entre lame et lamelle. Certains montages permanents ont été réalisés avec le baume du Canada.

Des observations ont également été faites au microscope électronique à balayage (de type JEOL 840A) au Centre de Ressources en Microscopie Electronique et Microanalyse (CREMEM). Cette étape nous a permis de visualiser des structures fines telles que les ponctuations, la distribution spatiale des vaisseaux, les perforations, etc... et de nous rendre compte de la contribution de la structure cellulaire à la durabilité. Les éprouvettes utilisées sont placées sur un support en aluminium adapté au microscope et « carbonées » ; c'est-à-dire qu'on dépose par évaporation sous vide une très fine couche de carbone pour améliorer la conduction des électrons (quelques dizaines d'angströms). Les images ont été analysées avec le logiciel SIS Analysis.

II-32 Dendrochronologie

Dendrochronologie (*Dendron* : arbre, *chronos* : temps et *logos* : science) désigne la science qui utilise les fluctuations de la croissance des arbres pour mesurer le temps. Elle permet l'étude des rythmes de croissance et des réactions de l'arbre face aux paramètres extérieurs. Le dénombrement des cernes donne l'âge de l'arbre en mettant en évidence les fluctuations de la zone cambiale dont le fonctionnement saisonnier est bien connu pour les espèces des zones et climats tempérés. Quant aux bois tropicaux, pour lesquels on a longtemps pensé qu'ils ne présentaient pas de rythme de croissance, Catinot en 1958 (dans Mariaux 1967) a estimé « ...*on pouvait tirer des cernes de l'Okoumé une estimation de l'âge....pour dépasser le pessimisme général* ». La présence et/ou la visibilité des cernes annuels dans le bois semblent dépendre plus du genre botanique que du climat sous lequel a poussé l'arbre (Détienne *et al.* 1998).

L'étude des cernes sur l'Okoumé a été réalisée par un certain nombre de chercheurs, notamment : Mariaux (1967 et 1970), Bedel (1969), Détienne (1989), Brunck *et al.* (1990), Détienne *et al.* (1998). Loin de mettre en cause les travaux antérieurs, un des aspects de cette étude est de voir comment on peut de façon simple et objective définir le cerne du bois d'Okoumé et pouvoir évaluer les propriétés de cette essence suivant le gradient radial. Il serait alors facile d'affecter une quelconque partie du bois à un usage adapté. Pour ce faire, un examen des caractéristiques biologiques de cette espèce, des paramètres environnementaux (pluviométrie et température), des observations anatomiques et de la courbe de croissance (Maître *et al.* 1982) a été effectué.

II-32.1 Matériel et Méthode

Des paires de blocs de bois aux dimensions 50mm x 350mm x 50mm (éprouvette de type A) selon les directions longitudinale, radiale et tangentielle, sont prélevés sur chaque sous-plateau (Figure 2.2). Ils sont séchés à l'air libre puis poncés au papier abrasif, successivement aux grains 100, 120, 220, 320, 400, 600 et 1200, pour avoir une surface bien lisse (Figure 2.8a). A l'aide d'une loupe binoculaire, les cernes sont délimités en tenant compte des aspects que présentent les deux blocs et la reproduction individuelle de la croissance de chaque arbre. Les échantillons sont scannés puis analysés par imagerie à l'aide du logiciel WinDendro[©] (Regent Instruments, Québec, Canada).

La courbe de croissance établie par Maître *et al.* (1982) sur les plantations d'Okoumé a permis de situer le cerne 1 suivant la hauteur de prélèvement du billon. Nous avons également utilisé les normales climatiques afin de confronter la macrostructure du cerne et les paramètres environnementaux.

II-4 Propriétés physiques et mécaniques

Ce paragraphe présente le matériel et les méthodes utilisés pour l'évaluation de la masse volumique, de la stabilité dimensionnelle et du module d'élasticité longitudinal (E_L). Le matériel végétal utilisé a été scindé en deux groupes : un premier groupe pour mesurer la masse volumique et le module d'élasticité longitudinal et un second groupe pour évaluer les différents caractères de la stabilité dimensionnelle.

II-41 Masse volumique et Module d'élasticité longitudinal (E_L)

II-41.1 Matériel végétal

On a façonné 356 éprouvettes de type **B** issues de 54 arbres dont les origines sont présentées dans le tableau 2.2. L'évaluation selon le type de duramen a été réalisée sur l'ensemble des arbres afin d'avoir un échantillon assez large. Les éprouvettes sont dimensionnées et orientées 360 mm (longitudinal) x 20 mm (radial) x 20 mm (tangential).

	Arbre			Eprouvette		
	Site	Ecosystème	Zone écologique	Site	Ecosystème	Zone écologique
Bokoué	13	-	-	108	-	-
M'Voum	15	-	-	111	-	-
Cocobeach	10	-	-	46	-	-
Ndjolé	10	-	-	69	-	-
Mitzic	6	-	-	22	-	-
Plantation	-	28	-	-	219	-
Forêt naturelle	-	26	-	-	137	-
Zone A	-	-	6	-	-	22
Zone B	-	-	48	-	-	334
Total	54	54	54	356	356	356

Tableau 2.2 : Quantification des arbres et des éprouvettes en fonction de la provenance.

II-41.2 Méthode (masse volumique et module)

II-41.21 Masse volumique

Elle est mesurée sur des éprouvettes prévues pour l'évaluation du module d'élasticité longitudinal. Chaque éprouvette est pesée afin de déterminer sa masse **M** (en kg) à environ 12% d'humidité. A l'aide d'un pied à coulisse les cotes (largeur et hauteur) sont mesurées en trois points le long de l'éprouvette.

La masse volumique (kg/m^3) est déterminée selon l'équation :

$$D = \frac{M}{V} \quad \text{où}$$

$$V \text{ (volume en m}^3\text{)} = L \times l \times h$$

L : longueur de l'éprouvette (m)

l : largeur moyenne de l'éprouvette (m)

h : hauteur moyenne de l'éprouvette (m)

l et h sont les valeurs moyennes des trois mesures faites sur la longueur (L).

II-41.22 Module d'élasticité longitudinal (E_L)

Une méthode d'évaluation non destructive a été utilisée en réalisant des essais vibratoires. Elle permet une utilisation rationnelle et continue du matériau rendant possible la réalisation de différents tests physico-mécaniques, durabilité et chimiques en restant sur la même tranche d'âge cambial. Ceci offre l'avantage de minimiser les erreurs qui peuvent être dues à la manipulation (opérateur) et ce que nous avons appelé <<xylo-séquences²>>. Il est reconnu que le bois des essences forestières présente une variabilité considérable (Nepveu 1994).

Les essais d'évaluation non destructive sont basés sur l'analyse spectrale des vibrations naturelles. L'analyse spectrale d'un mouvement naturel offre le moyen de déterminer simultanément plusieurs fréquences propres d'une structure donnée. Chaque mode de vibration est définie par sa fréquence propre f_k , son allure propre (Figure 2.3) et ses amplitudes (Figure 2.4).

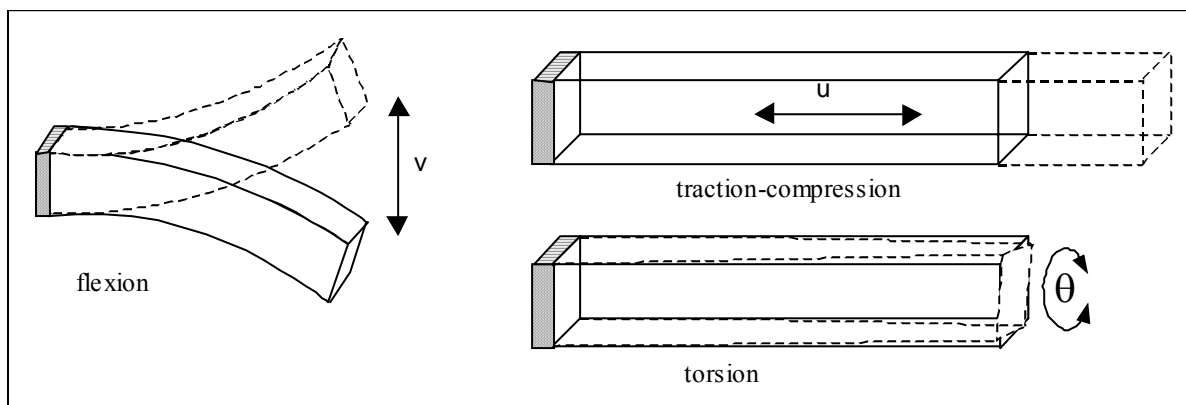


Figure 2.3 : Allure des différents types de vibrations

² Ensemble de variations dans le bois subséquentes aux changements de la matrice d'analyse.

Le module d'élasticité longitudinal a été calculé à partir de la formulation de Bernoulli. Elle néglige les déformations de cisaillement et considère pour l'équilibre instantané des efforts, que la masse est concentrée aux points de l'axe de symétrie de la poutre en l'état de repos. Il est fait l'hypothèse selon laquelle les sollicitations auxquelles la poutre est soumise sont symétriques par rapport au plan 0xy. De plus, il existe une ligne neutre qui, à l'état de repos est confondue avec l'axe 0x de la symétrie de la poutre.

Le mouvement est décrit par les déplacements $U(x, t)$, $V(x, t)$, $W(x, t) = 0$ des points P de coordonnées $y = 0 = z$, de la ligne neutre. Dans le cas des vibrations de flexion (Figure 2.3) seuls les déplacements $V(x, t)$ suivant l'axe 0y sont pris en compte afin de mettre en évidence les relations entre ces déplacements et les lois de comportement du matériau. Il est également question de l'hypothèse des tranches, qui admet que toute section droite de la poutre en l'état de repos reste plane au cours du mouvement. Ces hypothèses sur l'équilibre des efforts et des moments, conduisent à la formulation de Bernoulli de l'équation aux dérivées partielles du mouvement en flexion d'une poutre.

$$\rho S dx \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = - \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad \Rightarrow \quad \rho S \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = - \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\rho I dx \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} = \frac{\partial M}{\partial x} dx - T dx \quad \Rightarrow \quad \rho I \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} = \frac{\partial M}{\partial x} - T$$

Avec

- T : effort tranchant,
- β : moment fléchissant,
- M : rotation du moment fléchissant,
- I : inertie de section,
- S : section,
- ρ : masse volumique,
- E : module de Young, supposé homogène et isotrope.

Les relations classiques de la résistance des matériaux, en l'absence de l'effet d'inertie de rotation mis en évidence par Rayleigh et l'effet de cisaillement mis en évidence par Timoshenko, sont les suivantes :

$$\frac{\partial \beta}{\partial x} = \frac{M}{EI} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{\partial V}{\partial x}$$

En éliminant T , M , β entre les quatre équations précédentes, l'équation aux dérivées partielles du mouvement s'écrit :

$$EI \frac{\partial^4 V}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Si on pose $V(x, t) = F(x) \sin(2\pi f_k t + \Phi)$, la résolution de l'équation (1) conduit à un système de degré 4 :

$$\frac{d^4 F(x)}{dx^4} - \frac{\rho S}{EI} 4\pi^2 f_k^2 F(x) = 0$$

La recherche des modes propres de vibration, après application des conditions aux limites ($T = 0$ en $x = 0$ et $x = 1$; et $M = 0$ en $x = 0$ et $x = 1$) conduit alors à :

$$4\pi^2 f_k^2 = X_k \frac{E}{\rho} \frac{I}{Sl^4} \quad \text{où} \quad X_k = m_k^4 \quad (\text{cf. Tableau 2.3}) \quad \text{avec} \quad m_k = (2k-1) \frac{\pi}{2}$$

m_k étant la $k^{\text{ième}}$ racine positive de $\cos(m)\text{ch}(m) = 1$

Ainsi, pour une poutre flottante, si l'on peut identifier la fréquence f_k d'un des modes propres et que l'on connaît son rang k (Tableau 2.3), on peut déduire la valeur du module d'élasticité du matériau dans la direction $0x$, selon la formule:

$$E = 4\pi^2 \rho l^2 \frac{Sl^2}{I} \frac{f_k^2}{X_k} \quad (2)$$

Le tableau 2.3 ci-dessous donne les valeurs et les écarts des paramètres qui sont à considérer pour arriver à la linéarité.

Rang k	m_k	X_k	$F_{1(mk)}$	$f_{2(mk)}$
1	4,73	500,56	49,481	12,303
2	7,8532	3805,5	108,925	46,05
3	10,9956	14618	186,87	98,905
4	14,1372	39944	284,68	171,59
5	17,2788	89135	402,23	264
6	20,4204	173881	539,51	376,15

Tableau 2.3: Paramètres fixes entrant dans les approximations linéaires

Le choix de la formulation de Bernoulli pour estimer le module élastique s'appuie sur les travaux de Casagrandé (1998) qui a démontré que :

1. pour un élancement extrêmement élevé ($L/h > 30$) les modèles de Timoshenko et Bernoulli conduisent aux mêmes résultats.
2. l'estimation du module élastique la plus proche du module statique est celle obtenue par le modèle de Bernoulli.

3. si l'on s'intéresse, en plus du module d'élasticité à l'estimation du module de cisaillement ou si l'on considère les harmoniques de rangs élevés, l'utilisation du modèle de Timoshenko s'impose.
4. si l'estimation du module d'élasticité est faite à partir des premières harmoniques, le modèle de Bernoulli est le mieux adapté quel que soit $L/h \geq 20$.

Compte tenu de l'objectif de cette étude sur la qualité du bois et de la taille des éprouvettes (360*20*20 mm) le modèle de Bernoulli semble le mieux adapté. En effet le module de cisaillement n'étant pas compris dans le protocole de travail, les deux premières harmoniques ont été utilisées. De plus l'estimation du module de cisaillement à partir des harmoniques de rangs (5 et 6) élevés est plus précise. Elle reste cependant équivalente à celle obtenue à partir des harmoniques de rang 1 et 2. C'est ainsi que l'option de la formulation de Bernoulli a été prise.

Quant à la réalisation des mesures, le matériel suivant a servi :

- des baguettes de bois (éprouvette de 360*20*20 mm)
- un marteau permettant d'appliquer un choc à l'une des extrémités de l'éprouvette ;
- un accéléromètre B&K 4344, fixé sur la poutre au moyen de cire d'abeille (utilisable jusqu'à 40°C et ne modifiant quasiment pas la fréquence de résonance de l'accéléromètre)
- un analyseur (OROS OR25) de signal permettant de visualiser l'excitation et la réponse de la structure
- un dispositif constitué de deux élastiques permettant de maintenir les éprouvettes.
- un ordinateur pour visualiser et stocker les signaux

La procédure est telle que l'accéléromètre est fixé à l'extrémité opposée à celle où est appliquée la percussion. La réponse à l'excitation est transmise par l'accéléromètre à l'analyseur qui déclenche automatiquement l'enregistrement des signaux délivrés. Il transmet ensuite les signaux à l'ordinateur après un calcul par la Transformée de Fourier (FFT). On obtient de manière quasi-instantanée leur représentation dans la plage de fréquence. Chaque harmonique et sa fréquence représentent un mouvement propre de la poutre (Figure 2.4).

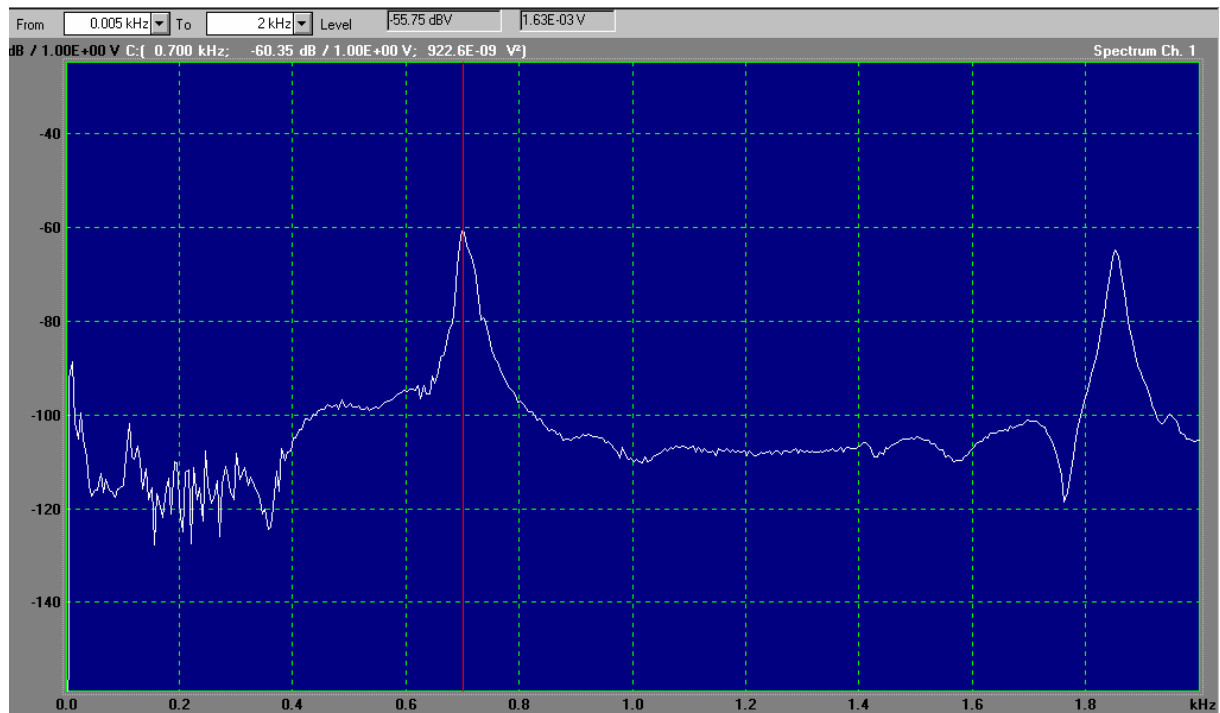


Figure 2.4 : Spectres d'un mouvement de flexion réalisé avec une éprouvette d'Okoumé.

II-42 Stabilité dimensionnelle

II-42.1 Matériel végétal

L'évaluation de la rétractibilité est effectuée sur 49 arbres à partir desquels 261 éprouvettes ont été façonnées et utilisées effectivement (Tableau 2.4). Quelle que soit la provenance du bois, les retraits linéaires [radial (R%), tangentiel (T%) et longitudinal (L%)], le retrait volumique (B%) et le point de saturation des fibres (PSF) ont été mesurés. Des éprouvettes cubiques de 20 mm d'arête ont été prélevées sur un bout de certains échantillons de type **B** utilisés précédemment pour déterminer la masse volumique et E_L . Sur chaque face une marque indélébile a été faite pour pouvoir réaliser les relevés aux mêmes endroits. Afin de minimiser l'influence du bois proche de la moelle, les cernes adjacents n'ont pas été pris en compte (Guitard 1987). De ce fait, l'évaluation des paramètres de stabilité dimensionnelle a commencé à partir de l'âge cambial 5 ans. Les opérations du retrait longitudinal total ont été exclusivement réalisées en plantations pour la détermination de la limite BJ/BA.

	Arbre			Eprouvette		
	Site	Ecosystème	Ecologie	Site	Ecosystème	Ecologie
Bokoué	12	-	-	57	-	-
M'Voum	11	-	-	76	-	-
Cocobeach	10	-	-	48	-	-
Ndjolé	10	-	-	53	-	-
Mitzic	6	-	-	27	-	-
Plantation	-	23	-	-	133	-
Forêt naturelle	-	26	-	-	128	-
Zone A	-	-	6	-	-	27
Zone B	-	-	43	-	-	234
Total	49	49	49	261	261	261

Tableau 2.4 : Quantification des arbres et éprouvettes pour l'évaluation de la stabilité dimensionnelle en fonction de la provenance.

II-42.2 Méthode (stabilité)

Les éprouvettes sont placées à différentes ambiances de température et d'humidité relative jusqu'à l'obtention d'une masse constante pour chaque éprouvette et à chaque étape (incertitude de la balance égale à 10^{-2} g). Ce résultat conduit à mesurer les arrêts de chaque cube à l'aide d'un pied à coulisse à lecture digitale (incertitude égale à 10^{-2} mm). Afin de mesurer le retrait linéaire et de déterminer le point de saturation des fibres (PSF), quatre ambiances ont été utilisées dans le but d'atteindre quatre humidités théoriques d'équilibre du bois. Les éprouvettes ont été successivement placées dans :

- un autoclave, 1 heure de vide et un trempage dans de l'eau sous une pression de 4 bars durant 24 heures : c'est l'état saturé ;
- une pièce climatisée à 20°C et 65% d'humidité relative, pour atteindre une humidité d'équilibre théorique du bois à 12%.
- une étuve à 20°C et 30% d'humidité relative, conduisant à une humidité d'équilibre théorique du bois à 6%.
- une étuve à $103 \pm 2^\circ\text{C}$, pour amener le bois à l'état anhydre.

L'humidité (H_i) de stabilisation est évaluée à chaque état (i) en comparant la masse (M_{Hi}) de chaque éprouvette par la masse anhydre (M_0) correspondante selon la formule : $H_i = (M_{Hi} - M_0) / M_0$.

L'anisotropie du bois conduit à considérer les trois directions du plan ligneux : tangentielle, radiale et longitudinale. La dernière citée est généralement écartée pour ses faibles valeurs de retrait (0,1 à 0,3 %), mais elle reste une grandeur notable pour caractériser la limite entre le bois juvénile et le bois adulte et quand elle est supérieure à 1 % pour les assemblages.

A partir des mesures au pied à coulisse, nous avons évalué les variations des dimensions entre l'état saturé et les 3 autres humidités d'intérêts dont 2 retraits intermédiaires ($\alpha_1 = H_{\text{sat}} - H_{12}$ et $\alpha_2 = H_{\text{sat}} - H_6$) et le retrait total ($\alpha_{\text{Total}} = H_{\text{sat}} - H_{\text{anhydre}}$).

Les variations dimensionnelles évoluent linéairement avec la teneur en eau dans le bois (Guitard 1987). Le PSF représente la valeur d'humidité au-dessus de laquelle le bois ne travaille plus. Il peut être déterminé numériquement à partir des 3 valeurs de retrait mesurées par rapport à l'état saturé puisqu'il correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite de régression linéaire entre l'humidité du bois et la variation dimensionnelle (figure 2.5).

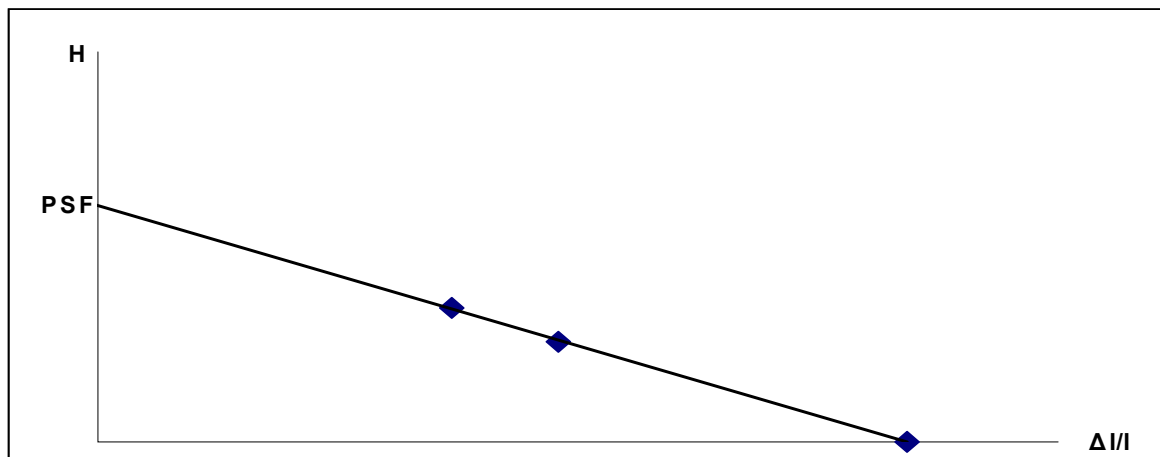


Figure 2.5 : Détermination linéaire du Point de Saturation des Fibres. L'équation peut s'écrire : $Y = ax + b$ ($x =$ dimension de l'éprouvette à l'humidité H_i). Si $x = 0$ alors $Y = b = \text{PSF}$ (ordonnée à l'origine).

II-5 Durabilité naturelle

II-51 Matériel végétal

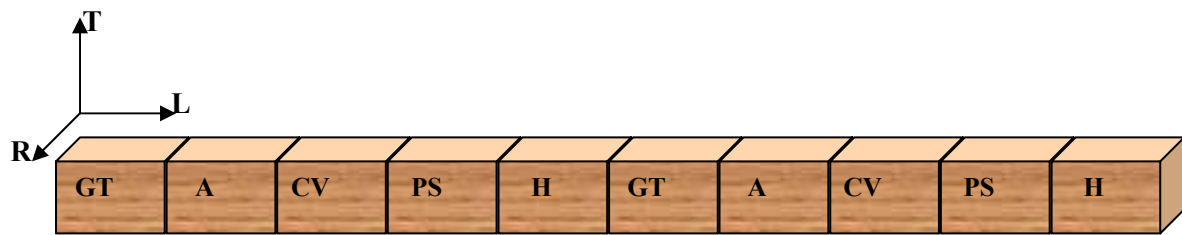
II-51.1 Matériel bois

L'évaluation du comportement du bois d'Okoumé vis-à-vis des champignons a été réalisée sur 54 arbres dont la provenance a été spécifiée plus haut. Seul le bois duraminisé a été exposé aux agents de dégradation ; l'aubier étant considéré comme non durable (norme EN 350). Les arbres ont été divisés en deux lots :

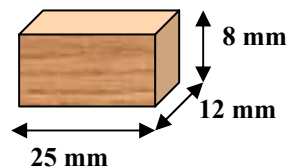
1. Lot intra-arbre constitué de 23 individus qui a servi à évaluer la durabilité naturelle de l'Okoumé dans l'arbre le long d'un gradient horizontal, partant de la moelle vers la périphérie.
2. Lot inter-arbre composé de 54 arbres dont le test de durabilité a été effectué exclusivement sur le duramen externe de chaque arbre.

II-51.11 Découpe des éprouvettes

Les éprouvettes destinées à la réalisation des tests de durabilité naturelle ont été façonnées à partir des éprouvettes préalablement utilisées pour des tests de densité et du module d'élasticité longitudinal. Le façonnage est fait selon le plan matériel longitudinal-radial-tangentiel (L*R*T) aux dimensions 25*12*8 mm (Figure 2.6). Sur chaque baguette d'intérêt, les éprouvettes sont coupées en double pour chaque champignon.



GT = *Gloeophyllum trabeum*
 A = *Antrodia sp*
 CV = *Coriolus versicolor*
 PS = *Pycnoporus sanguineus*
 H = Humidité



Dimensions d'une éprouvette

Figure 2.6 : Découpe et affectation des éprouvettes suivant les champignons

A partir de la découpe (Figure 2.6), une répartition des éprouvettes a été effectuée en fonction des champignons et de la provenance (Tableau 2.5). Ce tableau fait également état des éprouvettes de l'essence de référence ou témoin (Hêtre) et celles utilisées pour mesurer l'humidité. En tout 1451 éprouvettes ont effectivement été utilisées (1404 pour l'Okoumé et 47 pour le Hêtre).

Site	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	<i>Antrodia spp</i>	<i>Coriolus versicolor</i>	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	Humidité (H)
Bokoué	57	58	57	60	288
M'Voum	68	68	70	71	
Cocobeach	56	57	54	59	
Ndjolé	60	60	60	60	
Mitzié	30	36	34	35	
Hêtre	10	8	8	9	12
Total	287	287	283	294	300

Tableau 2.5 : Répartition des éprouvettes affectées pour l'évaluation de la durabilité naturelle et l'humidité

L'humidité est évaluée sur des éprouvettes (**H**) (Tableau 2.5). On mesure la masse stabilisée (**m₁₂**) initiale de l'éprouvette à 12 %. On la passe ensuite à l'étuve à 103°C jusqu'à masse constante, pour obtenir sa masse anhydre (**m_a**). L'humidité de chaque éprouvette est calculée en exprimant sa teneur en eau (**m₁₂ - m_a**) en pourcentage de sa masse sèche [**H= (m₁₂ - m_a)/ m_a**]. Les différentes masses obtenues pour le calcul de l'humidité ont servi au calcul d'un coefficient de correction **K**. Ce dernier est le rapport entre la masse à 12 % de l'éprouvette (**H**) et sa masse anhydre à 103°C. Il sera utilisé pour l'estimation de la masse anhydre supposée de l'échantillon avant l'attaque du champignon. Il est à noter que le calcul de l'humidité est fait pour chaque baguette ; il en est de même pour le calcul de **K** obtenu selon la formule :

$$K = \frac{m_a}{m_{12}}$$

II-51.2 Agents de dégradation

Quatre champignons lignivores de types pourriture ont été utilisés. Les souches fongiques ont été fournies par le CIRAD-Forêt. Il s'agit :

- *Gloeophyllum trabeum* (BAM Ebw. 109) pourriture cubique des zones tempérées,
- *Coriolus versicolor* (CTB 863-A) pourriture fibreuse des zones tempérées,
- *Antrodia sp* (souche 57A) pourriture cubique des zones tropicales,
- *Pycnoporus sanguineus* (souche 270) pourriture fibreuse des zones tropicales.

II-51.3 Milieu de culture et récipients utilisés

Les cultures fongiques sont faites dans un milieu eau-malt-agar. A cet effet de l'eau distillée et un mélange (poudre) malt-agar d'origine industrielle (Difco) qui respecte les proportions recommandées par la norme EN 350-1, soit deux volumes de malt pour un volume d'agar, ont été utilisés. Des boîtes de pétri rondes de 145 mm de diamètre pour 20 mm de hauteur ont servi de récipients.

II-52 Méthode (duabilité)

II-52.1 Evaluation de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores

La mesure de la durabilité est réalisée selon un protocole expérimental inspiré de la norme EN 350-1. La méthode d'acquisition rapide de résultats (Gartner *et al.* 1999, Belalia 2006) en suivant les étapes recommandées par la norme EN 350-1 a été pratiquée.

Une fois le façonnage des éprouvettes réalisé, l'exécution des étapes consécutives s'est déroulée chronologiquement comme suit :

- stabiliser les éprouvettes préalablement numérotées dans une enceinte climatique à 20°C et à 65% d'humidité relative,
- préparer le milieu de culture en mettant dans un erlenmeyer contenant un litre d'eau distillée 45 g du mélange malt-agar (Difco). Placer l'erlenmeyer dans un autoclave à 121°C pendant 20 minutes ; temps nécessaire pour homogénéiser et stériliser le mélange,
- mettre le milieu de culture dans les boîtes de pétri à l'aide d'une pipette jusqu'à 4 mm de hauteur puis les laisser ouvertes afin que le milieu refroidisse et se solidifie (environ 3 à 4 heures) sous la hotte à flux laminaire horizontal dans le souci d'éviter toute contamination éventuelle,
- inoculer les milieux de culture par des fragments de culture de champignon de moins de trois semaines. Cette opération se fait également sous la hotte à flux laminaire horizontal. Les manipulations s'effectuent à l'aide d'une spatule en inox sans cesse passée sous la flamme d'un bec Bensen. Après l'inoculation les boîtes sont recouvertes et scellées avec du parafilm,
- entreposer les boîtes de pétri dans une pièce conditionnée (25°C et 75% d'humidité relative) pendant environ 15 jours. Ce délai est nécessaire pour que le mycélium inoculé, pousse et recouvre entièrement la surface du milieu de culture,
- peser les éprouvettes stabilisées pour avoir la masse initiale avant l'essai (**P_i**),
- irradier les éprouvettes aux rayons ultra-violet (UV) pendant une heure en raison de 30 minutes par plan tangentiel,
- exposer les éprouvettes de bois aux champignons cultivés. Cette étape se fait toujours sous la hotte donc en milieu stérile. Placer quatre éprouvettes par boîte de pétri à l'aide d'une pince saine, au contact direct avec le champignon,
- replacer les boîtes de pétri dans la pièce conditionnée (25°C et 75%). L'exposition des éprouvettes aux champignons a duré 9 semaines,
- au terme des 9 semaines (figures 2.7) d'exposition, retirer les éprouvettes des boîtes de pétri et les débarrasser soigneusement du mycélium adhérent à l'aide d'une brosse à dents,
- peser les éprouvettes de suite pour avoir la masse humide après l'essai (**P_h**),

- sécher les éprouvettes dans une étuve ($103 \pm 2^\circ$) pendant 48 heures jusqu'à masse constante,
- peser les éprouvettes anhydres pour obtenir la masse anhydre finale (P_f) de l'essai,
- calculer l'humidité (H_f) de chaque éprouvette en fin d'essai en exprimant sa teneur en eau ($P_h - P_f$) en pourcentage de sa masse sèche [$H_f = (P_h - P_f)/P_f$] et rejeter les éprouvettes ayant (H_f) <25 %,
 - calculer la perte de masse absolue (P_M) exprimée en pourcentage de masse anhydre initiale [$P_M = (P_s - P_f)/P_s$], avec :
 - P_f est la masse anhydre réelle de l'éprouvette mesurée après l'attaque du champignon,
 - $P_s = K * P_i$, est la masse anhydre supposée de l'échantillon avant l'attaque du champignon,
 - P_i est la masse de l'éprouvette réellement mesurée avant le début de l'essai (humidité de l'éprouvette à 12 %),
 - K est un coefficient de correction obtenu en rapportant la masse à 12% (m_{12}) d'une éprouvette « H » (tableau 2.5) à sa masse anhydre à 103°C (m_a). Il a été calculé sur 300 éprouvettes indiquées au tableau 2.5 (288 pour Okoumé et 12 pour Hêtre).
- calculer la perte de masse relative (X) qui est la perte de masse absolue mesurée sur les éprouvettes d'Okoumé rapportée à la perte de masse absolue observée sur les éprouvettes du Hêtre.

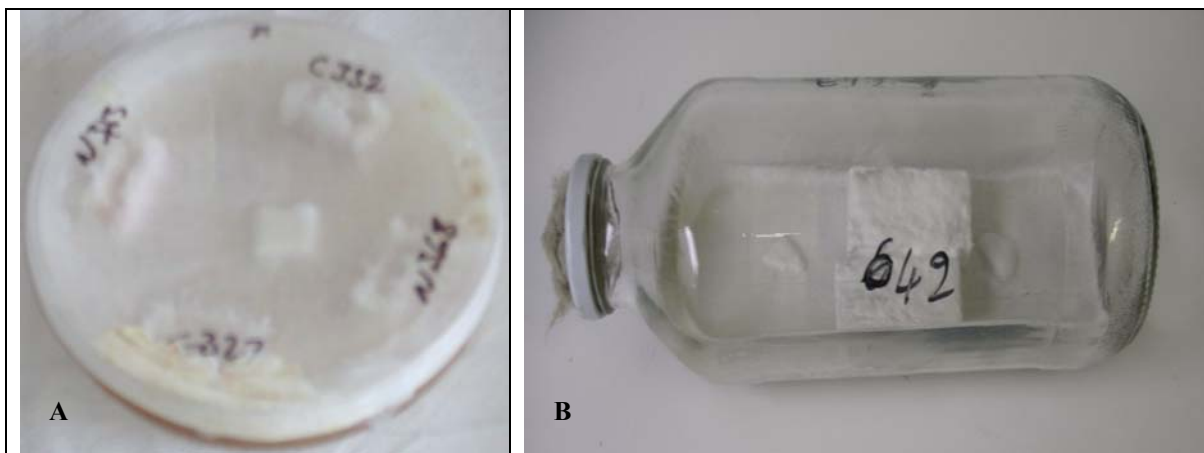


Figure 2.7 : Eprouvettes recouvertes par le champignon. A) 4 éprouvettes d'Okoumé exposées au champignon dans une boîte de pétri. B) 2 éprouvettes d'Okoumé exposées dans un flacon selon la norme EN 350. Les numéros des éprouvettes sont reproduits sur les récipients pour minimiser l'action éventuelle de l'agent de dégradation sur les parties de bois numérotées.

II-52.2 Validité des résultats : test de virulence des souches utilisées

Les résultats de tests de durabilité naturelle sont dits valides, pour un champignon donné, si les pertes de masse observées sur les éprouvettes de l'essence de référence ou témoin (Hêtre pour les feuillus) sont supérieures ou égales à des valeurs prédéfinies par la norme EN 350 (tableau 2.6). A cet effet, la durabilité de 35 éprouvettes de référence a été mesurée sur les 4 souches fongiques d'intérêt (tableau 2.5). Les échantillons témoins ont été soumis à l'attaque des champignons en même temps que les éprouvettes d'Okoumé selon la méthodologie présentée ci-dessus. La norme EN 350 recommande une perte de masse absolue minimale de 20% pour qu'une souche soit déclarée virulente et le test est alors validé. Dans le cadre du présent travail, un test unique pour les deux lots (intra et inter) a été effectué. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.6.

Champignon	N° de souche	Perte de masse observée ($\bar{x} \pm \sigma_x$)	Perte de masse minimale préconisée par EN 350	Observation sur la souche
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	67D	23,92% ± 3,49%	20%	Virulente
<i>Coriolus versicolor</i>	8A	32,52% ± 2,25%	20%	Virulente
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	270	40,32% ± 6,60%	20%	Virulente
<i>Antrodia sp</i>	57A	31,19 ± 3,01%	20%	Virulente

Tableau 2.6 : Données attestant de la nature des souches utilisées

Les valeurs de perte de masse obtenues sur l'essence de référence (Hêtre) pour chaque champignon attestent de la virulence des différentes souches utilisées (Tableau 2.6). Ces résultats valident par conséquent chacun des tests réalisés ce qui renforce la crédibilité du fournisseur (CIRAD).

II-52.3 Calcul d'incertitude expérimentale sur les pertes de masse

L'incertitude expérimentale de la mesure peut être estimée à partir de la formule de la perte de masse, ce qui donne :

$$P_M = \frac{(P_S - P_f)}{P_S}$$

$$P_M = 1 - [P_f/P_S] \quad \text{or } P_S = K \times P_i$$

$$\Rightarrow P_M = 1 - [P_f/KP_i]$$

Considérons A le rapport P_f/KP_i , le calcul classique de l'incertitude nous donne :

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta P_f}{P_f} + \frac{\Delta P_i}{P_i} + \frac{\Delta K}{K}$$

L'incertitude sur la pesée d'une éprouvette est de 0,01g soit 10^{-2} g. Les résultats expérimentaux obtenus sont en revanche pour le lot intra-arbre $K = 0,880 \pm 0,0105$ soit $\Delta K/K = 0,0119$ et pour le lot inter-arbre : $K = 0,880 \pm 0,0106$ soit $\Delta K/K = 0,0120$. Nous avons ainsi trouvé quel que soit le lot d'arbres testés une incertitude expérimentale sur la mesure de la perte de masse de 3%

II-52.4 Estimation de la masse anhydre théorique des éprouvettes avant l'essai

Certaines éprouvettes ont présenté une masse anhydre (P_f) supérieure à la masse anhydre initiale estimée ($P_s = K \cdot P_i$) entraînant ainsi des pertes de masse négatives. Cela ne se produit que chez les éprouvettes qui ont présenté une très faible perte de masse. Une éprouvette de l'arbre (N2) qui avait une perte de masse supérieure à l'incertitude expérimentale a été éliminée. La norme admet que ces pertes de masse négatives, dans le cas acceptable, soient considérées comme nulles. Cependant, les valeurs de perte de masse obtenues ont été conservées en l'état ; de peur d'introduire un biais (une donnée qui peut influencer fortement l'interprétation des résultats obtenus).

II-6 Démarcation du bois juvénile (BJ) du bois adulte (BA)

Pour la détermination de la limite entre bois juvénile et bois adulte, les caractéristiques anatomiques, physiques et mécaniques précédemment décrites ont été mises en relation avec l'âge cambial. En outre, il a été utilisé des paramètres, tels que la longueur des fibres, le retrait total longitudinal et le diamètre des vaisseaux qui sont des caractères du bois juvénile chez les feuillus peu sensibles à l'effet de largeur de cerne (Nepveu 1994). Les matériels et les méthodes de mesures des diamètres des vaisseaux et du retrait total longitudinal sont décrits respectivement aux paragraphes (II-3) et (II-52) du présent chapitre.

II-61 Evaluation des fibres

Un procédé réalisé par Association Forêt Cellulose (AFOCEL) a été utilisé. Ce procédé est très voisin de la procédure mise au point par Normand (1972). L'évaluation des fibres s'est déroulée en deux étapes : la récupération des fibres en premier et l'analyse des caractéristiques morphologiques en second.

On s'est intéressé particulièrement à la longueur et la largeur de fibres en suivant une progression radiale de la moelle à la périphérie du bois (Medzegue 2007).

II-61.1 Matériel

II-61.11 Matériel végétal

Dix Okoumé ont servi à la réalisation de cette opération : 5 arbres de Bokoué et 5 arbres de M'Voum. Les arbres qui ont servi ont 41 ans d'âge cambial et 43 ans d'âge calendaire. Des blocs de bois (Figure 2.8a) de dimensions 20 mm axial x 50 mm tangentiel et de dimension radiale variant selon le diamètre de l'arbre d'intérêt ont été utilisés. Chaque cerne est tiré du bloc à l'aide d'une scie à chantourner (Figure 2.8b) et taillé en bûchettes de 1 mm environ à l'aide d'un cutter (Figure 2.8c). L'effort a été fait afin de suivre au mieux les contours des fibres pour éviter de les casser. Les bûchettes sont ensuite transformées en pâte (Figure 2.8d). Tous les individus analysés n'avaient pas la même limite duramen-aubier à âge cambial fixé, bien qu'ayant le même âge calendaire. Ceci est certainement une cause ou/et une conséquence de l'hétérogénéité du matériau bois.

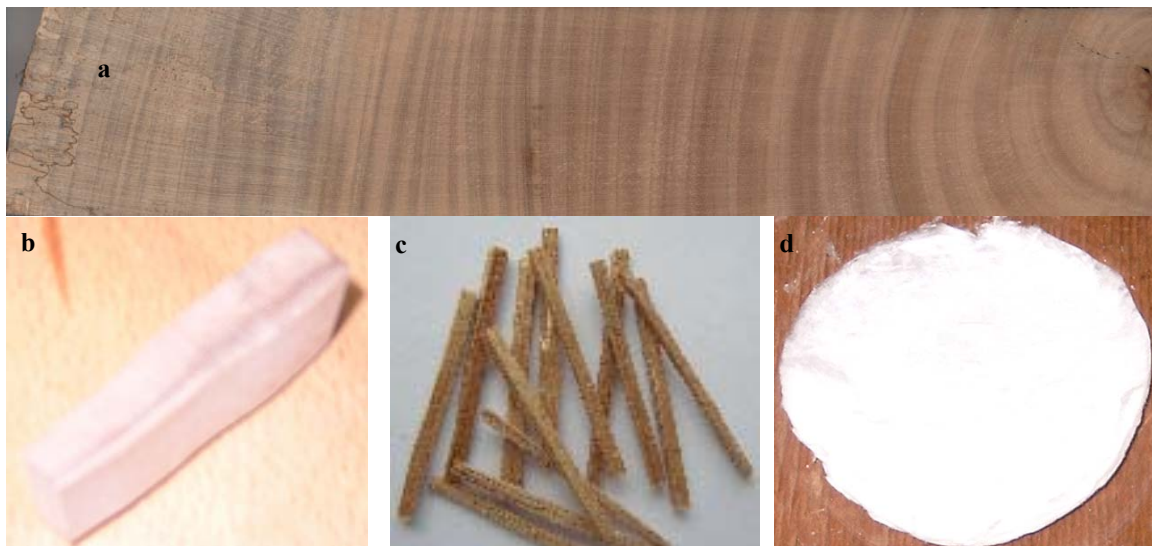


Figure 2.8 : Etapes successives pour l'obtention de la pâte (a = bloc de bois poncé, b = cerne individualisé, c = bûchettes et d = pâte).

II-61.12 Appareillage d'analyse de fibres

L'analyse de fibres a été réalisée à l'Institut de Pin (une composante de l'USBB). Les caractéristiques morphologiques des fibres ont été déterminées à l'analyseur MorFi labo LB-01 (Figure 2.9). C'est un système de mesure composé d'un appareil photo et d'un logiciel d'analyse d'images pour mesurer automatiquement les caractéristiques morphologiques des fibres en suspension. Ce système est connecté à un ordinateur, permettant la visualisation de la synthèse des caractères morphologiques des fibres. L'appareil est calibré par défaut pour une analyse de pâte d'environ 0,4 mg de matière sèche pour 100 mg de matière humide.



Figure 2.9 : Analyseur MorFi LB-01

L'appareillage MorFi LB01 considère comme fibre, tout élément correspondant aux propriétés morphologiques et mensurations comprises entre :

$$200 \mu\text{m} < \text{longueur fibre} < 10 \text{ mm}$$

$$5 \mu\text{m} < \text{largeur fibre} < 75 \mu\text{m}$$

II-61.2 Méthode (fibre)

II-61.21 Récupération des fibres

L'évaluation des fibres est faite par provenance à âge cambial fixé, c'est-à-dire que quels que soient l'arbre et le type de bois (duramen ou aubier, de saison sèche ou de saison humide), il est fait un mélange de bûchettes par âge cambial. On a introduit 4 g de bois (bûchettes) séchés à l'air dans un ballon de 250 mL contenant un barreau aimanté. On y ajoute 50 mL d'acide acétique (CH_3COOH) et 50 mL de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) afin de procéder au blanchiment du matériau lignocellulosique. Le ballon trempé dans un bain d'huile à 75°C est relié à un réfrigérant, le tout porté par un agitateur chauffant. Au bout de 5h30mn pour le duramen et environ 3 heures pour l'aubier, une suspension est récupérée. Cette dernière est doublement filtrée à l'aide d'un creuset fritté (n°3), donnant une pâte qui est abondamment rincée à l'eau du robinet puis séchée à l'air pendant 3 heures (environ).

II-61.22 Analyse au MorFi

A partir de la pâte séchée le processus d'analyse au MorFi suit les étapes ci-après :

- ❖ Mettre la pâte en petits morceaux (dépiauter) et les répartir sur une surface de façon à prélever un échantillon représentatif pour l'analyse à faire,
- ❖ Déterminer la siccité M_s (masse sèche) de la pâte (**i**) à chaque analyse (masse sèche : M_{si}) en prenant au minimum 100 mg (matière humide). La siccité est le rapport entre la masse anhydre et la masse humide,
- ❖ Déterminer la masse de matière humide (M_{Hi}) de la pâte (**i**) nécessaire pour l'analyse, avec $M_{Hi} = (0,4*100)/M_{si}$,
- ❖ Tremper pendant 10 minutes à 1 heure la matière humide à analyser (M_{Hi}) selon qu'elle est sèche, dans de l'eau chaude pour reconditionner les fibres,
- ❖ Individualiser les fibres pendant environ une trentaine de secondes dans 250 mL d'eau froide (on ajoute de l'eau froide à ce qui a été trempé), à l'aide d'un mixer. Eviter que cette étape dure ; car il y a risque de cassure des fibres par les lames du mixer. On obtient ainsi une suspension,
- ❖ Ajouter de l'eau froide à la suspension jusqu'à obtention de 1 litre du mélange,
- ❖ Introduire les paramètres d'analyse (masse sèche, opérateur, identifiant de l'opération et la famille de l'opération),
- ❖ Verser la suspension préparée dans l'automate (réservoir prévu) en évitant de toucher les bords, puis mettre en marche et attendre le résultat qui est obtenu au bout de 6 minutes.

Nota : Il peut arriver (ceci est fréquent) de prendre une quantité de matière humide supérieure (M_{Hii}) à celle déterminée préalablement. Dans ce cas, on détermine la masse de matière sèche correspondante M_{Sii} . C'est cette dernière qui est prise en compte dans l'introduction des paramètres d'analyse. Elle est susceptible de changement tant que la masse humide varie, d'où $M_{Sin}=(M_{Si}*M_{Hii})/100$. Cependant il faut toujours avoir $M_{Hii} \geq M_{Hi}$ lors de la répétition (**n**) de l'analyse d'une pâte (**i**).

M_{si} : siccité (masse sèche) de la pâte (**i**)

M_{sin} :Masse sèche de la n^{ième} analyse (**n**≥1)

M_{Hi} : Masse humide initiale de la pâte (**i**)

M_{Hii} : Masse humide de la n^{ième} analyse (**n**≥1)

II-7 Analyses chimiques

Cette partie est divisée en deux. La première concerne la recherche des constituants dans le bois parfait. Compte tenu de la rareté des données disponibles dans la littérature, un inventaire exploratoire des composés majoritaires à faible poids moléculaire dans le bois d'Okoumé a été effectué. Les constituants pariétaux ont été dosés pour les arbres des plantations ; une étude relative à l'évaluation chimique de l'Okoumé en peuplement naturel a été menée parallèlement au sein du laboratoire. La deuxième partie a concerné l'isolement des composés α - et β -amyrynes contenus dans l'oléorésine, afin de voir s'ils peuvent contribuer à l'amélioration de la durabilité de l'Okoumé face aux champignons de type pourriture. De plus une analyse des composés volatils a été réalisée afin d'identifier également les substances potentiellement valorisables.

II-71 Appareillage et méthodes utilisés

Les produits organiques utilisés dans cette étude sont des produits commerciaux de grande pureté utilisés sans purification.

II-71.1 Espace de tête statique ou Headspace

C'est une technique préparatoire aux analyses de constituants volatils d'un échantillon liquide ou solide. Elle est utilisée ici pour la recherche de produits volatils dans le bois parfait et l'oléorésine de l'Okoumé. Un échantillon de 100 mg de résine brute broyée ou de sciure a été placé dans un flacon de headspace serti de contenance 50 mL. L'ensemble est chauffé dans un four à 100°C pendant 1 heure afin qu'un équilibre s'établisse entre la concentration des composés volatils dans la phase gazeuse et l'échantillon solide (Figure 2.10). Un prélèvement de 0,5 mL de la phase gazeuse est ensuite effectué à l'aide d'une seringue étanche de 1 mL, et est injecté rapidement en chromatographie en phase gazeuse pour déceler la présence des composés volatils dans l'échantillon.

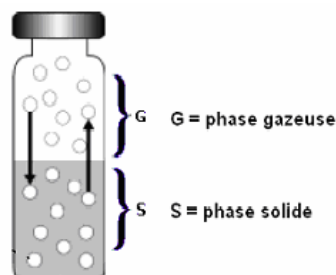


Figure 2.10 : Schéma d'un flacon de headspace montrant la recherche d'équilibre entre les phases gazeuses et solide (Kolb *et al.* 1997)

II-71.2 Extraction et opérations annexes

II-71.21 Extraction du bois d'Okoumé

De la sciure de bois de cœur broyée (granulométrie mesh 80) est placée dans une étuve à 105°C durant 15 heures, pour obtenir une masse sèche initiale (M_0). Cette poudre anhydre a été extraite au soxhlet successivement à l'aide d'un mélange toluène-éthanol 2/1 (v/v) pendant 8 heures puis à l'eau distillée durant 6 heures. Les solvants sont éliminés à l'aide d'un évaporateur rotatif et le résidu est placé dans un dessiccateur contenant de l'anhydride phosphorique (P_2O_5) pendant 24 heures sous vide (30 minutes). Cette procédure a été choisie pour éviter une réaction éventuelle des composés dans une étuve à 105°C pouvant entraîner un biais lors de l'évaluation des extractibles. Les masses obtenues respectivement suite à l'action des solvants organiques (M_{org}) et celle de l'eau (M_e) sont rapportées à la masse initiale de la sciure (M_0). Le taux d'extraits totaux (solvants organiques et eau) a été déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$ET = \frac{(M_0 - M_{01})}{M_0} \times 100$$

Où:

ET = extraits totaux

M_0 = masse anhydre de la sciure avant extraction

M_{01} = masse anhydre de la sciure après extraction et séchage à l'étuve à 105°C pendant 15 heures.

II-71.22 Dosage de la cellulose

L'extraction de la cellulose est réalisée à partir d'un protocole mis au point au Laboratoire, en deux phases complémentaires : obtention de l'holocellulose suivie du dosage de la cellulose :

- ❖ **Obtention de l'holocellulose** : on prépare une solution d'acétate de sodium (S_1) en mélangeant sous agitation magnétique de l'eau distillée (124 mL), de la soude (3,3 g) et de l'acide acétique glacial (10 g) puis une solution de chlorite de sodium à 10% (S_2) en dissolvant dans de l'eau distillée (50 mL) le chlorite de sodium (5 g), toujours sous agitation magnétique. Une fraction de la sciure précédemment extraite séchée à 105°C pendant 15 heures (5 g représentant la masse sèche de la sciure M_s) est introduite dans un ballon à trois tubulures (250 mL) contenant un barreau aimanté. On y ajoute lentement la totalité de la solution (S_1) puis un sixième de la solution (S_2) soit 8,33 mL ; le chauffage est porté à 75°C sous agitation.

Le reste de la solution (S_2) est additionné par sixième toutes les heures. L'opération dure 6 heures, le ballon restant trempé dans un bain marie. La sciure délignifiée est filtrée sous vide à l'aide d'un creuset fritté n°2 taré, lavée avec de l'eau distillée (1500 mL) puis avec de l'acétone (deux fois 100 mL) avec un contact de 20 à 25 minutes avec l'holocellulose. Le creuset est mis à l'étuve à 105°C. Le pourcentage en holocellulose est obtenu en rapportant sa masse sèche (M_{hol-s}) à la masse de sciure sèche (M_s).

- ❖ **Obtention de la cellulose** on introduit l'holocellulose précédemment obtenue dans un ballon à trois tubulures en y ajoutant une solution à base d'eau distillée (117 mL) contenant 8% de NaOH (9,43 g) et 1% de tétraborate de sodium (1,18 g). L'ensemble est maintenu sous agitation magnétique à température ambiante durant 16 heures. Au bout de ce temps, le contenu du ballon est filtré sur creuset fritté n°2 et lavé abondamment à l'eau distillée et à l'acétone comme précédemment pour l'holocellulose. La cellulose ainsi obtenue est d'abord séchée sous vide pendant une heure puis à l'étuve à 105°C pendant 15 heures ; on obtient la masse sèche de la cellulose (M_{cell-s}). Sa proportion est calculée selon la relation :

$$Cell = \frac{(M_{cell-s})}{M_s} \times 100$$

Cell = taux de cellulose dans le bois

M_s = masse sèche de la sciure

M_{cell-s} = masse anhydre de la cellulose

II-71.23 Dosage de la lignine Klason

La teneur en lignine Klason a été mesurée par la méthode Tappi T222 om-83. Cette technique implique deux phases distinctes :

- 1) Une hydrolyse avec de l'acide sulfurique à 72% pendant 2 heures à 20°C.
- 2) Une hydrolyse avec de l'acide sulfurique à 3% au reflux durant 4 heures.

Le résidu insoluble obtenu après filtration sur creuset fritté n°2 (lignine Klason) est lavé à l'eau distillée (1500 mL) puis à l'acétone (200 mL) et enfin séché à 105°C pendant 15 heures.

Le taux de lignine Klason est exprimé en pourcentage de bois anhydre (sciure).

II-71.3 Extraction de l'oléorésine

II-71.31 Hydrodistillation

Cette opération a permis de récupérer l'huile essentielle et de débarrasser l'oléorésine des corps étrangers (écorces, poussières, etc.). L'obtention de l'essence de l'oléorésine a été réalisée par la technique d'entraînement à la vapeur qui consiste à entraîner les composés volatils de l'oléorésine par de la vapeur d'eau. On isole l'essence dont la composition a été déterminée par chromatographie. Expérimentalement, l'oléorésine (50 g) est introduite dans un ballon contenant de l'eau distillée (750 mL) portée à 140°C. Le distillat est récupéré jusqu'à ce qu'il n'apparaisse plus de traces d'huile.

II-71.32 Extraction au soxhlet

La même procédure que pour le bois de cœur a été mise en œuvre mais en utilisant du cyclohexane comme solvant. L'extraction a été réalisée sur l'oléorésine après séparation de l'essence par hydrodistillation.

II-71.4 Séparation sur colonne ouverte

Une colonne de silice a été utilisée dans le but de séparer les constituants du bois ou de l'oléorésine en fonction de leur migration dans la colonne. Cette dernière a un diamètre de 30 mm avec une capacité de 500 mL, dans laquelle on a introduit 100 g de silice. La colonne est mouillée au cyclohexane puis éluee avec un mélange cyclohexane-acétate d'éthyle. En tête de colonne on a introduit 3 g d'extraits toluène/éthanol pour le bois de cœur et 13 g d'oléorésine pure (sans essence ni impuretés).

II-71.5 Chromatographie analytique et préparative sur couche mince (CCM)

- ❖ Plaque CCM analytique : gel de silice 60 F₂₅₄ Merck sur feuille d'aluminium (indicateur fluorescent 254 nm), épaisseur 0,2 mm. La révélation des plaques est effectuée à la vapeur d'iode,
- ❖ Plaque CCM préparative : silice G2 (épaisseur 2 mm, dimension 10 x 5 cm) déposée sur plaque de verre. La révélation des plaques est effectuée à l'aide d'une solution de KMnO₄ (pulvérisateur).

II-71.6 Chromatographie en phase gazeuse (GC)

La GC consiste à séparer les différents constituants d'un corps en fonction des différentes interactions entre deux phases non-miscibles dont la phase mobile (gazeuse) se déplace au contact de la phase stationnaire (liquide immobilisé) en entraînant les composés à séparer. Les composés sont élués à des temps de rétention différents. La GC a été réalisée sur un appareil HP 5890 Series II caractérisé par :

- ❖ une colonne de 15 m de long, 0,25 mm de diamètre, avec 5% de phénylméthylsiloxane d'épaisseur 0,25 μm ,
- ❖ les conditions chromatographiques sont : injecteur à 210°C, détecteur à 230°C, gaz vecteur hélium, débit 0,8 mL/mn et l'appareil est en mode split.

Les conditions opératoires sont : four à 40°C pendant 5 minutes puis montée à 120°C à raison de 3°C/mn suivi d'un maintien à 120°C pendant 10 minutes.

Les extraits toluène/éthanol de bois de cœur d'une dizaine d'arbres dont six de M'Voum (V6, V8, V9, V10, V13 et V14) et 4 de Bokoué (B4, B7, B10 et B13) ont été analysés en chromatographie en phase gazeuse. On a analysé uniquement la fraction d'extraits solubles dans le dichlorométhane.

II-71.7 Chromatographie en phase gazeuse couplée avec un spectromètre de masse (GC-MS)

Le couplage GC-MS est une méthode analytique complémentaire qui fournit les spectres de masse des composés élués par la colonne. Ces derniers subissent une ionisation électrique (70 eV). Les ions obtenus sont séparés dans un quadripôle selon leur rapport m/z et détectés par une dynode. Le balayage de masse a lieu en continu. Les composés sont ensuite identifiés à l'aide d'une bibliothèque spectrale (NIST) intégrée. L'examen par GC-MS a été effectué sur deux appareils différents :

1°) L'appareil HP G1800C, GCD Series II utilisé pour l'examen des composés volatils de l'oléorésine, présente les caractéristiques suivantes :

- ❖ colonne capillaire : 30 m de long ; 0,25 mm de diamètre interne; phase stationnaire 5% phénylméthylsiloxane, 0,25 μm d'épaisseur,
- ❖ conditions chromatographiques : injecteur à 210°C, ligne de transfert à 230°C, gaz vecteur hélium dont débit à 0,8 mL/mn. L'appareil est en mode split.

Les conditions opératoires sont : four à 40°C pendant 5 minutes puis montée à 60°C à raison de 3°C/mn, la température est maintenue à 60°C pendant 5 minutes puis montée à 180°C à raison de 5°C/mn et maintien à 180°C pendant 10 minutes.

2°) L'appareil Thermo Finnigan Trace GC Ultra/Trace DSQ utilisé pour l'analyse des composés du bois de cœur. Les produits analysés sont introduits grâce à un injecteur PTV (Programmed Temperature Vaporizer). Un système de chauffage intégré permet de faire varier la température du PTV d'une valeur minimale à maximale, ce qui permet l'injection avec division, sans division et l'élimination de solvants (Tranchant *et al.* 1995). Les caractéristiques de cet appareil sont :

- ❖ colonne capillaire : longueur 15 m, diamètre 0,25 mm, phase stationnaire 5% phénylméthylsiloxane, 0,25 µm d'épaisseur,
- ❖ conditions chromatographiques : injecteur PTV, transfert sur colonne 30 kPa, gaz vecteur hélium à pression constante de 100 kPa. L'appareil est en mode splitless.

Les conditions opératoires sont : four à 50°C pendant 6 minutes puis montée à 320°C à raison de 10°C/mn et maintien pendant 10 minutes.

Remarque : Pour la fiabilité des résultats donnés par la bibliothèque NIST, la méthode des ajouts a été utilisée. Une co-injection des composés identifiés et des produits de référence existant dans le commerce a été effectuée.

II-8 Action des amyriènes sur les champignons

Il est difficile de parler en ce moment des amyriènes comme biocide. Le comportement de ce composé que l'on trouve majoritairement dans l'oléorésine et en état de traces dans le bois de cœur d'Okoumé, face aux champignons a été testé pour voir son impact sur le développement des souches fongiques. L'évaluation est réalisée sur *Coriolus versicolor* et *Antrodia sp*, qui sont les champignons ayant causé le plus de perte de masse sur le bois d'Okoumé. Les composés ont été dissous dans le THF (tétrahydrofurane). Ce test a été effectué à partir des spores des souches d'intérêt ; on a cherché à attaquer le champignon depuis sa semence. Cette opération s'est déroulée en trois étapes qui se chevauchent :

- ❖ Etape 1 : consiste à l'activation des souches fongiques,
- ❖ Etape 2 : consiste à la récupération des spores par l'entremise de l'eau physiologique,
- ❖ Etape 3 : est relative à la mise en confrontation des spores et d'amyriènes.

II-81 Activation des souches fongiques

Les champignons *Coriolus versicolor* (CTB 863-A) et *Antrodia sp* (souche 57A) de type pourriture qui ont précédemment servi à l'évaluation de la durabilité naturelle de l'Okoumé, ont été utilisés. Les manipulations consécutives à cette étape se sont déroulées chronologiquement comme suit :

- préparer le milieu de culture eau distillée-malt-agar, soit 1 L d'eau pour 45 g de mélange malt-agar (Difco) qui est homogénéisé et stérilisé dans l'autoclave à 121°C durant 20 minutes. Les tubes à essai qui servent de contenant sont également stérilisés,
- remplir le tube à essai au tiers, le laisser refroidir incliné (côté opposé à l'angle relevé de 5 mm) pendant 3 heures environ,
- inoculer le milieu et couvrir le tube à essai,
- stocker les tubes à 25°C et 75% d'humidité relative afin de permettre l'incubation.

Remarque : Toutes les opérations qui ont suivies l'enlèvement des produits dans l'autoclave ont été effectuées sous la hotte à flux laminaire horizontal pour éviter toute contamination.

II-82 Prélèvement des spores

Les étapes se déroulent sous la hotte comme suit :

- préparer de l'eau physiologique en mélangeant 9 g NaCl dans 1000 mL d'eau distillée sous agitation magnétique,
- stériliser l'eau physiologique comme précédemment fait à l'étape 1,
- introduire à l'aide d'une pipette de l'eau physiologique (7 mL) dans le tube à essai. Agiter au moyen d'un agitateur vibrant (vortex) entraînant le brassage des spores. L'eau est ainsi contaminée de spores (solution S₁).

II-83 Evaluation de l'action des α - et β -amyrines sur les champignons

Cette étape est la conséquence des deux premières qui peuvent être qualifiées de préparatoires. Le protocole tenant à l'estimation de l'action des amyrines s'est déroulé comme suit :

- dissoudre l'amyrine dans le THF, pour obtenir la solution S₂ à différentes concentrations. Nous avons utilisé une gamme allant de 200 μ g pour un 1 mL à 1 mg pour 1 mL, avec un intervalle régulier de 200 μ g,

- mettre 5 mm de milieu de culture stérilisé par boîte de pétri aux dimensions 15 mm de haut et 90 mm de diamètre, puis laisser sécher durant 3 à 4 heures, sous la hotte,
- étaler délicatement 100 μL de solution S_1 (suspension de spores) et laisser sécher pendant 1 heure sous la hotte,
- étaler délicatement 1000 μL de solution S_2 , l'opération se déroulant toujours sous la hotte, laisser sécher pendant 1 heure puis couvrir et sceller les boîtes,
- stocker les boîtes dans l'étuve à 25°C et 75% d'humidité relative,
- les résultats sont relevés au bout de 4 semaines qui représente le délai maximum d'attente après inoculation du milieu avant exposition (norme EN 350). La figure 2.11 représente l'ordre d'introduction des produits dans les boîtes de pétri.

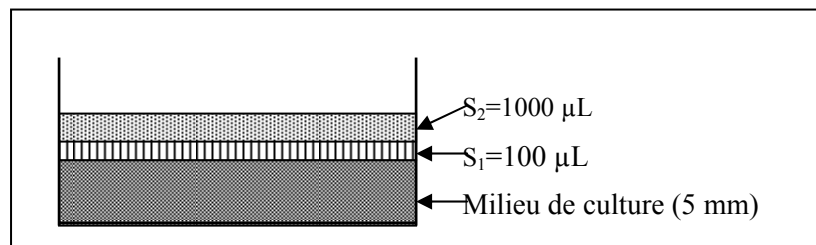


Figure 2.11 : Représentation schématique d'une boîte de pétri sans couvercle montrant l'agencement milieu de culture, suspension de spores (S_1) et les amyrynes en solution (S_2)

II-9 Méthode d'analyse statistique

La compilation des données a été faite suivant les paramètres à évaluer. Leur analyse a été réalisée au moyen du logiciel Minitab version 13 et la détermination de la limite entre bois juvénile et bois adulte a été effectuée à partir du programme SegReg.

Le plan d'échantillonnage adopté correspond à un modèle mixte d'analyse à cinq critères : âge cambial, site (5), position radiale dans l'arbre (3), écosystème (2) et zone écologique (2). Le grand nombre de données n'a pas toujours permis de faire une analyse en recourant au modèle linéaire généralisé. Nous avons décidé de faire une analyse de variance à un facteur en recherchant les interactions entre facteurs qui peuvent influencer le comportement d'une propriété. Pour les facteurs à deux entrées, le *test-T* a été réalisé.

Le programme SegReg (Oosterbahn R.J. 2005) a été utilisé pour effectuer une analyse de régression linéaire segmentée en mettant en relation les paramètres anatomiques, physico-mécaniques et la stabilité dimensionnelle avec l'âge cambial, pour estimer la limite d'âge

entre la formation du bois juvénile et celle du bois adulte. Le modèle consiste à trouver 2 régressions linéaires pour caractériser les paramètres des bois évalués en fonction de l'âge cambial. L'inflexion ou le point de cassure entre les deux segments est considérée comme l'âge de transition entre le bois juvénile et le bois adulte. Elle se définit par les équations (1) caractérisant le bois juvénile et (2) représentant le bois adulte.

$$Y = aX + b + \varepsilon \quad \text{avec } X_0 \leq X \quad (1)$$

$$Y = cX + d + \varepsilon \quad \text{avec } X_0 > X \quad (2)$$

où

Y est le caractère du bois évalué et mis en relation avec l'âge cambial,

X est l'âge cambial

a, b, c et d sont des constantes de régression

X_0 est l'inconnue. Elle est déterminée par une méthode itérative pour estimer le meilleur coefficient statistique du modèle incluant les 2 régressions par une méthode d'optimisation numérique.

Les valeurs moyennes utilisées pour présenter les résultats sont accompagnées du paramètre de dispersion écart type. En revanche les représentations graphiques sont réalisées avec des barres d'erreur type.

CHAPITRE III

RESULTATS

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents résultats obtenus en appliquant les méthodes de travail et en utilisant le matériel exposés dans le chapitre précédent. Les résultats sont suivis d'un bref commentaire.

III-1 Macro et micro structures de l'Okoumé

Dans l'ensemble, il n'existe pas de différence notable entre l'aubier et le duramen. Sur les deux types de bois, on retrouve une disposition identique pour les vaisseaux, le parenchyme, les rayons ligneux, les ponctuations, les perforations. Les observations des coupes faites en l'état naturel, quelle que soit l'orientation montre un dépôt rougeâtre qui remplit les vides entre les cellules du parenchyme radial : il s'agit de l'oléorésine localisée dans les rayons. Cependant sur les deux types de bois (aubier et duramen) toutes orientations mises en relief des cellules épithéliales encore moins les canaux sécréteurs n'ont pas été décelés. Chez les Burseraceae, famille botanique à laquelle appartient l'Okoumé, les canaux sécréteurs sont situés dans les phloèmes (Wannan et Quinn 1990).

L'observation du plan ligneux est fait à 2 niveaux :

- macroscopique ; elle regroupe les observations faites à l'œil nu et à la loupe binoculaire,
- microscopique ; il s'agit d'observations réalisées à l'aide des microscopes optique et électronique.

III-11 Observations macroscopiques

Elles sont réalisées suivant les sections transversales et longitudinales

III-11.1 En section transversale

De la moelle à la périphérie, il y a un enchaînement de bandes claires et foncées (Figure 3.1). Ces dernières sont visibles *in situ* mais mieux sur le bois poncé. Cependant sur tous les arbres, on ne distingue pas une limite nette entre les types de bandes ; d'où la qualification de limites floues (Mariaux 1970 ; Détienne *et al.* 1998). De cette imbrication de couleurs, on observe au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans une bande qu'une coloration se lâche à l'avantage de l'autre. On peut ainsi distinguer une coloration nette ; donc une bande. Cette évolution est peut être due aux conséquences induites par la longue saison humide (9 mois), par l'humidité relative (80 à 85%), aux fines pluies (crachins) et précipitations occultes qui tombent pendant la grande saison sèche.

Les bandes claires sont plus larges mais on observe parfois des extensions ponctuelles des bandes foncées, généralement sur les 15 voire 20 premiers cernes. Ces extensions résulteraient des réponses de l'arbre à des sollicitations externes. On distingue également des interruptions non continues sur le périmètre du bois ayant des allures de fines bandes. Ce qui précède peut expliquer la présence de petites bandes sombres et claires qui interrompent les bandes plus larges ; car ces petites bandes se fusionnent toujours aux plus larges et forment une bande unique. La moelle de l'Okoumé est fréquemment excentrée ce qui pourrait entraîner des problèmes de centrage lors des opérations de déroulage.

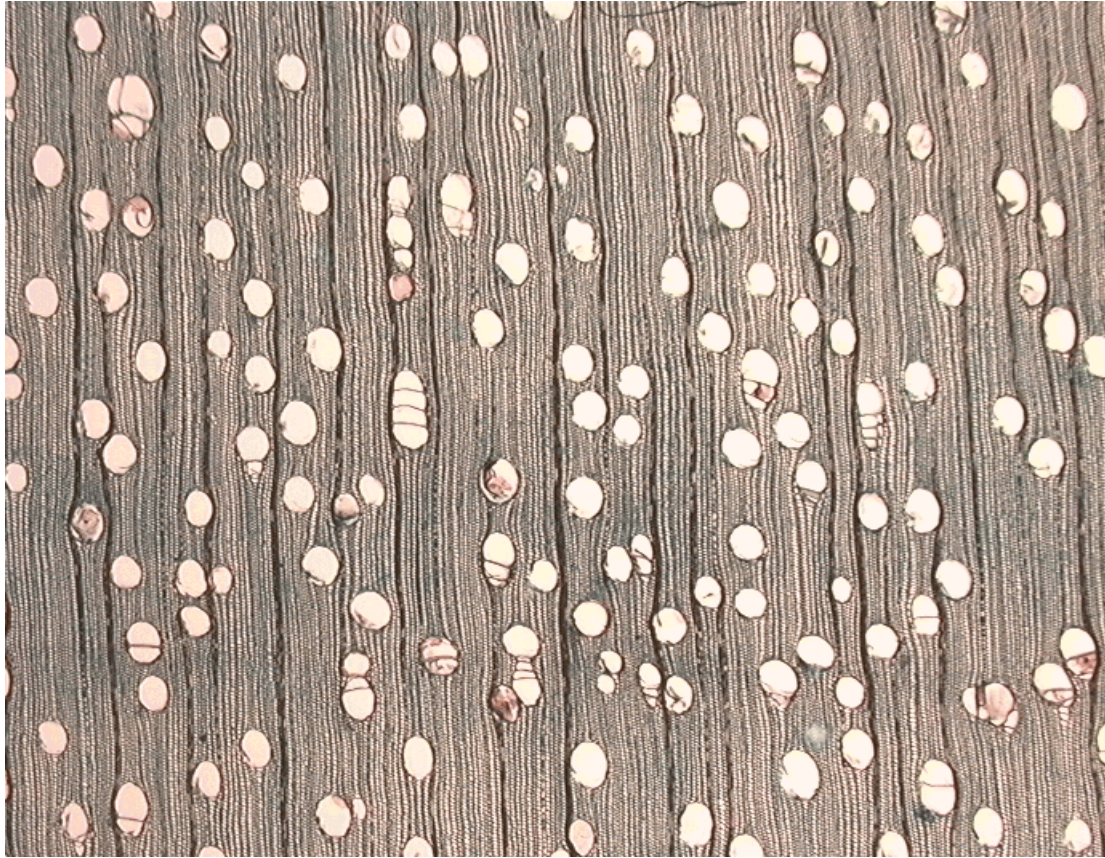
L'aubier est blanc grisâtre et il se distingue parfaitement du duramen (figures 1.8 et 3.1) quelle que soit la variété ; car il en existe trois d'après Bouet (1980), qui sont caractérisées par la couleur du bois de cœur (Okoumé blanc, Okoumé rouge et Okoumé frisé). Cette variation de couleur du bois parfait a pu être également constatée durant cette étude. Des investigations devraient être entreprises pour élucider cette différence.

Les pores (vaisseaux) sont de forme presque circulaire avec une tendance ovoïde, disséminés dans l'ensemble du cerne. Ils n'ont pas de disposition particulière : on trouve de petits, moyens et gros vaisseaux au même voisinage. Cependant, on distingue aisément le grain ; il va du fin ($\text{Ø} < 150 \mu\text{m}$) au grossier ($\text{Ø} \geq 200 \mu\text{m}$) selon la nomenclature décrite par Normand (1972). Dans l'ensemble des observations, on a noté une répartition graduelle du grain : 15% de fin, 36% de moyen ($150 \leq \text{Ø} < 200 \mu\text{m}$) et 49% de grossier. Ils sont souvent isolés parfois accolés par 2 ou par 3 ou plus mais rarement (Figure 3.2). Ce qui précède nous amène à dire que l'Okoumé est un bois à **pores diffus**.



Figure 3.1 : Bloc de bois d'Okoumé poncé montrant les cernes et la différenciation du duramen de l'aubier

Les rayons ligneux sont fins, seulement visibles à la loupe, d'un pas assez régulier (environ 85-116-142 μm), contournant le pore en épousant sa forme et reprenant aussitôt l'écart initial (Figure 3.2). Ils sont facilement reconnaissables par leur teinte plus claire que le tissu fibreux.



3.2 : Coupe transversale du bois d'Okoumé (x 10)

III-11.2 En section longitudinale

Dans le plan tangentiel les zones d'accroissement se distinguent parfois par une variation de la teinte du bois et de la fréquence des traces vasculaires. Ces dernières sont fines, légèrement plus colorées que le fond du bois et parallèles au fil. En revanche sur le plan radial, on observe une maillure fine plus sombre que le tissu fibreux.

III-12 Observations microscopiques

Elles sont réalisées selon la disposition des éléments longitudinalement et radialement.

III-12.1 Les éléments longitudinaux

Ces sont des éléments issus des initiales fusiformes tant du liber que du bois.

III-12.11 Les vaisseaux

Ils sont en majorité isolés (80%), quelques-uns accolés par 2 (15%), rarement accolés par 3 ou plus de (5%) (Figures 3.2 et 3.3) au nombre de 5 à 9 par mm^2 , répartis dans le cerne sans disposition particulière. Le diamètre tangentiel mesuré sur 744 vaisseaux varie généralement

de 100 à 300 μm (95%) mais on y rencontre rarement des pores de diamètre inférieur à 100 μm (4%) ou supérieur à 300 μm (1%). Les éléments de vaisseaux sont longs de 500 à 600 μm en moyenne, ouverts par de grosses perforations simples ayant presque le même diamètre que la lumière du vaisseau. Les ponctuations intervasculaires sont disposées en quinconce (Figure 3.4), de formes plus ou moins circulaires, de 9 à 21 μm de diamètre et à orifices elliptiques. Quant aux ponctuations radiovasculaires, elles sont légèrement aréolées, ovales à étirées horizontalement de diamètre moyen variant de 12 à 18 μm (Figure 3.6). Les pores sont fréquemment bouchés partiellement ou en totalité par les thylles (Figures 3.6 et 3.7).

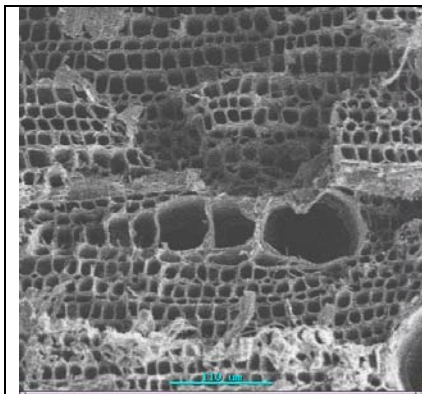


Figure 3.3 : Vaisseaux accolés par 9

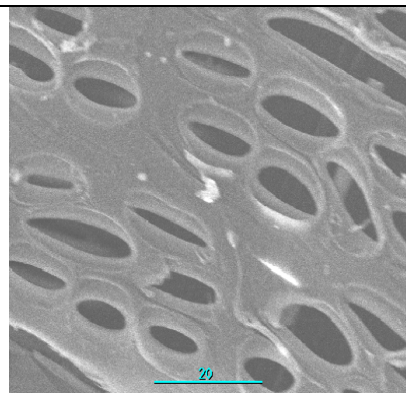


Figure 3.4: Ponctuations intervasculaires sur un vaisseau

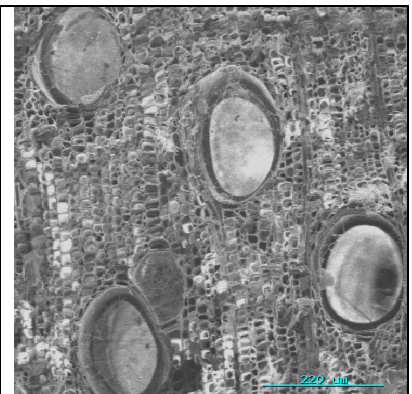


Figure 3.5 : Vaisseaux bouchés totalement par les thylles

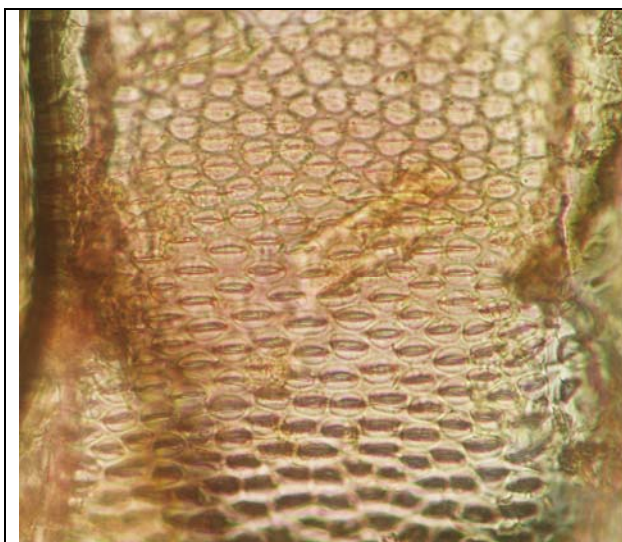


Figure 3.6 : Ponctuations radiovasculaires aréolées (x40)

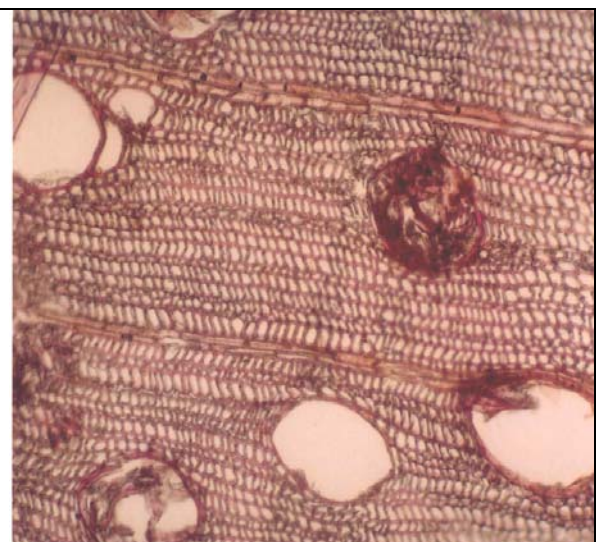


Figure 3.7 : Vaisseaux partiellement et totalement bouchés par les thylles (x40)

III-12.12 Fibres

Elles ont une longueur moyenne de 820 à 1160 μm avec une largeur qui varie de 18 à 29 μm et de minces parois. Les fibres sont cloisonnées de 2 à 6 septa, à ponctuations simples très fines.

III-12.13 Parenchyme longitudinal

Peu abondant, on distingue quelques cellules soudées au vaisseau au nombre de 4 à 8 cellules par file. Il est du type paratrachéal juxtavasculaire.

III-12.2 Les éléments radiaux : les rayons ligneux

Ces sont des éléments issus des initiales isodiamétriques tant du liber que du bois. Les rayons ligneux sont au nombre de 4 à 8 par mm. Ils sont multisériés dont bisériés en général, rarement trisériés (Figures 3.9 et 3.11). Les rayons ligneux de l'Okoumé sont larges de 28 à 55 μm en moyenne avec une hauteur moyenne qui varie de 300 à 430 μm (Figure 3.9) et constitués de 9 à 24 cellules. Les rayons sont hétérocellulaires ; 2 à 3 types de cellules coexistent ; on y distingue des cellules couchées au centre des rayons avec 1 ou 2 mais rarement 3 rangées terminales de cellules carrées ou dressées (Figures 3.9 et 3.11). On trouve soit un type de cellules dans les rangées terminales, soit les deux types (carrées et dressées). Les punctuations radiovasculaires sont très grosses, de forme variant d'ovale à étirée horizontalement, parfois en balafres (Figure 3.10). On peut distinguer des dépôts résinoïdes de couleur rougeâtre dans les méandres du rayon ligneux (Figure 3.11). Dans les cellules du parenchyme, on trouve des corpuscules cristallins prismatiques tant dans les cellules couchées centrales que dans les cellules terminales mais plus grosses.

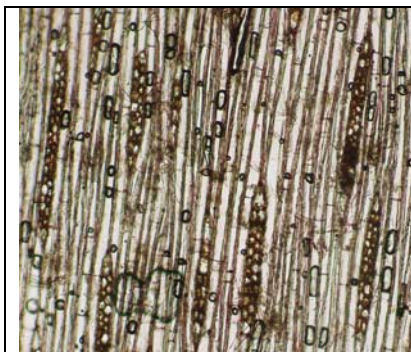


Figure 3.9 : Rayons ligneux (x10)

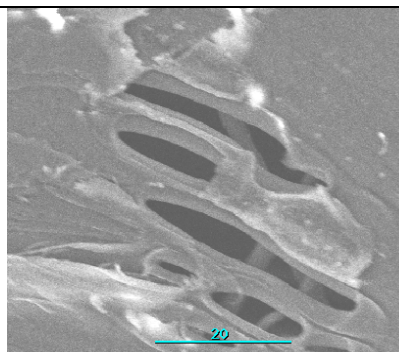


Figure 3.10 : Punctuations en balafres



Figure 3.11 : Les rayons ligneux bisériés et hétérocellulaires (x40)

III-13 Dendrochronologie

III-13.1 Sur le plan anatomique

- Les observations macroscopiques des sections transversales (Figure 3.12) montrent

- ❖ Une succession de bandes claires et sombres aux limites pas nettes ;
- ❖ Une distribution irrégulière de largeurs de cernes ;
- ❖ Une présence de faux cernes ;

- ❖ Une existence du bois de tension,
- ❖ Une rareté voire absence de fines bandes au-delà du cerne 15 ;
- ❖ Une discontinuité de petites bandes sur le périmètre de section transversale du tronc. On ne retrouve pas la présence de fines bandes, quand elles existent pour un bloc sur le bloc du deuxième sous-plateau du même arbre et à âge cambial fixé. On a l'impression que le décalage entre les bandes sombres par une fine bande claire est un détachement ponctuel, laissant penser à une forme de phagocytose,
- ❖ Des grandes bandes présentes sur les deux blocs d'un même arbre à âge cambial fixé ;
- ❖ Des cellules à cheval entre les petites bandes parfois entre la grande bande claire et les petites bandes, aux mêmes dimensions ;
- ❖ Pour un cerne, la largeur n'est pas uniforme sur tout le périmètre et les proportions de bandes claires et sombres diffèrent sensiblement tout autour de l'accroissement. Néanmoins la texture représente en moyenne le quart mais on observe ponctuellement des textures supérieures à la moitié d'un cerne ;
- ❖ Une diminution progressive de l'emprise d'une couleur au bénéfice d'une autre (claire à sombre et inversement).

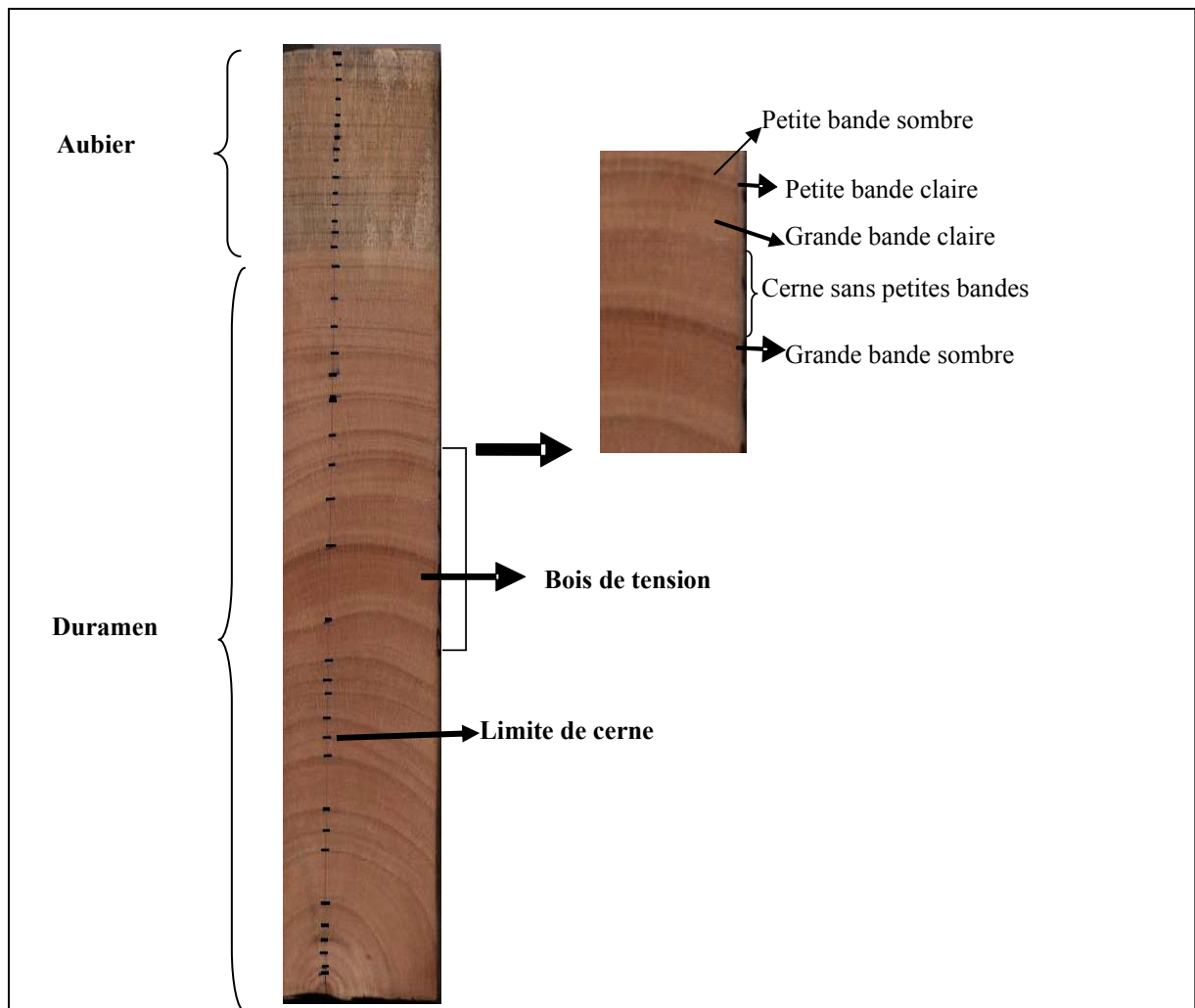


Figure 3.12 : Bloc poncé présentant les cernes

Au niveau microscopique (paragraphe III-12), on note deux particularités :

- ❖ Une disposition assez régulière des fibres en files radialement,
- ❖ Les fibres des couches sombres ont des diamètres radiaux moins grands $12 \pm 2 \mu\text{m}$ que dans la direction tangentielle $18 \pm 4 \mu\text{m}$ (Figure 3.13).

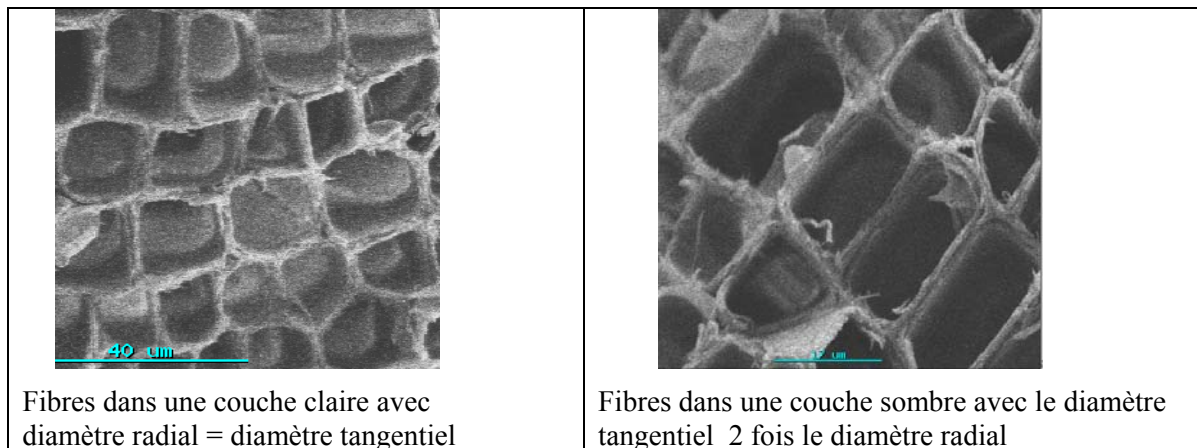


Figure 3.13 : Tissu fibreux dans les différentes bandes

III-13.2 Paramètres environnementaux

L'activité de la zone cambiale est responsable de l'accroissement de l'arbre en diamètre (conséquence de la division périclinale) et en circonférence (conséquence de la division anticlinale). Cette assise demeure sensible aux conditions extérieures relatives à son biotope. C'est le cas de l'action induite par les paramètres physiques du milieu notamment la pluviométrie et la température. L'analyse de ces deux paramètres environnementaux présentés sur la figure 3.14 montre au constat que l'année calendaire peut être interprétée en quatre étapes suivant le niveau et le débit de précipitations :

- ❖ Etape 1 de Septembre à Novembre, caractérisée par de fortes pluies pouvant atteindre 700 mm/mois (Octobre) et une montée de température. Elle est communément appelée grande saison de pluies,
- ❖ Etape 2 de Décembre à Février (mi-mois), avec une diminution du régime de pluies et des précipitations oscillant entre 150 et 250 mm/mois accompagnée de montées de température, généralement désignée comme étant la petite saison sèche,
- ❖ Etape 3 de Février (mi-Février) à Mai, marquée par une reprise de précipitations avec des débits mensuels variant de 175 à 380 mm et l'amorce de chute de température ; souvent désignée comme petite saison de pluies,
- ❖ Etape 4 de Juin à Août, diminution très importante de précipitations en dessous du seuil de 100 mm/mois, frôlant le niveau zéro et induisant un stress hydrique. Pendant cette période communément dite grande saison sèche, le thermomètre est bas.

Le Gabon peut donc être divisé en deux séquences dont une longue période de pluies regroupant les trois premières étapes allant de Septembre à Mai qui ne présentent pas de problèmes de disponibilité en eau. L'étape 4 représenterait à elle seule la deuxième séquence de Juin à Août : c'est la période sèche avec ses difficultés hydriques. Cette vision de l'aspect climatique est en phase avec la littérature (Léonard et Richard 1993).

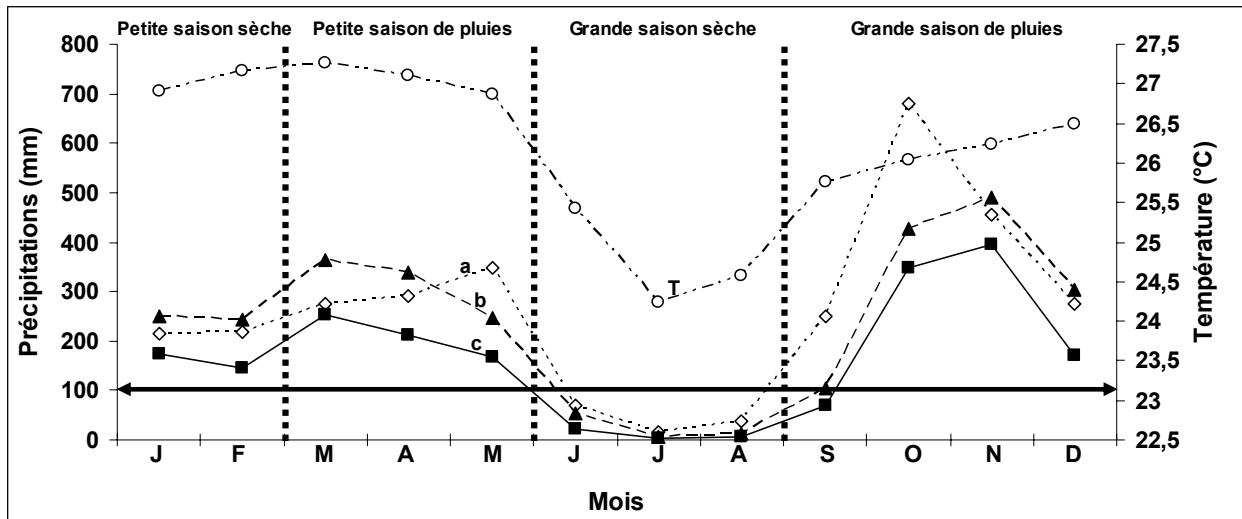


Figure 3.14 : Normales climatiques (pluviométrie et température) des stations météorologiques proches des plantations forestières d'intérêt. La courbe de températures (T) est une moyenne des stations ; car les données sont très proches voire égales entre stations. a = Cocobeach, b = Libreville et c = Lambaréné.

III-13.3 Largeur de cerne au WinDindro[®]

Rappelons quelques caractères biologiques de l'Okoumé émergents :

- ❖ Arbre héliophile,
- ❖ Réaction positive au mésoclimat (chablis, abattage d'arbres, etc.),
- ❖ Floraison au mois d'Août.^a

La mise en relation des caractéristiques anatomiques, des paramètres environnementaux et la biologie de cette espèce a conduit à définir le cerne de l'Okoumé à deux bandes :

- ❖ La grande bande claire qui correspond à la saison pluvieuse ; c'est le bois de saison humide qui est l'équivalent du bois de printemps (bois initial),
- ❖ La grande bande sombre qui correspond à la saison sèche ; c'est le bois de saison sèche qui équivaldrait au bois d'été (bois final). On pourrait également appeler ce bois « bois de floraison », car c'est durant cette période de basses eaux que la floraison se prépare et démarre (Brunck *et al.* 1990).

L'évaluation des largeurs de cernes effectuée à partir du logiciel WinDendro[®] a montré une grande variabilité de la moelle à la périphérie. A partir du cerne d'âge cambial 2 ans (la plus faible largeur $3,3 \pm 0,4$ mm), la largeur des cernes d'Okoumé augmente au fil des années pour atteindre son pic de largeur à l'âge cambial 7 ans ($8,6 \pm 1,5$ mm). Au-delà de cet âge la largeur décroît progressivement jusqu'à 19 ans. Dès le 20^e cerne, on a une tendance « plateau ».

Dans l'ensemble la largeur des cernes de l'Okoumé décroît de la moelle à la périphérie (Figure 3.15). Les relèvements de largeurs dans le cycle de décroissance sont dus à la présence de bois de tension, résultant de la réaction de l'Okoumé aux sollicitations. Les largeurs de cerne varient de 3,31 à 8,61 mm pour une moyenne de 5,34 mm. L'analyse de variance à 5% en mettant l'âge cambial en covariable montre une différence significative entre Bokoué et M'Voum ($P < 0,001$).

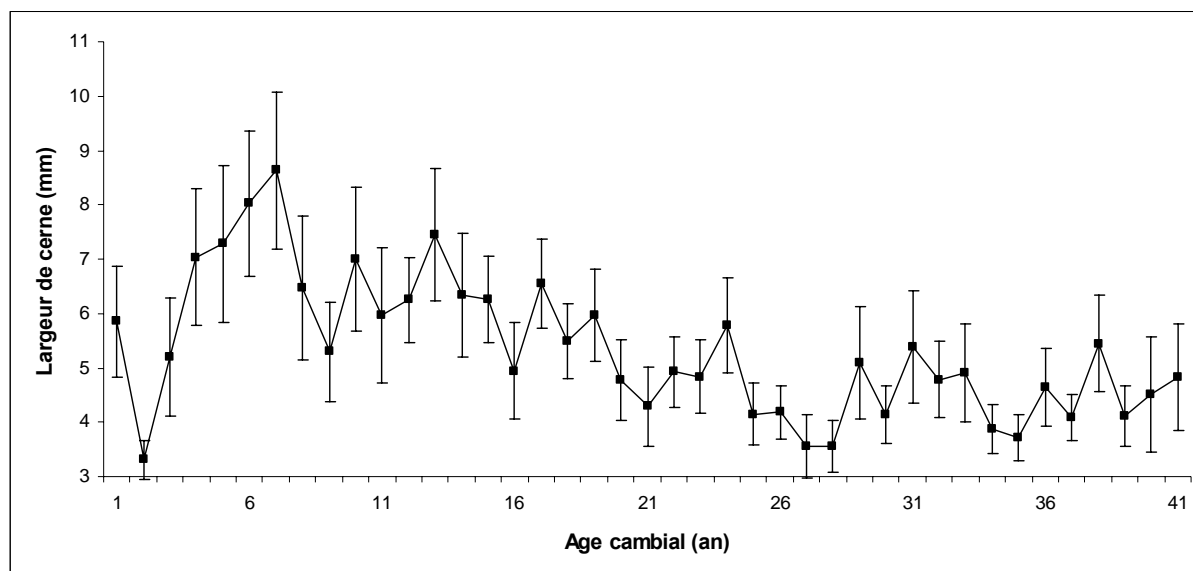


Figure 3.15 : Evolution suivant l'âge cambial des largeurs moyennes des cernes d'Okoumé de la moelle vers la périphérie (moyennes des deux plantations).

III-2 Propriétés physiques et mécaniques

Avant de présenter les résultats obtenus des tests physiques et mécaniques, il serait peut être judicieux d'exposer quelques données caractérisant l'Okoumé trouvées dans la littérature (tableau 3.1). Ce tableau peut être divisé en deux groupes en fonction du module d'élasticité longitudinal : le groupe $E_L < 8000$ MPa et le groupe $E_L \geq 9000$ MPa (Tableau 3.1). Le premier groupe peut être représenté comme un seul auteur (il semble vraisemblable que les données proviennent d'une banque de données communes).

Source	MOE _L (MPa)	M. volumique (kg/m ³)	Retrait Volumique (%)	Retrait Radial (%)	Retrait Tangentiel (%)	PSF (%)
Brunck <i>et al.</i> 1990	7800	440	12	4,8	7,5	
Christy <i>et al.</i> 2003	7800	440	-	4,8	7,5	
ATIBT, 1986	7800	440				
Bakraji <i>et al.</i> 2002	-	550-650		-	-	
Ngavoura, 1998	9360	374	-	-	6,2	28,6
MatWeb	9100	430	9,7	3,8	5,7	
Momento du forestier, 1989			11	4,5	6,5	28

Tableau 3.1 : Valeurs moyennes des paramètres d'Okoumé retrouvés dans la littérature.

III-21 Masse volumique

L'évaluation de la masse volumique est réalisée sur 356 éprouvettes issues de 54 arbres dont 13 de Bokoué, 15 de M'Voum, 10 de Cocobeach, 10 de Ndjolé et 6 de Mitzic. Les éprouvettes sont façonnées suivant orientations et dimensions : 360 mm (longitudinal) x 20 mm (radial) x 20 mm (tangentielle).

III-21.1 Variabilité intra-arbre

Les variations intra-arbres de la masse volumique du bois d'Okoumé ont été observées sur 356 éprouvettes (duramen et aubier) de 54 arbres en suivant un gradient radial de la moelle vers la périphérie en fonction de l'âge cambial. La masse volumique n'a présenté aucun effet suivant l'âge ($P = 0,919$) toutes origines confondues. Il en est de même au niveau des différents duramens au seuil de 5% ($P = 0,251$). Cependant, on observe une augmentation de la masse volumique du duramen interne vers le duramen externe (Figure 3.16) mais il n'y a pas de différence pas significative ($P = 0,1$). Les statistiques élémentaires confirment cette augmentation de la masse volumique de l'Okoumé sur le gradient radial avec respectivement de $444 \pm 44 \text{ kg/m}^3$ pour le duramen interne, de $449 \pm 45 \text{ kg/m}^3$ pour le duramen intermédiaire et de $454 \pm 39 \text{ kg/m}^3$ pour le duramen externe. L'analyse de variance effectuée en fonction du site, de l'écosystème et de l'écologie sur les différents duramens dévoile que :

- ❖ au niveau du duramen interne, une différence significative selon le site ($P = 0,02$) dont la masse volumique la plus élevée est de 490 kg/m^3 (Mitzic) et la moins élevée 399 kg/m^3 (Ndjolé), un effet presque significatif selon les zones écologiques ($P = 0,064$) et pas d'effet significatif selon l'écosystème ;
- ❖ au niveau du duramen externe, un effet site significatif ($P = 0,05$) dont la plus grande masse volumique revient encore à Mitzic (478 kg/m^3) et la plus petite toujours à Ndjolé (445 kg/m^3). On note un effet zone écologique significatif ($P = 0,014$) dont 478 kg/m^3 en zone **A** et 452 kg/m^3 en zone **B**, par contre pas d'effet avec l'écosystème ;
- ❖ au niveau du duramen intermédiaire, on n'observe aucun effet significatif ni pour le site ni pour la zone écologique.

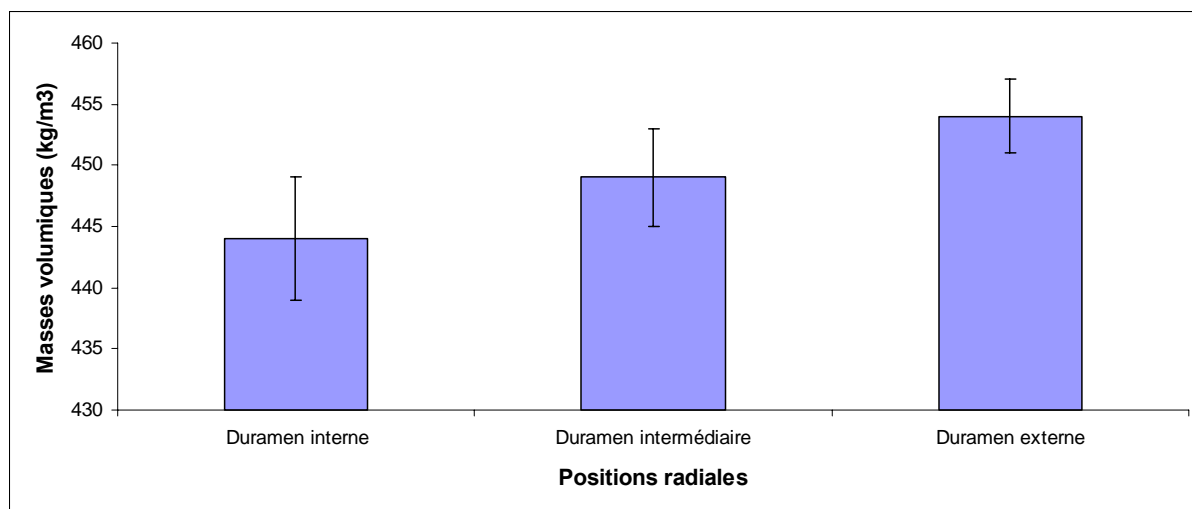


Figure 3.16 : Evolution de la masse volumique des trois duramens sur le gradient radial.

III-21.2 Variabilité inter-arbre

La répartition des valeurs moyennes de masse volumique évaluée sur 356 échantillons du bois d'Okoumé issu des deux écosystèmes repartis en deux zones écologiques (zones **A** et **B**) a été effectuée par classes de 50 kg/m^3 d'amplitude (Figure 3.17). On obtient une proportion de 92% d'éprouvettes ayant une masse volumique comprise entre 400 et 603 kg/m^3 . La plus faible masse 316 kg/m^3 est mesurée sur une éprouvette de l'arbre (V6) provenant de M'Voum et la plus élevée 603 kg/m^3 d'une éprouvette de l'arbre (C6) issu de Cocobeach, zone riveraine du massif forestier de M'Voum. L'analyse de variance réalisée (seuil de 5%) montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'écosystème sur la masse volumique. Par contre, on note un effet significatif de la zone écologique ($P = 0,004$) avec des moyennes de $475 \pm 44 \text{ kg/m}^3$ (zone **A**) et $449 \pm 41 \text{ kg/m}^3$ (zone **B**). Les arbres de Ndjolé présentent la moyenne la plus faible entraînant les deux écosystèmes à masse volumique presque égale (451 kg/m^3 en forêt naturelle et $449,5 \text{ kg/m}^3$ en plantations).

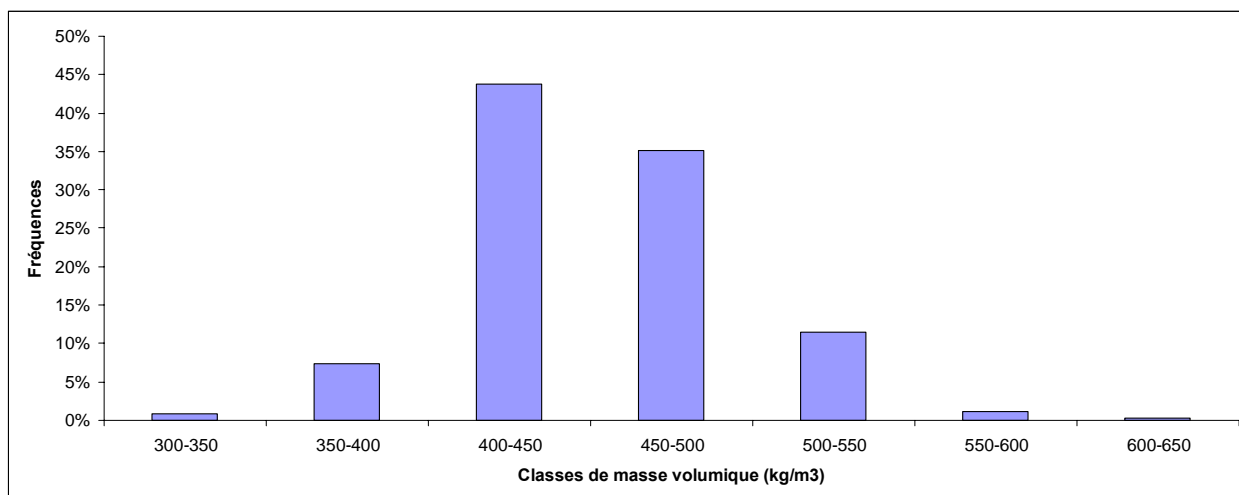


Figure 3.17 : Distribution des moyennes de masse volumique de 356 éprouvettes provenant des 54 arbres.

Le regroupement des éprouvettes par arbre donne une proportion de 94% d'individus entre 400 et 550 kg/m³. La masse volumique la moins élevée 381 kg/m³ provient toujours du même site comme pour les éprouvettes (arbre V6). En revanche la masse la plus élevée 535 kg/m³ provient de l'arbre (B6) de Bokoué. Les figures 3.18 et 3.19 présentent l'évolution des masses volumiques par arbre ; les valeurs moyennes par sites y figurent dont Mitzic offre la plus forte masse volumique 475 kg/m³. Les moyennes par site diffèrent peu au seuil de 5%, on a une forte probabilité (P = 0,327) comme pour les éprouvettes.

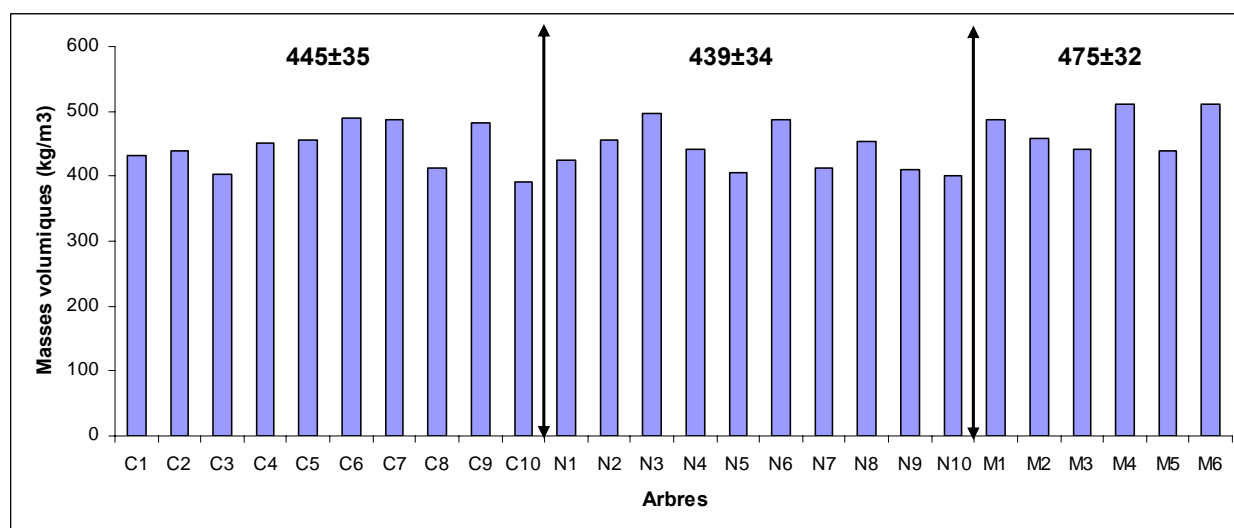


Tableau 3.18 : Masse volumique moyenne des arbres issus de la forêt naturelle (C = Cocobeach, N = Ndjolé et M = Mitzic) dont les flèches en noir marquent les limites.

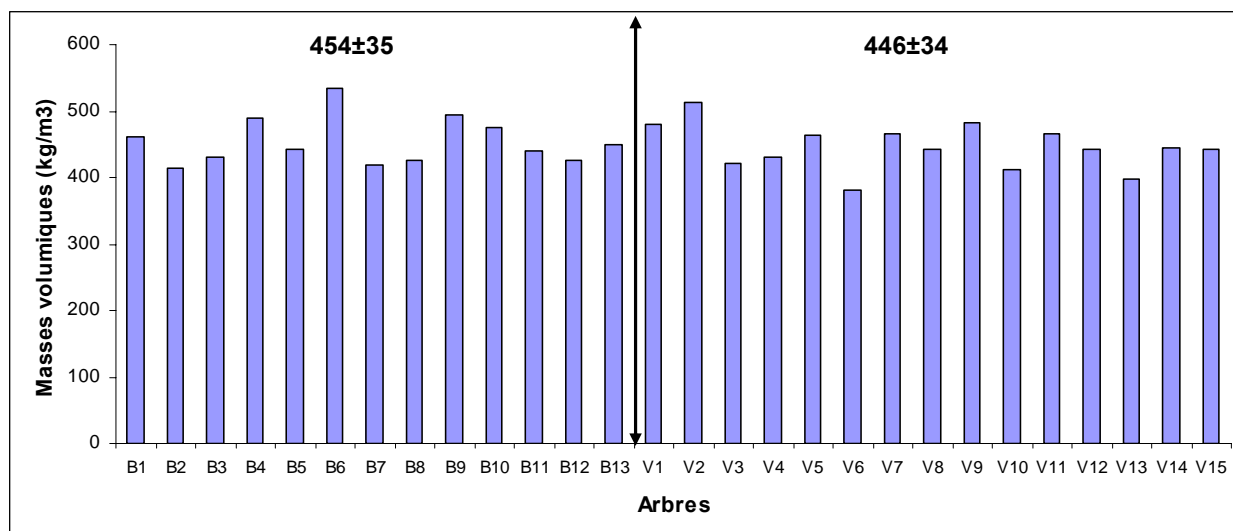


Figure 3.19 : Masse volumique moyenne des arbres issus des plantations (B=Bokoué et V=M'Voum) dont les flèches en noir marquent les limites.

Les masses volumiques sont peu stables quel que soit le site. A l'exception de Mitzic qui présente un coefficient de variation de 7%, le reste des sites offre un coefficient de variation légèrement au dessus soit 8%. Les moyennes des sites M'Voum et Cocobeach sont très voisines. Ceci est certainement dû à la proximité des massifs. Les valeurs par arbre figurent en annexe page 186.

III-22 Module d'élasticité longitudinal (E_L)

III-22.1 Variabilité intra-arbre de E_L

L'évaluation du comportement radial de E_L dans le bois d'Okoumé est réalisée sur 54 arbres, à partir desquels 356 éprouvettes ont été façonnées. L'âge cambial au seuil de 5% influence significativement ($P = 0,003$) le module d'élasticité de l'Okoumé. Les valeurs moyennes de E_L augmentent de manière distincte (Figure 3.20) du duramen interne vers le duramen externe. Le E_L du duramen adjacent à la moelle (8282 ± 1073 MPa) est inférieur au duramen intermédiaire (8754 ± 1258 MPa) qui l'est par rapport au duramen externe (8958 ± 1134 MPa). L'analyse de variance révèle un effet significatif entre les trois positions radiales ($P < 0,001$). Le module interne diffère significativement du module intermédiaire ($P = 0,01$) et du module externe ($P < 0,001$) mais ces deux derniers ne marquent pas de différence significative entre eux ($P = 0,16$). Une projection selon l'origine fait également entrevoir une différence significative aux niveaux site ($P < 0,001$) et zone écologique ($P = 0,001$).

Un examen individuel des différentes positions révèle :

1) une influence du site sur

- ❖ le duramen interne ($P = 0,025$) : E_L varie de 7836 MPa (M'Voum) à 9547 MPa (Mitzi),
- ❖ le duramen intermédiaire ($P = 0,032$) : E_L va de 8400 MPa (M'Voum) à 9894 MPa (Mitzi),
- ❖ le duramen externe ($P = 0,002$) : E_L oscille entre 8649 MPa (Cocobeach) et 9486 MPa (Mitzi), mais l'écart entre valeurs extrêmes est plus faible soit 9%.

2) un effet zone écologique sur les deux premiers duramens au départ de la moelle soit pour :

- ❖ le duramen interne ($P = 0,036$) avec un E_L de 9547 MPa en zone A supérieure de 14% par rapport à celui de la zone B,
- ❖ le duramen intermédiaire ($P = 0,037$) dont le E_L de la zone A est 12% au dessus de celui de la zone B qui vaut 8699 MPa,

Quant au duramen externe, il ne marque pas d'effet significatif néanmoins le E_L de la zone A reste plus élevée de 6% par rapport à celui de la zone B qui est de 8913 MPa.

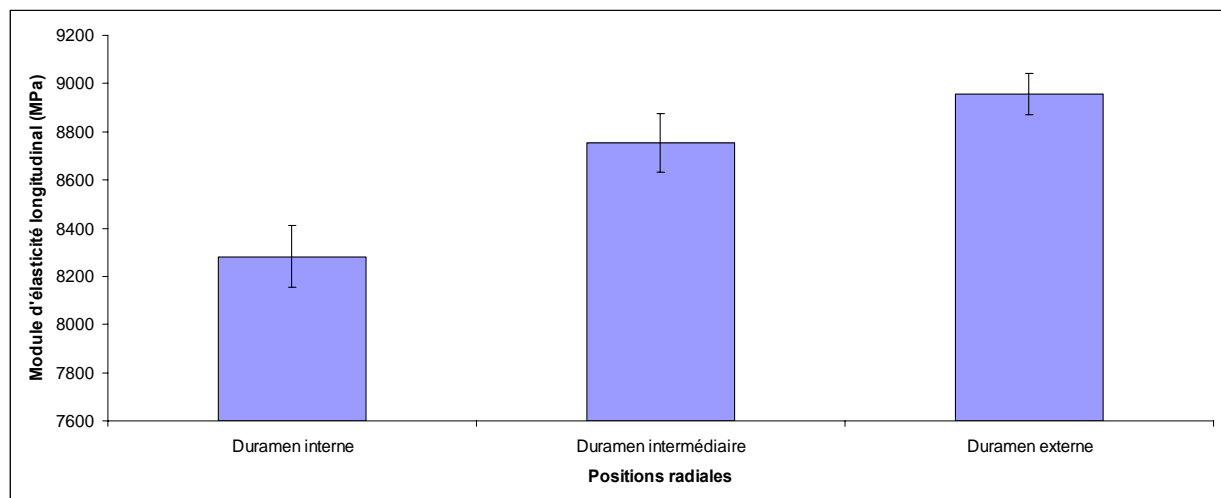


Figure 3.20 : Evolution du module d'élasticité longitudinal des trois duramens sur le gradient radial.

III-22.2 Variabilité inter-arbre du module d'élasticité longitudinal (E_L)

Une répartition en classes d'amplitude 1000 MPa des valeurs moyennes de E_L a été effectuée sur 356 éprouvettes façonnées à partir de 54 arbres d'Okoumé, tous les sites confondus. Cette distribution a donné lieu à 11 classes théoriques (Figure 3.21). La classe 10 (14000-15000 MPa) n'a pas de représentant mais la 11^e classe (15000-16000 MPa) est représentée par une éprouvette. Les valeurs de E_L de l'Okoumé varient de 5407 MPa à 15009 MPa.

Le minimum vient de l'arbre (V14) de M'Voum comme pour la masse volumique et le maxima est de la forêt naturelle (arbre N6 de Ndjolé). Une proportion de 77% d'éprouvettes a un E_L supérieur à 8000 MPa. Au seuil de 5%, on relève un effet site significatif ($P < 0,001$) et à partir d'un *T-test*, on observe un effet significatif d'appartenance à :

- ❖ la zone écologique ($P=0,012$) : une moyenne de 9587 ± 1475 MPa en zone **A** et 8709 ± 1147 MPa en zone **B** ;
- ❖ l'écosystème ($P < 0,001$) : la forêt naturelle présente une meilleure rigidité soit de 9127 ± 1276 MPa alors que celle des plantations est de 8535 ± 1068 MPa.

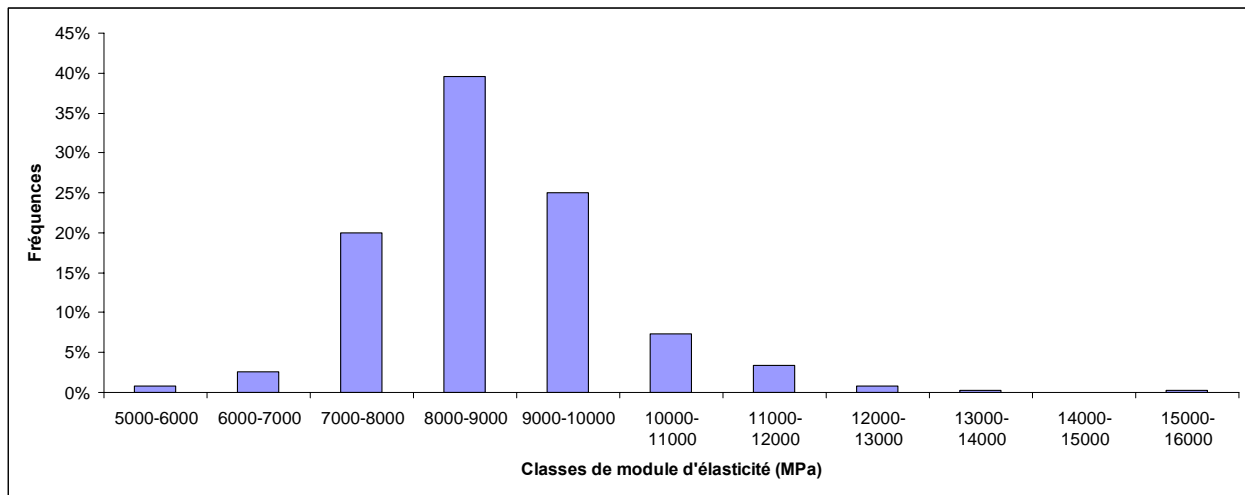


Figure 3.21 : Distribution des moyennes de masse volumique de 356 éprouvettes provenant des 54 arbres.

En revanche E_L d'Okoumé regroupé en arbres oscille de 7055 MPa à 12010 MPa (Figure 3.24 et Figure 3.25). La valeur minimale provient des plantations toujours de M'Voum (V14) et la valeur maximale de la forêt naturelle en provenance de Mitzic (arbre M6) en zone **A**. 80% des arbres ont un module supérieur à 8000 MPa (les valeurs par arbres sont en annexe page 186). Le regroupement en sites donne l'avantage de la rigidité aux sites de la forêt naturelle (Figures 3.22 et 3.23) avec la moyenne la plus élevée à Mitzic (9617 MPa). L'analyse de variance montre un effet site significatif ($P = 0,021$). Les influences climatiques marquent également de manière significative la rigidité de l'Okoumé ($P = 0,016$). La zone **A** offre un meilleur comportement qui est de 10% supérieur à celui de la zone **B** (8644 MPa).

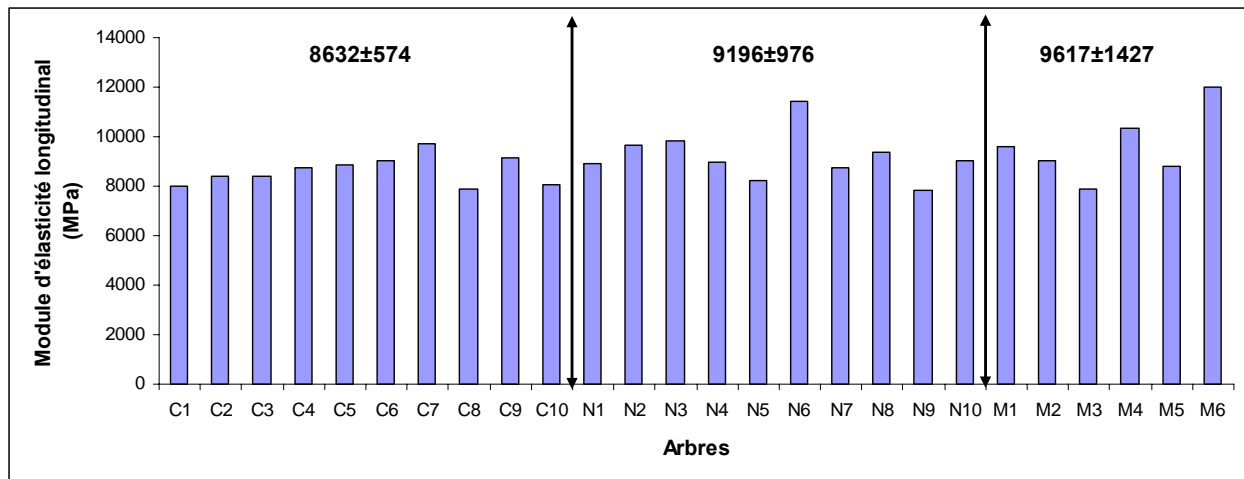


Figure 3.22 : Moyennes de module d'élasticité longitudinal des arbres issus de la forêt naturelle (C=Cocobeach, N=Ndjolé et M=Mitzié). Les flèches en noir délimitent les sites.

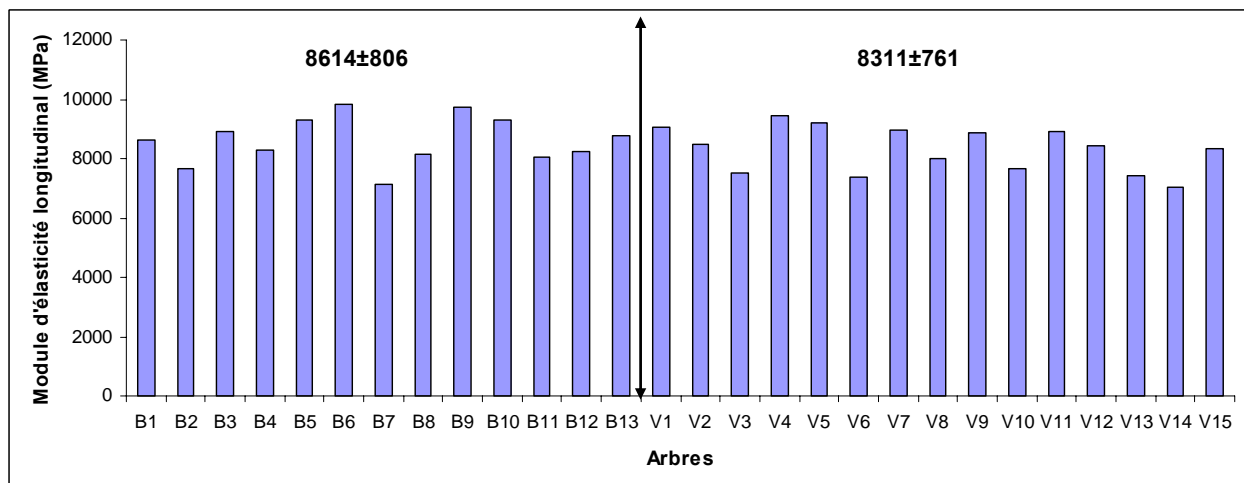


Figure 3.23 : Moyennes de module d'élasticité longitudinal des arbres issus des plantations (B=Bokoué, et V=M'Voum). Les flèches en noir délimitent les sites.

Dans l'ensemble des 54 arbres sans distinction d'origine la masse volumique est significativement corrélée avec le module d'élasticité longitudinal avec $R^2 = 69\%$, $P < 0,001$ (Figure 3.24). Ceci est une conséquence de ce qui se ressort au niveau individuel des sites, notamment :

- ❖ Bokoué ; $R^2 = 74\%$, $P = 0,004$;
- ❖ M'Voum ; $R^2 = 62\%$, $P = 0,014$;
- ❖ Cocobeach ; $R^2 = 86\%$, $P = 0,001$;
- ❖ Ndjolé ; $R^2 = 81\%$, $P = 0,004$;
- ❖ Mitzié ; $R^2 = 88\%$, $P = 0,022$;

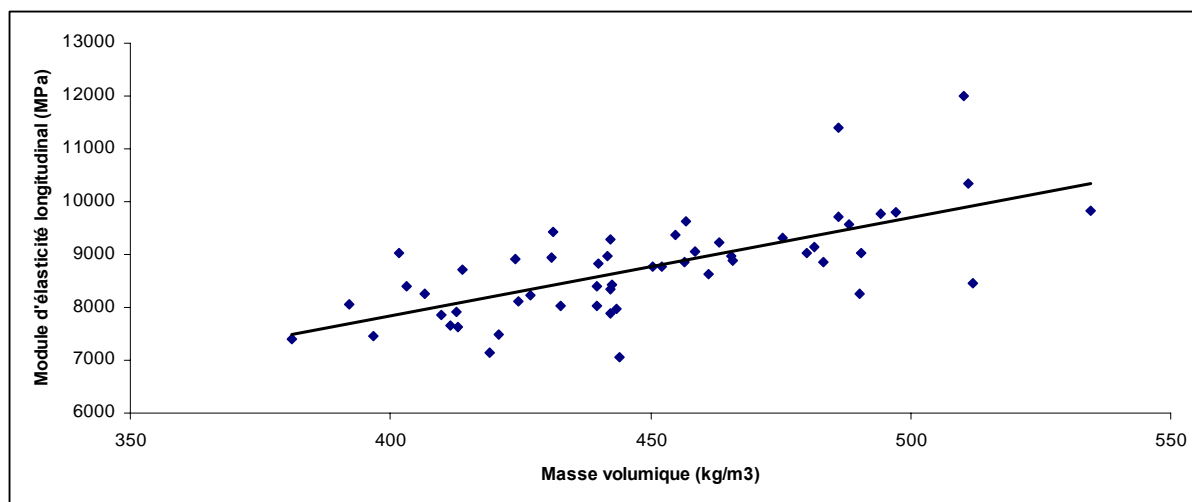


Figure 3.24 : Relation entre masse volumique et E_L en plantation (a) et en forêt naturelle (b).

III-23 Stabilité dimensionnelle

Les variations dimensionnelles associées au retrait ou au gonflement contribuent grandement à la dégradation des produits en bois. Les désagréments causés peuvent être constatés dans la vie de tous les jours ; les portes et fenêtres se ferment difficilement, les assemblages marquent un jeu, les tiroirs coïncent etc.

L'usage spontané ou par réflexe du bois d'Okoumé par les Gabonais dans leur quotidien, a inspiré l'étude de certains paramètres de stabilité dimensionnelle de ce bois. L'évaluation est effectuée sur trois retraits totaux (le retrait volumique total, le retrait radial total et le retrait tangentiel total) tous résultant de la variation de la quantité d'eau dans les fibres. Ceci a donc amené à mesurer le point de saturation des fibres (PSF). Le retrait longitudinal total est quant à lui exclusivement mesuré sur les éprouvettes provenant des plantations dans l'optique de la détermination de la limite entre bois juvénile/bois adulte. Les mesures ont été évaluées sur 261 éprouvettes cubiques de 20 mm d'arrêt, issues de 49 arbres.

III-23.1 Retraits totaux

III-23.11 Retrait volumique total

Quand une pièce de bois sèche, elle libère son eau liée (phénomène en dessous de son PSF) et son volume diminue. Si elle se réhumidifie, son volume augmente jusqu'au PSF. Les variations de volume sont quantifiées en utilisant le retrait volumique (noté B) qui est la variation de volume d'une éprouvette passant de son état saturé à son état anhydre ($V_s - V_o$) rapportée à son volume à l'état saturé (V_s). Ce paramètre est généralement exprimé en pourcentage.

Le bois d'Okoumé a présenté un retrait volumique total moyen dans l'ensemble des 5 sites de $9,7 \pm 0,6\%$ qui diffère significativement selon l'âge cambial ($P = 0,001$). Il est également noté des effets significatifs aux niveaux arbre ($P = 0,006$) et zone écologique ($P = 0,004$). L'appartenance à un site ou à un écosystème n'influence significativement pas le retrait volumique chez l'Okoumé. Quant aux trois duramens [duramen interne (DI), duramen intermédiaire (DM) et duramen externe (DE)] une différence significative est observée ($P < 0,001$) avec un retrait plus élevé pour le duramen externe (Figure 3.25).

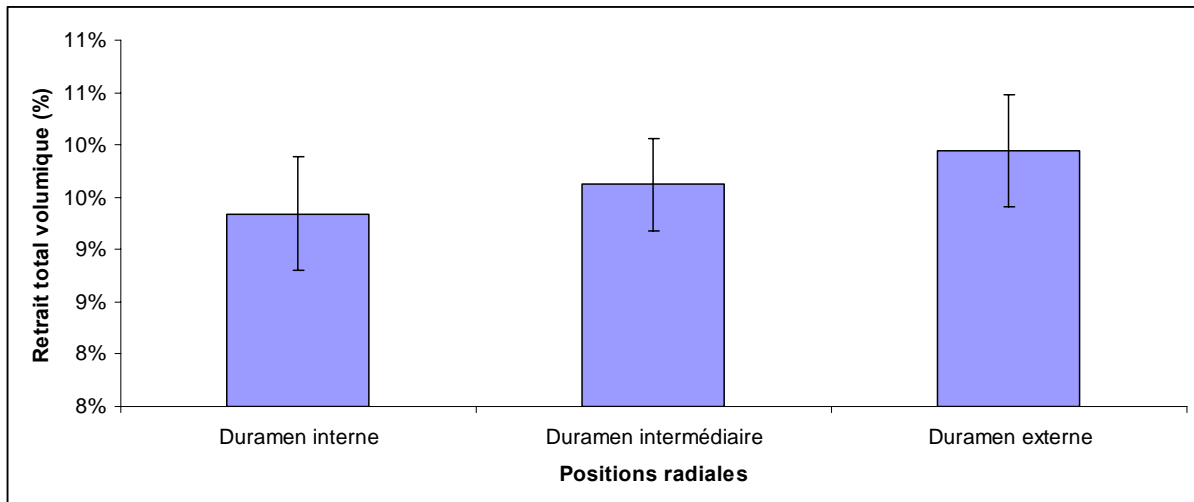


Figure 3.25 : Evolution radiale du retrait volumique total du bois d'Okoumé suivant l'âge

III-23.12 Retraits linéaires

Jusqu'à une certaine teneur en eau correspondant au PSF évoqué plus bas, le bois d'Okoumé ne se rétracte pas en séchant. En revanche en dessous de ce seuil, il est soumis à des variations dimensionnelles linéaires selon que son humidité varie. Le retrait du bois en dessous du PSF intervient distinctement suivant les trois directions d'anisotropie du bois : longitudinale, tangentielle et radiale. Le retrait tangentiel total et le retrait radial total sont habituellement déterminés pour qualifier le comportement du bois lors du séchage ou plus généralement lors de variations d'humidité. Le retrait total suivant la direction (exprimé en pourcentage) par rapport à l'état saturé est donné par la relation :

$$R_D = \frac{(D_s - D_0)}{D_s} \times 100$$

où

- R_D : retrait suivant la direction d'intérêt,
- D_s et D_0 : respectivement les dimensions des échantillons dans la direction d'intérêt à l'état saturé puis à l'état anhydre.

L'évaluation de retrait linéaire réalisée sur 261 éprouvettes du bois d'Okoumé provenant de 49 arbres repartis en 5 sites, en 2 écosystèmes et 2 zones écologiques, est présentée ci-dessous :

- ❖ Au niveau du retrait radial total : les moyennes par arbres varient entre 3,2% (arbre V14) et 3,9% (arbre N1) avec une moyenne générale de $3,6 \pm 0,1\%$. L'analyse de variance au seuil de 5% montre une différence significative entre arbres ($P = 0,012$). Différence qui est certainement une conséquence de l'effet âge cambial. Les variations radiales progressent de façon significative ($P < 0,001$) avec l'âge et la disposition radiale des duramens offre respectivement les retraits moyens de $3,4 \pm 0,2\%$ (DI), $3,5 \pm 0,2\%$ (DM) et $3,7 \pm 0,2\%$ (DE). La figure 3.26 montre la différence qui existe tant entre sites qu'entre les zones écologiques (les valeurs sont en annexe page 186). La singularité revient à Mitzic qui est le seul représentant de la zone A, avec les valeurs moyennes les plus faibles des retraits linéaires. Statistiquement, on note un effet site significatif ($P = 0,006$) mais écologiquement ($P = 0,149$) au seuil de 5%, on n'a pas d'influences climatiques.
- ❖ Au niveau du retrait tangentiel total : la moyenne est de $6 \pm 0,1\%$, les valeurs extrêmes proviennent du massif forestier de M'Voum avec un minimum de 5,5% (V14) et un maximum de 6,4% (V9). Une analyse de variance au seuil de 5% révèle un comportement quasi identique avec les mêmes facteurs d'analyse que pour le retrait radial total : significatif pour l'âge cambial et la position radiale à la même probabilité ($P < 0,001$) et pas d'effet au niveau zone écologique ($P = 0,27$). Ce comportement à ce dernier niveau est induit comme on le voit sur la figure 3.26 par l'imbrication des valeurs moyennes de dispersion autour de la moyenne de l'échantillon par site. Le *T-test* confirme également qu'il n'existe pas de différence pour le facteur zone écologique ($T = -1,75$; $DL = 49$; $P = 0,087$).

Cependant les écarts entre valeurs extrêmes sont assez faibles 0,26% pour le retrait radial et 0,11% pour le retrait tangentiel. Les deux retraits linéaires sont au seuil de 5%, significativement corrélés ($R^2 = 57\%$; $P < 0,001$) ; la figure 3.27 en fait illustration. Les valeurs par arbres sont en annexe page 188.

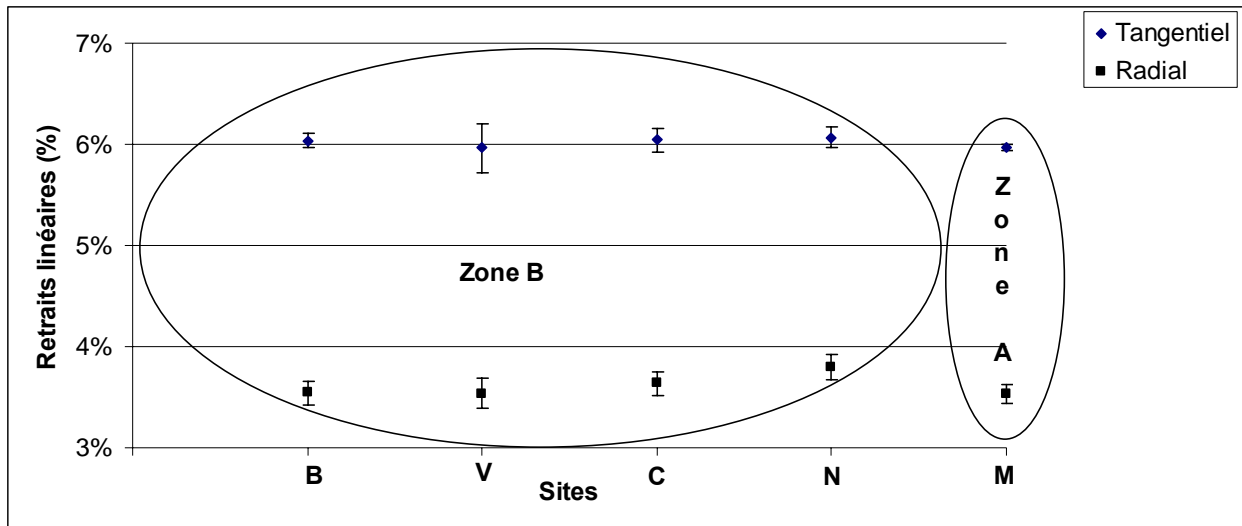


Figure 3.26 : Evolution des retraits linéaires dans les sites (B = Bokoué, V = M'Voum, C = Cocobeach, N = Ndjolé et M = Mitzié) et les 2 zones écologiques.

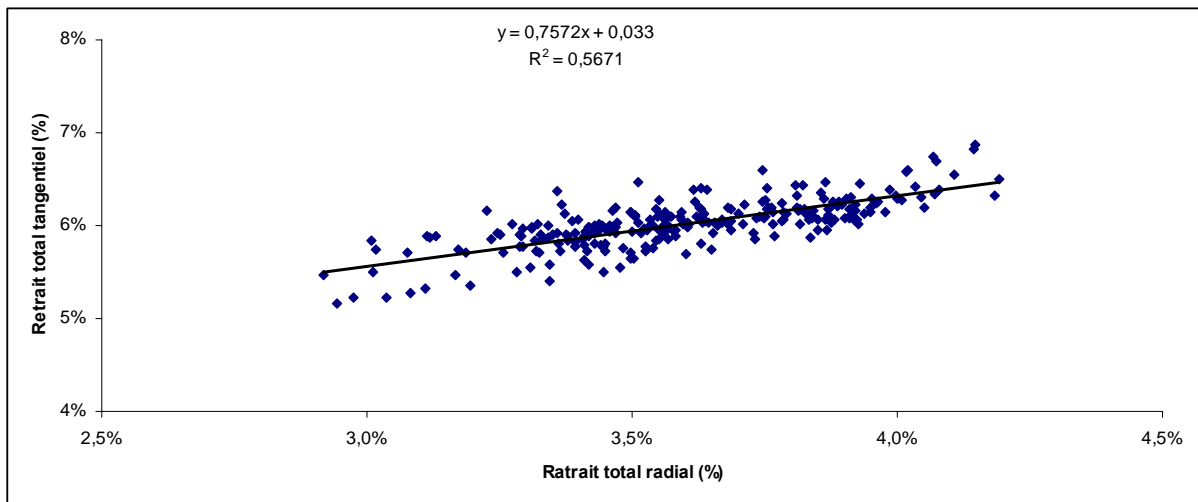


Figure 3.27 : Relation entre les retraits linéaires radial et tangentiel des 261 éprouvettes issues de 49 arbres

III-23.2 Point de saturation des fibres (PSF)

Les relations entre le retrait et la teneur en eau (W) sont linéaires pour $0 < W < \text{PSF}$. En plus quand les parois cellulaires sont saturées, la colonisation des lumens par l'eau libre ne provoque aucune déformation c'est-à-dire que pour $W > \text{PSF}$, les dimensions et le volume restent constants. La détermination du PSF du bois d'Okoumé a été réalisée numériquement à partir des trois valeurs de retrait mesurées par rapport à l'état saturé (12%, 6% et anhydre). Le PSF calculé suivant les valeurs de retrait radial est en moyenne de $30,2 \pm 1,3\%$. Il varie entre 27,4% (arbre N6) et 34,7% (arbre V14). Quant au PSF tangentiel sa moyenne de $31,1 \pm 1,4\%$ est légèrement plus élevée de 0,9% que celle résultant du retrait radial. Il varie entre 26,2% (arbre N8) et 33,6% (arbre N2).

L'analyse de variance effectuée au seuil de 5% ne révèle aucun effet pour les facteurs âge cambial et site mais une différence significative entre arbres tant pour le PSF radial ($P = 0,002$) que pour le PSF tangentiel ($P < 0,001$). Cependant le *T-test* au même seuil indique au niveau écologie un effet significatif pour le PSF radial ($T = -2,88$; $DL = 34$; $P = 0,007$) et pour le PSF tangentiel ($T = -2,16$; $DL = 33$; $P = 0,038$). La figure 3.28 met en évidence cette distinction entre les zones écologiques : la zone A entourée présente les valeurs les moins élevées quel que soit le PSF. En se référant à la faible différence des moyennes entre les deux PSF et à la figure 3.28, il est plutôt judicieux de parler d'une **zone de PSF** et non de limite ponctuelle, ce qui est conforme à la littérature (Dumoncaud 2001, Encyclopédie des métiers 2006). Une régression significative (Figure 3.29) existe entre les deux PSF ($R^2 = 0,37$; $P = 0,009$).

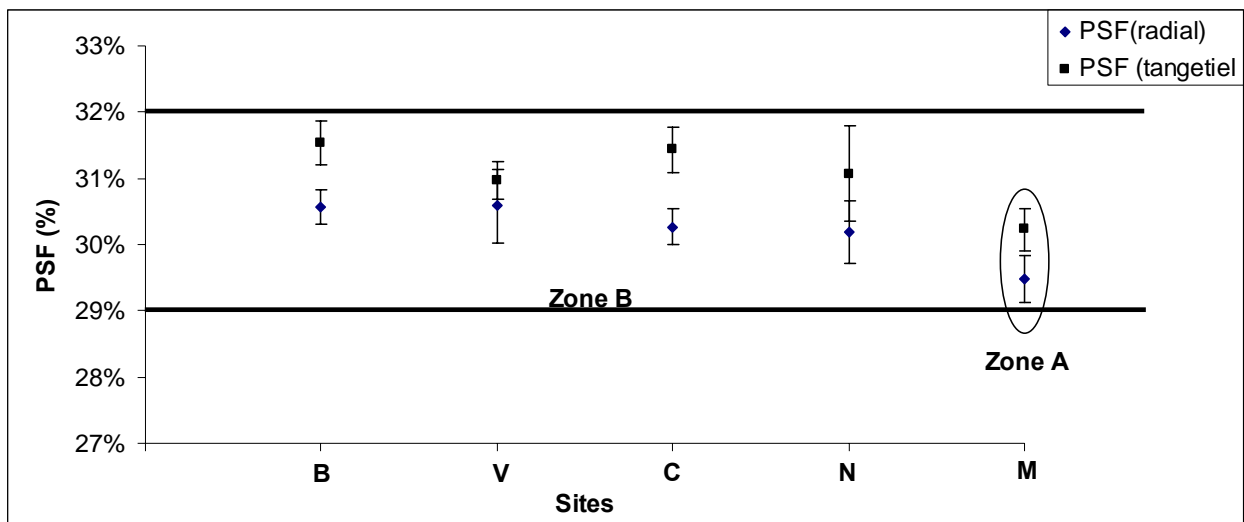


Figure 3.28 : Moyennes des retraits linéaires par sites de 261 éprouvettes provenant de 49 arbres. Les différents PSF de la zone A sont entourés.

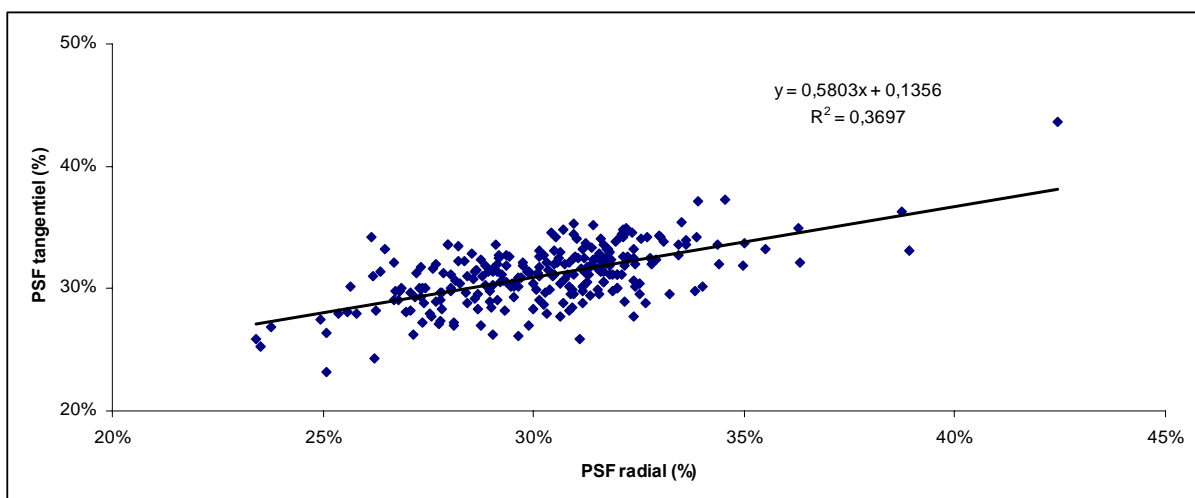


Figure 3.29 : Relation entre PSF radial et PSF tangentiel mesurés sur 261 éprouvettes provenant des 49 arbres.

III-3 Durabilité naturelle

La durabilité d'un bois est son aptitude à demeurer inaltéré dans un emploi défini, pendant une période donnée, en l'absence de tout traitement (Loubinoux *et al* 1994). Cette définition sera exploitée en faisant une projection de l'usage courant du bois d'Okoumé au Gabon comme matériau de construction.

III-31 Comportement du bois d'Okoumé face aux champignons lignivores

L'ensemble de l'action de chacun des champignons auxquels le bois d'Okoumé a été exposé (*Gloeophyllum trabeum*, *Coriolus versicolor*, *Antrodia sp* et *Pycnoporus sanguineus*) est présenté suivant la méthode expliquée au chapitre 2. Les tests ont été réalisés sur 1115 éprouvettes dont les dégradations causées sont classées selon la norme EN 350 en cinq classes : classe 1 (très durable), classe 2 (durable), classe 3 (moyennement durable), classe 4 (peu durable) et classe 5 (non durable). Les valeurs moyennes des pertes de masse sont certes, différentes en fonction de chaque micro-organisme mais dans l'ensemble le bois d'Okoumé est moyennement résistant vis-à-vis des champignons utilisés.

L'évaluation de la durabilité naturelle a été réalisée à partir d'une méthode de laboratoire dite « boîte de pétri ». Pour la fiabilité de la méthode mise au point au laboratoire, il a été également entrepris parallèlement un test de biodégradation selon la norme EN 350-1. Cet essai normatif édifiera et guidera quant à l'application de la méthode de laboratoire. Le champignon *Antrodia sp* et les arbres issus des plantations ont été utilisés pour vérifier si la nouvelle méthode est valide. Le choix est porté sur cette souche fongique à cause de son action sur le teck qui est une essence tropicale classée par la norme EN 350-1 comme très durable (Kokutse 2006). En revanche le choix des arbres des plantations est relatif au contexte de la présente étude.

III-31.1 Méthodes de durabilité utilisées

La méthode de travail utilisée s'inspire fortement de la norme EN 350. Une méthode de laboratoire dite « boîte de pétri » qui permettait d'obtenir des résultats en temps et avec un équipement réduit a été pratiquée.

Le résultat de la méthode normalisée est confronté exclusivement au résultat obtenu des bois de plantations, réalisé dans les boîtes de pétri. Quelle que soit la qualification de la perte de masse ou de la méthode effectuée, 70% des éprouvettes sont au dessus de la classe 4 dont les pertes de masse pour la norme EN 350 sont de 70% en absolue et de 72% en relative et pour la méthode laboratoire de 84% en absolue et de 75% en relative (Figure 3.30). En terme de perte de masse absolue, on obtient respectivement une moyenne de $16 \pm 0,6\%$ pour la méthode de laboratoire et de $18 \pm 0,2\%$ pour la norme EN 350. Les deux méthodes placent le bois d'Okoumé en classe 3 (moyennement durable). S'agissant des pertes de masse relatives moyennes, le classement de l'Okoumé reste inchangé mais la norme EN 350 présente un avantage ($0,39 \pm 0,04$) par rapport à la méthode laboratoire ($0,51 \pm 0,02$). Ce résultat conforte le précédent classement de l'Okoumé en classe 3 (moyennement durable). Malgré une perte de masse de 2% au dessus de la méthode « boîte de pétri », l'analyse de variance au seuil de 5% ne révèle pas de différence significative entre les deux méthodes ($P = 0,15$). Cette probabilité montre que la méthode mise au point au laboratoire est **applicable**. L'évaluation de la durabilité naturelle a donc été par la suite effectuée par la méthode dite « boîte de pétri ».

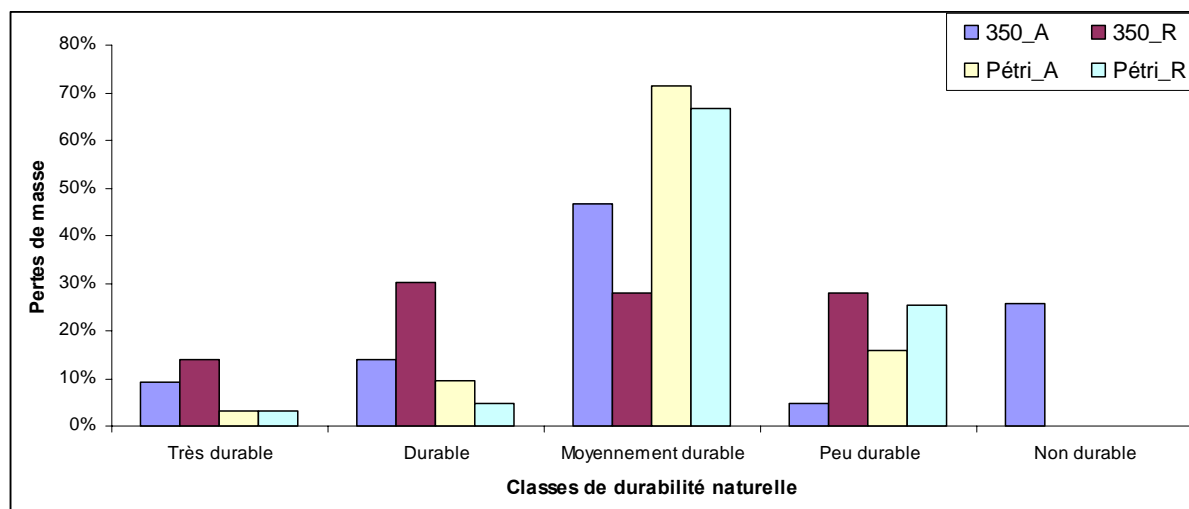


Figure 3.30 : Confrontation des résultats (pertes de masse absolues et relatives) occasionnés par *Antrodia sp* selon la norme EN 350 et la méthode de laboratoire « boîte de pétri ». 350=norme EN, Pétri=boîte de pétri, A=perte de masse absolue et R=perte de masse relative.

III-31.2 Durabilité de l'Okoumé vis-à-vis de *Gloeophyllum trabeum*

Le comportement de l'Okoumé face au *Gloeophyllum trabeum* (champignon de pourriture cubique des zones tempérées) a été évalué sur 277 éprouvettes issues de 54 arbres répartis en 2 écosystèmes (naturel et artificiel). Le calcul de la perte de masse absolue donne des valeurs oscillant entre 1,14% et 62,07% pour une moyenne de $13,2 \pm 0,5\%$.

La répartition chiffrée en fonction des classes de durabilité (Figure 3.31), est en valeur numérique de 2% d'éprouvettes en classe 1, 31% en classe 2 ; 61% en classe 3 ; 5% en classe 4 et 1% en classe 5. *G. trabeum* a affecté en moyenne de 24% l'essence de référence (Hêtre). Ce résultat permet d'évaluer l'action de ce champignon en perte de masse relative qui est la perte de masse absolue de l'essence testée (Okoumé) rapportée à celle de l'essence témoin (Hêtre). Il a été trouvé des pertes de masse relatives variant de 0,05 à 2,59 avec une moyenne générale de $0,55 \pm 0,02$ classant le bois d'Okoumé moyennement durable. Les proportions par classe de durabilité se présentent comme suit : 1% très durables, 6% durables, 64% moyennement durables, 26% peu durables et 4% non durables. Le récapitulatif offre 94% d'éprouvettes au dessus de la classe 4. Ce résultat est revu à la baisse en terme de perte de masse relative soit 70% (-24%). L'action des trois autres champignons sera résumée en suivant ce canevas.

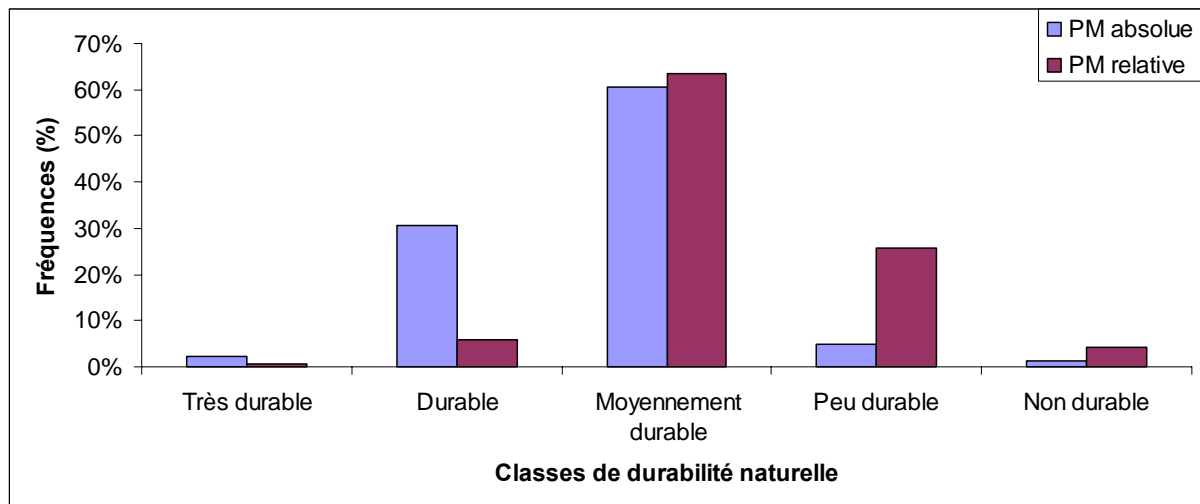


Figure 3.31 : Distribution des pertes de masse absolue et relative causées par *Gloeophyllum trabeum* sur l'Okoumé avec 277 éprouvettes provenant de 54 arbres (PM = perte de masse)

III-31.3 Durabilité de l'Okoumé vis-à-vis de *Coriolus versicolor*

Coriolus versicolor est un champignon de pourriture fibreuse des zones tempérées auquel 275 éprouvettes d'Okoumé provenant de 54 arbres ont été soumises. La mesure de la durabilité naturelle vis-à-vis de ce champignon a donné des pertes de masse absolues variant de 2,4% à 58,82% dont une moyenne générale de $17,03 \pm 0,6\%$. La répartition des éprouvettes par proportion (Figure 3.32) de classes est de 1% (classe 1), 18% (classe 2), 61% (classe 3), 13% (classe 4) et 7% (classe 5). Cette dernière fréquence reste inchangée pour la classe 5 en terme de perte de masse relative. Pour une perte de masse absolue de 33% (Hêtre), l'Okoumé a présenté respectivement en perte de masse relative 1% d'éprouvettes très durables, 14% durables, 60% moyennement durables, 18% peu durables.

Dans ce registre, il a été calculé un intervalle de perte de masse allant de 0,07 à 1,81% avec une moyenne de $0,52 \pm 0,02$, classant le bois d'Okoumé moyennement durable. En se limitant à la classe de durabilité moyenne, 80% d'éprouvettes d'Okoumé sont présentes en perte de masse absolue contre 75% en perte de masse relative (-5%).

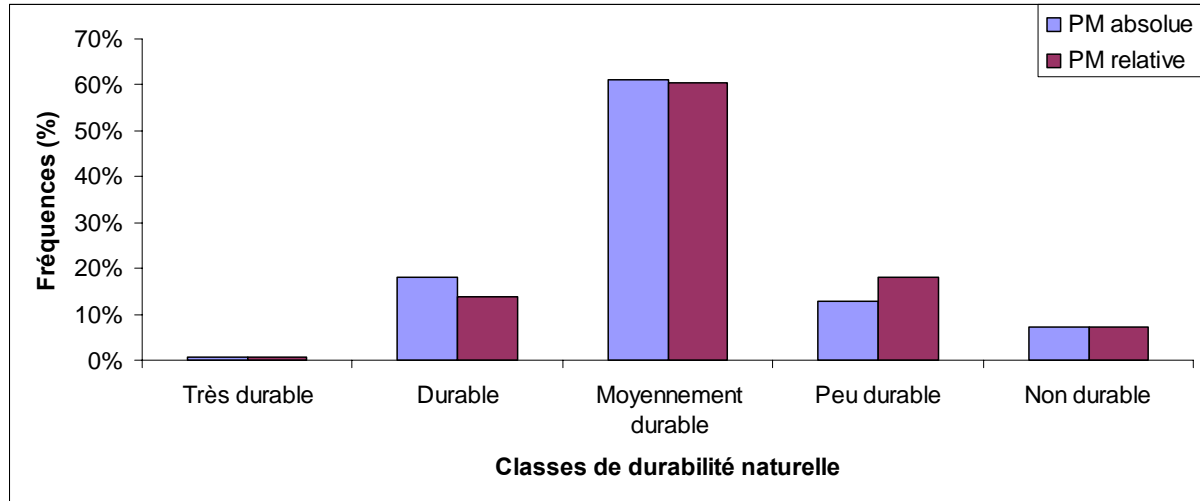


Figure 3.32 : Distribution des pertes de masse absolue et relative causées par *Coriolus versicolor* sur l'Okoumé (275 éprouvettes de 54 arbres).

III-31.4 Durabilité de l'Okoumé vis-à-vis de *Antrodia sp*

Antrodia sp est une pourriture cubique des régions tropicales qui a été utilisée pour tester le comportement du bois d'Okoumé face à une pourriture blanche des zones tropicales. Les éprouvettes (279) en provenance des 5 sites d'intérêt (Bokoué, M'Voum, Cocobeach, Ndjolé et Mitzic) ont été exposées. La durabilité naturelle mesurée donne des pertes de masse absolue évoluant de 2,31% jusqu'à 53,06% pour une moyenne globale de $18,8 \pm 0,7\%$. La synthèse des résultats (Figure 3.33) représente en valeur : 1% d'éprouvettes très durables, 11% de durables, 59% de moyennement durables, 19% de peu durables et 10% de non durables. Le résultat de perte de masse absolue (31%) due à la dégradation de l'essence de référence (Hêtre), a permis en mettant son inverse en facteur de la perte de masse absolue de l'Okoumé de calculer les pertes de masse relatives. Elles varient de 0,07 à 1,7 dont une moyenne de $0,6 \pm 0,02$ classant le bois d'Okoumé moyennement durable dont la répartition chiffrée est de 1% (classe 1), 6% (classe 2), 54% (classe 3), 26% (classe 4) et 13% (classe 5). En terme de perte de masse absolue 71% des éprouvettes d'Okoumé sont au dessus de la 4^e classe, contre 61% en perte de masse relative (-10%). Il est à remarquer la tendance vers les classes inférieures de *C. versicolor* et *Antrodia*.

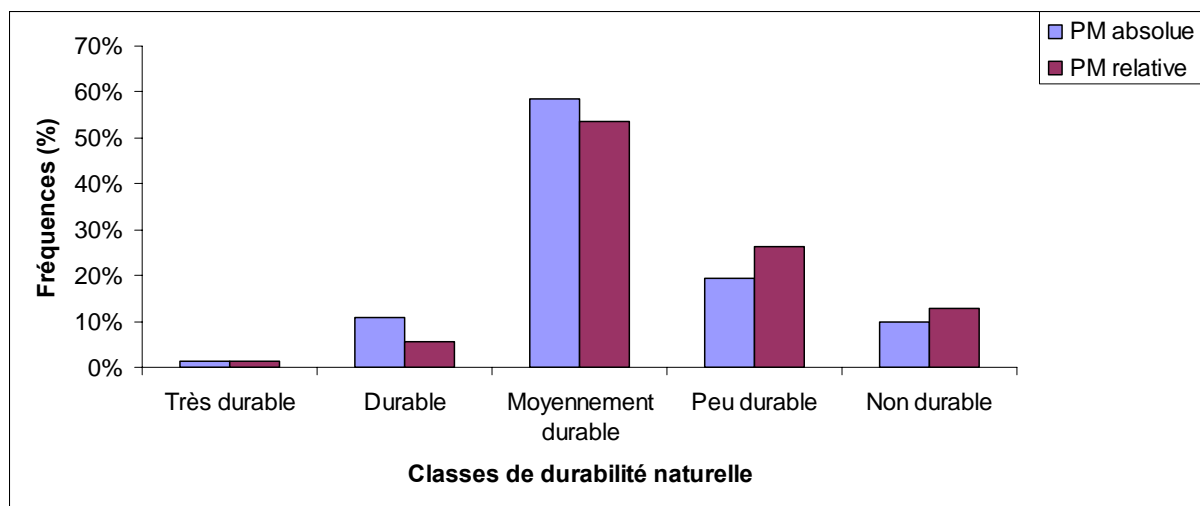


Figure 3.33 : Distribution des pertes de masse absolue et relative causées par *Antrodia sp* sur l'Okoumé (279 éprouvettes de 54 arbres).

III-31.5 Okoumé et *Pycnoporus sanguineus*

Pycnoporus sanguineus est une pourriture fibreuse d'origine tropicale à laquelle 284 éprouvettes d'Okoumé ont été exposées. Les résultats obtenus en terme de perte de masse absolue varient entre (-2,41%) et 40,52% dont une moyenne de $12,67 \pm 0,6\%$. Les résultats occasionnés par *P. sanguineus* sur l'Okoumé (Figure 3.34) se présentent aux proportions de 17% (classe 1), 19% (classe 2), 53% (classe 3), 10% (classe 4) et 1% (classe 5). En terme de perte de masse relative, on note un changement notable pour la classe durable qui passe à 28% (+9%) d'éprouvettes et la classe peu durable qui recule à 1% (-9%). Les trois autres classes restent inchangées. Le Hêtre a présenté une perte de masse absolue de 40% conduisant les pertes de masse relatives des éprouvettes d'Okoumé de (-0,06) à 1 pour une moyenne générale de $0,31 \pm 0,01$ classant le bois d'Okoumé moyennement durable.

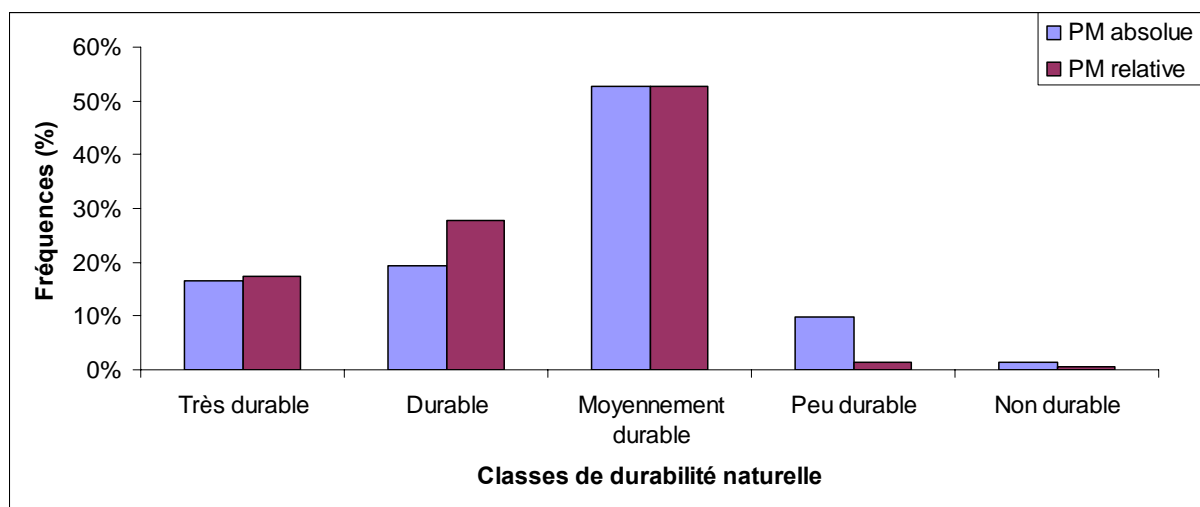


Figure 3.34 : Distribution des pertes de masse absolue et relative causées par *Pycnoporus sanguineus* sur l'Okoumé. (284 éprouvettes de 54 arbres, PM = perte de masse)

Le bois d'Okoumé présente une résistance moyenne (classe 3) quelle que soit la position dans l'arbre (duramens interne, intermédiaire et externe) vis-à-vis des champignons auxquels il a été exposé (Tableau 3.2). Il ressort également de ce tableau que :

- ❖ L'Okoumé des plantations offre une meilleure résistance que celui en provenance de la forêt naturelle face au *C. versicolor*, *Antrodia sp*, et *P. sanguineus* que vis-à-vis de *G. trabeum* bien qu'il n'existe pas de différence significative entre les provenances d'arbres pour cette souche fongique,
- ❖ *Antrodia* a plus occasionné de dégâts particulièrement en forêt naturelle.

	<i>G. trabeum</i>		<i>C. versicolor</i>		<i>Antrodia sp</i>		<i>P. sanguineus</i>	
	$\bar{x} \pm \sigma_x$	C	$\bar{x} \pm \sigma_x$	C	$\bar{x} \pm \sigma_x$	C	$\bar{x} \pm \sigma_x$	C
Plantations	13,6±1% <i>0,57±0,04</i>	3 3	15,2±0,6% <i>0,47±0,02</i>	3 3	15,9±0,6% <i>0,51±0,02</i>	3 3	11,4±0,7% <i>0,28±0,02</i>	2 2
Forêt naturelle	12,8±0,5% <i>0,53±0,02</i>	3 3	18,6±0,9% <i>0,57±0,03</i>	3 3	21,1±1,1% <i>0,68±0,04</i>	4 4	13,8±0,9% <i>0,34±0,02</i>	3 3
Okoumé	13,2±0,5% <i>0,55±0,02</i>	3 3	17±0,6% <i>0,52±0,03</i>	3 3	18,8±0,7% <i>0,6±0,02</i>	3 3	12,7±0,6% <i>0,31±0,01</i>	3 3

Tableau 3.2 : Moyennes et écarts types des pertes de masse absolues et relatives (italique) en plantation et en forêt naturelle et sur l'Okoumé occasionnés par les 4 champignons utilisés (C=classe de durabilité).

III-32 Variabilité intra-arbre de la durabilité naturelle de l'Okoumé face aux champignons lignivores

Les résultats relatifs à l'action de chaque champignon dans le bois d'Okoumé suivant un gradient radial de la moelle vers l'aubier (exclu) sont présentés ci-après. Les éprouvettes proviennent de 23 arbres (5 de Bokoué, 5 de M'Voum, 5 de Cocobeach, 5 de Ndjolé et 3 de Mitzic). Les paramètres examinés sont : l'âge cambial, les différents duramens (interne, intermédiaire et externe), l'arbre (composante) et le site. Ce dernier paramètre est utilisé pour la représentation graphique.

III-32.1 Variabilité dans l'arbre vis-à-vis de *Gloeophyllum trabeum*

L'évaluation de la durabilité du bois d'Okoumé a été réalisée sur 169 éprouvettes issues des cinq sites (Bokoué, M'Voum, Cocobeach, Ndjolé et Mitzic). L'âge cambial a une influence significative sur la résistance de l'Okoumé face à *G. trabeum* ($P < 0,001$) mais cet effet ne se traduit pas dans l'ensemble du lot sur les différents duramens ($P = 0,1$). Cependant, on note une décroissance de la durabilité du duramen externe vers le duramen interne.

Le regroupement par site des mesures de durabilité issues des arbres reflète cette tendance (Figure 3.35), à l'exception de Bokoué où la perte de masse absolue croît du duramen interne au duramen externe. L'effet arbre n'est pas significatif ($P = 0,097$) mais l'interaction entre positions radiales et le site est presque significatif. Le comportement des différents duramens est significatif pour les sites de M'Voum ($P < 0,001$), de Ndjolé ($P = 0,042$) et de Mitzic ($P = 0,001$).

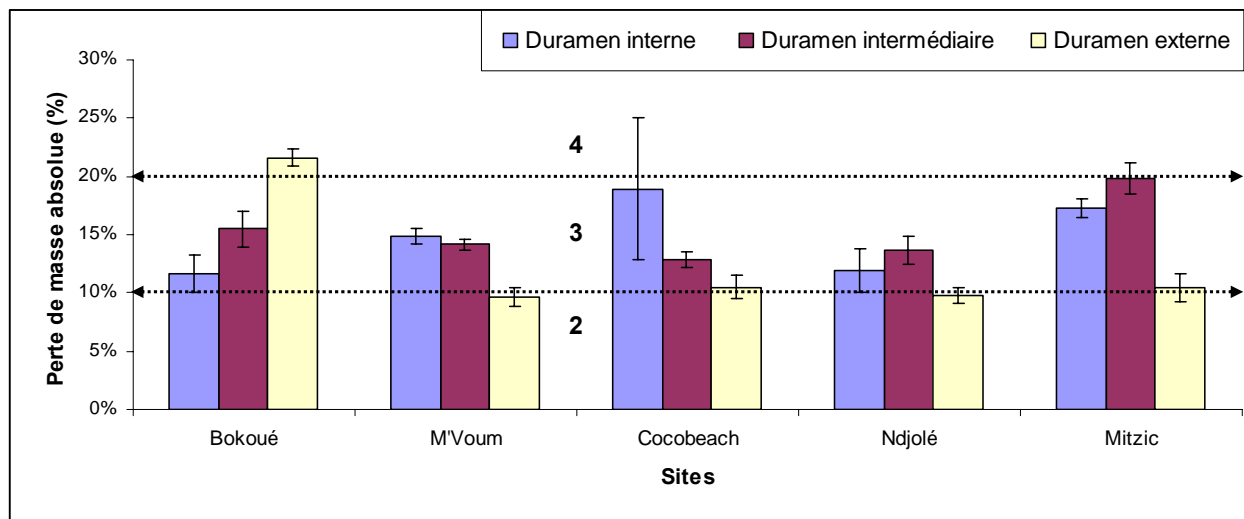


Figure 3.35 : Variabilité intra-arbre des pertes de masse absolues causées par *Gloeophyllum trabeum* sur 169 éprouvettes provenant de 23 Okoumé, reproduite en fonction des 5 sites. (2=durable, 3= moyennement durable, 4= peu durable)

III-32.2 Variabilité vis-à-vis de *Coriolus versicolor*

La variabilité radiale des pertes de masse absolues de 165 éprouvettes d'Okoumé exposée au *C. versicolor* offre selon les 5 sites une évolution en 2 classes de durabilité. La figure 3.37 présente la dominance de la classe 3 (moyennement durable) sur la classe 4 (peu durable). Ce champignon a plus occasionné de pertes de masse (absolue) sur le duramen externe (valeurs en annexe page 192) sur trois sites (figure 3.36) mais il n'y a pas d'effet significatif de ce facteur ($P = 0,128$) sur le comportement de *C. versicolor*. Il n'existe pas non plus d'effet significatif de la disposition radiale du duramen ($P = 0,128$); néanmoins l'action de ce champignon a un effet arbre significatif ($P = 0,009$).

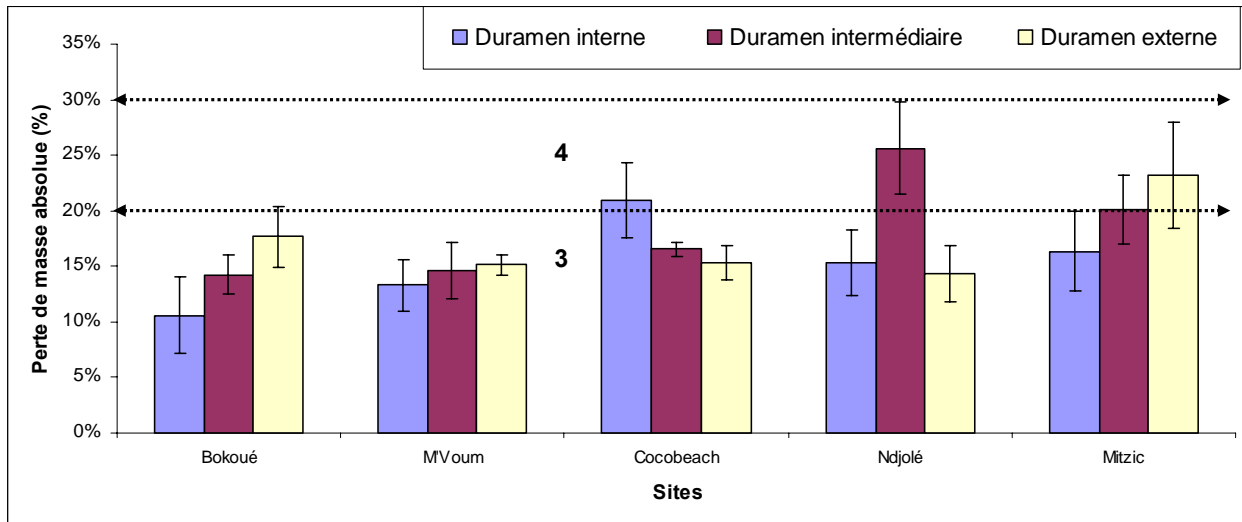


Figure 3.36 : Variabilité intra-arbre des pertes de masse absolues causées par *Coriolus versicolor* sur 165 éprouvettes provenant de 23 Okoumé, reproduite en fonction des 5 sites.

III-32.3 Variabilité vis-à-vis de *Antrodia sp*

En terme de perte de masse absolue, la mesure sur un gradient radial de la durabilité naturelle de l'Okoumé offre une progression de la résistance du duramen interne vers le duramen externe de 3 sites sur 5 (Figure 3.37). Cependant la position radiale de l'éprouvette n'influence pas la résistance vis-à-vis de ce champignon ($P = 0,71$) ; on note néanmoins un effet significatif sur les éprouvettes de Mitzic ($P < 0,001$). Les dégâts occasionnés sur le gradient horizontal par *C. versicolor* sont significativement influencés par l'origine de l'éprouvette, c'est-à-dire site ($P = 0,009$) et arbre ($P < 0,001$).

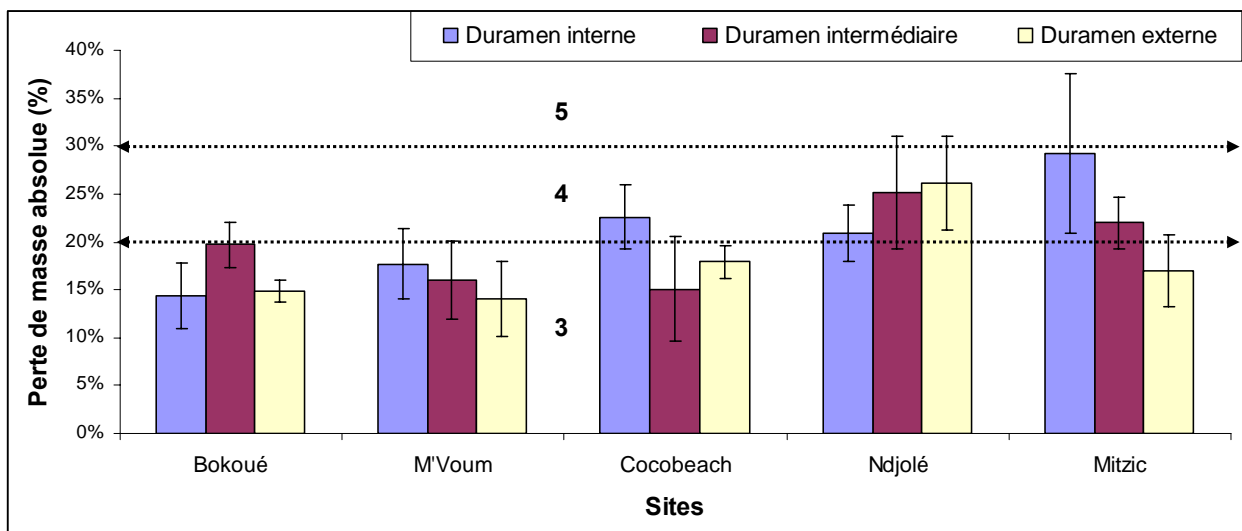


Figure 3.37 : Variabilité intra-arbre des pertes de masse absolues causées par *Antrodia sp* sur 170 éprouvettes provenant de 23 Okoumé, reproduite en fonction des 5 sites.

III-32.4 Variabilité vis-à-vis de *Pycnopus sanguineus*

Les variations intra-arbre de l'Okoumé face à *P. sanguineus* ont été mesurées sur 175 éprouvettes. La position horizontale de l'échantillon n'a pas d'effet remarquable ($P = 0,717$). Le comportement au niveau géographique (site) est plutôt hétérogène (Figure 3.38), ce qui est confirmé statistiquement ($P = 0,046$). A l'exception des éprouvettes de Mitzic (duramen externe) la totalité des moyennes de perte de masse absolue par site des éprouvettes se situe au dessus de la classe 4 (peu durable) mais en dessous de la classe 1 (très durable).

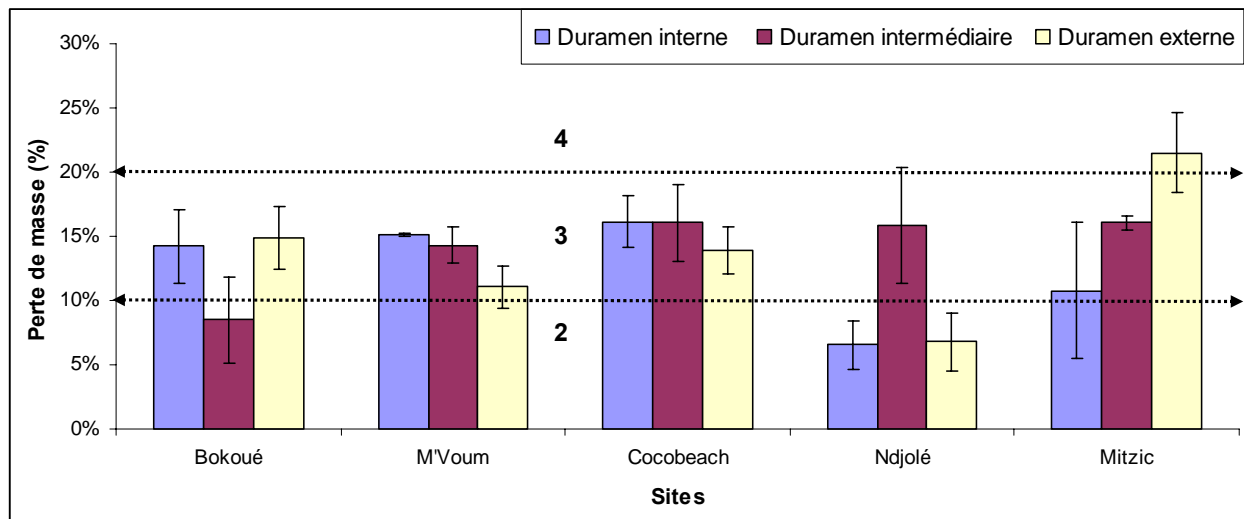


Figure 3.38 : Variabilité intra-arbre des pertes de masse absolues causées par *Pycnopus sanguineus* sur 175 éprouvettes provenant de 23 Okoumé, reproduite en fonction des 5 sites.

III-33 Variabilité inter-arbre de l'Okoumé

Rappelons que la durabilité individuelle par sujet a été observée sur une seule position radiale (duramen externe) de l'arbre. La mesure de la résistance de l'Okoumé face aux champignons lignivores a été réalisée sur 760 éprouvettes provenant de 54 arbres toutes origines confondues (valeurs en annexe page 194). Les arbres du lot qui a servi à l'évaluation de la variabilité radiale font également partie de ce groupe appelé lot inter-arbre. Tous les tests statistiques sont faits au seuil de 5%.

III-33.1 Variabilité face à *Gloeophyllum trabeum*

La variabilité inter-arbre de l'Okoumé vis-à-vis de *G. trabeum* mesurée sur 189 éprouvettes a donné en perte de masse absolue une moyenne de $12,6 \pm 1\%$, variant de 5% (arbre V13) à 61% (arbre B2). Quatre arbres se trouvent en dessous de la classe 3 (figure 3.39). Les pertes de masse absolues de l'Okoumé rapportées à celle (24%) de l'essence de référence (Hêtre) offrent des pertes de masse relatives variant entre 0,23 et 2,53 pour une moyenne de

0,53 ± 0,04 positionnant l'Okoumé en classe 3. Cette conversion en valeur relative a entraîné 4 autres arbres en dessous de la classe de durabilité moyenne.

Quel que soit le type de perte de masse, les arbres de Mitzic se situent entre les classes 2 et 3. L'appartenance à tel ou tel écosystème n'influence en rien l'action du champignon. Cependant la résistance de l'Okoumé est légèrement moins élevée en plantation ($13,7 \pm 2\%$ en perte de masse absolue et $0,57 \pm 0,08$ en perte de masse relative) qu'en forêt naturelle ($11,4 \pm 0,5\%$ et $0,48 \pm 0,02$). L'origine géographique influence significativement ($P = 0,034$) la résistance de l'Okoumé vis-à-vis de ce champignon. Il est également noté un effet arbre significatif ($P < 0,001$). C'est la seule souche fongique devant laquelle le bois d'Okoumé de la forêt naturelle a présenté un meilleur comportement.

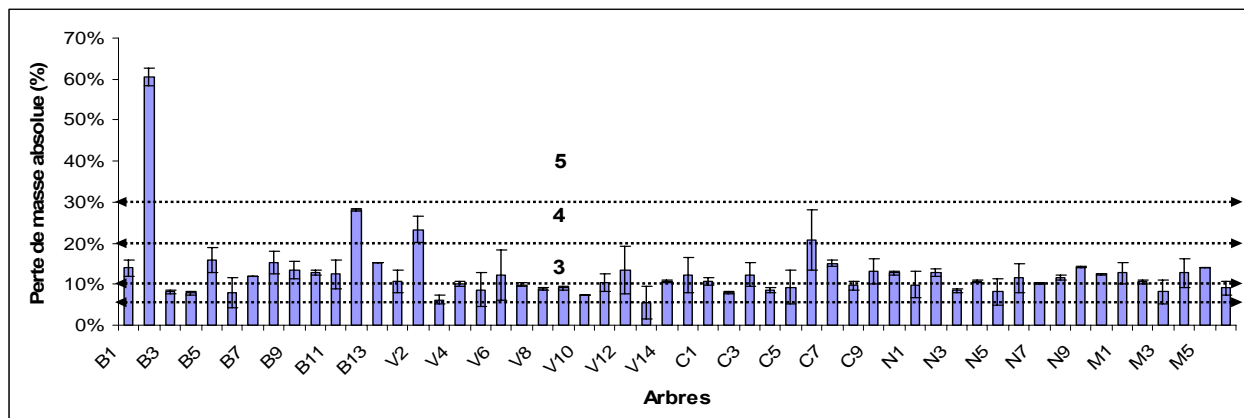


Figure 3.39 : Moyennes de pertes de masse absolues causées par *Gloeophyllum trabeum* sur l'Okoumé (189 éprouvettes provenant de 54 arbres)

III-33.2 Variabilité face à *Coriolus versicolor*

Les variations de la durabilité entre arbres chez l'Okoumé vis-à-vis de *C. versicolor* ont été testées sur 188 éprouvettes issues de 54 arbres. Suivant les classes de durabilité définies par la norme EN 350, les dégâts causés par ce champignon se situent de la classe 2 à la classe 5. En terme de perte de masse absolue, 67% d'arbres se trouvent en classe 3 (moyennement durable), 7 arbres en classe 4 et 2 arbres en classe 5 provenant tous de la forêt naturelle. Les pertes de masse évoluent de 6,2% (arbre V10) à 33,7% (arbre M2), pour une moyenne de $16,3 \pm 0,9\%$ classant le bois d'Okoumé en classe de durabilité moyenne. Ce classement est confirmé en perte de masse relative avec une moyenne de **0,5 ± 0,03**. Dans ce registre les valeurs des arbres varient de 0,19 à 1,16. L'analyse de variance révèle un effet arbre significatif ($P < 0,001$), ce qui n'est pas le cas pour la situation géographique ($P = 0,162$) et la provenance écologique ($P = 0,327$). Bien que statistiquement non significative, une distinction de comportement de l'Okoumé face à cette souche fongique est néanmoins à noter (Figure

3.40). L'écosystème artificiel est plus résistant avec une perte de masse de 15,2% contre 17,7% en forêt naturelle.

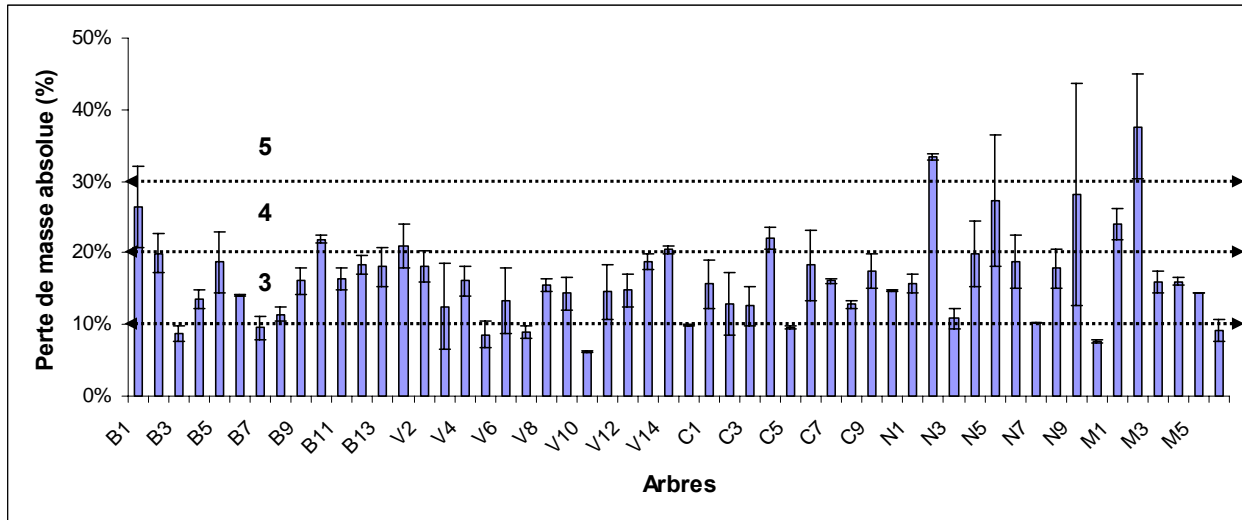


Figure 3.40 : Moyennes de pertes de masse absolues causées par *Coriolus versicolor* sur l'Okoumé (188 éprouvettes provenant de 54 arbres)

III-33.3 Variabilité face à *Antrodia sp*

L'évaluation de la résistance du bois d'Okoumé face à *Antrodia sp* est effectuée sur 190 éprouvettes de 54 arbres. Le regroupement des résultats par arbres a conduit à une classification en 5 classes de durabilité (norme EN 350) en fonction des dégâts occasionnés par cette souche tropicale. En terme de perte de masse absolue, 63% des arbres se trouvent en classe 3 (moyennement durable). On note cependant (figure 3.41), 10 représentants en classe 4 (peu durable) et 3 en classe 5 (non durable). Les moyennes par arbre varient de 3,4% (B3) à 39,7% (N5) avec une moyenne générale de $17,7 \pm 0,9\%$. Quant à la perte de masse relative, la classe 3 demeure dominante (61%) mais perd trois arbres au profit de la classe inférieure adjacente (12 arbres) qui concède un arbre à la classe 5 (4 arbres). Les valeurs de pertes de masse à l'arbre oscillent entre 0,11 et 1,27 dont une moyenne de $0,57 \pm 0,03$ classant l'Okoumé comme bois moyennement durable.

L'action d'*Antrodia* diffère significativement d'un arbre à un autre ($P = 0,002$). L'origine territoriale influence activement l'aptitude à la résistance de l'Okoumé face à ce champignon ($P = 0,009$), induisant un effet écosystème ($P = 0,002$).

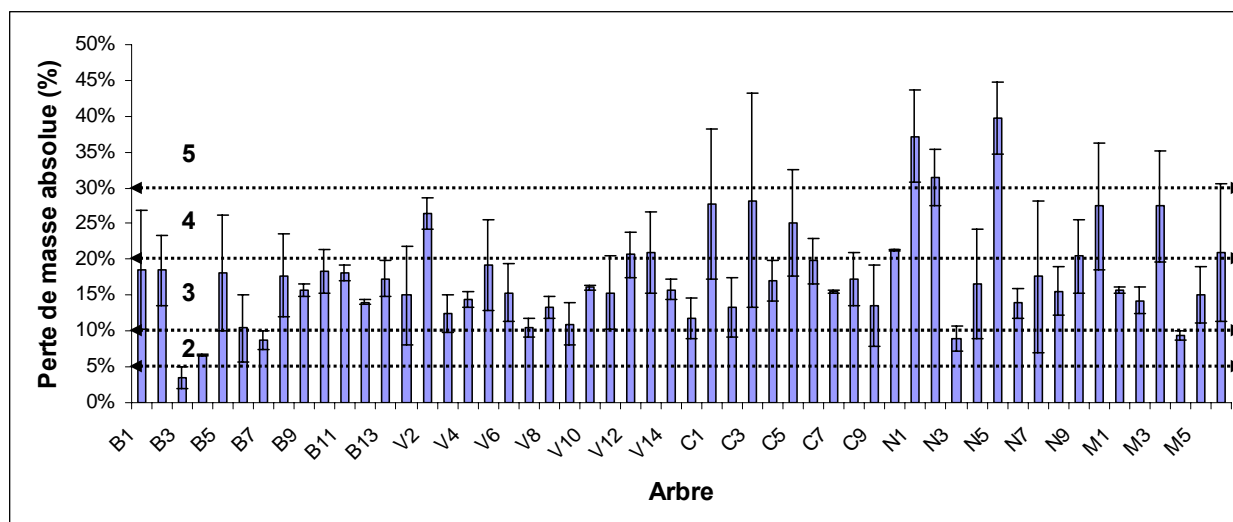


Figure 3.41 : Moyennes de pertes de masse absolues causées par *Antrodia sp* sur l'Okoumé (190 éprouvettes provenant de 54 arbres)

III-33.4 Variabilité face à *Pycnoporus sanguineus*

Des éprouvettes d'Okoumé au nombre de 193 ont été exposées à *P. sanguineus*. L'action de ce dernier s'étale de la classe 1 à la classe 4 (Figure 3.42), même avec l'intervention de la perte de masse de l'essence de référence (40%). L'Okoumé a présenté une meilleure résistance face à cette souche fongique. Ainsi, on retrouve classés en perte de masse absolue 15% d'arbres très durables, 24% durables, 52% moyennement durables et 9% peu durables. La moyenne de perte de masse est à $11,9 \pm 0,8\%$. En revanche, en perte de masse relative les classes 1 et 2 gagnent respectivement en représentants (+2%) et (+15%). Les classes 3 et 4 perdent chacune (-9%) et (-7%) d'arbres entraînant une moyenne relative de $0,3 \pm 0,02$ qui classe l'Okoumé comme bois durable. La dégradation de l'Okoumé par *P. sanguineus* diffère significativement au niveau : arbres ($P < 0,001$), site ($P = 0,001$), écosystème ($P = 0,026$) et zone climatique ($P = 0,028$).

Le tableau 3.3 présente un bilan de l'état de la résistance de l'Okoumé vis-à-vis des 4 souches fongiques utilisées. *Antrodia sp* a occasionné plus de dégâts (17,7%), suivi de *Coriolus versicolor* (16,3%) en terme de perte de masse absolue. Les arbres des plantations ont un meilleur comportement défensif quel que soit le type de pourriture, la primauté revenant aux arbres des sites de M'voum. L'Okoumé en provenance de la zone climatique A est plus vulnérable. Fort est de constater que toutes les moyennes en perte de masse se situent entre 12% et 18%. Par conséquent on peut dire que le bois d'Okoumé est moyennement durable (classe 3) comme le classe l'ATIBT (1986).

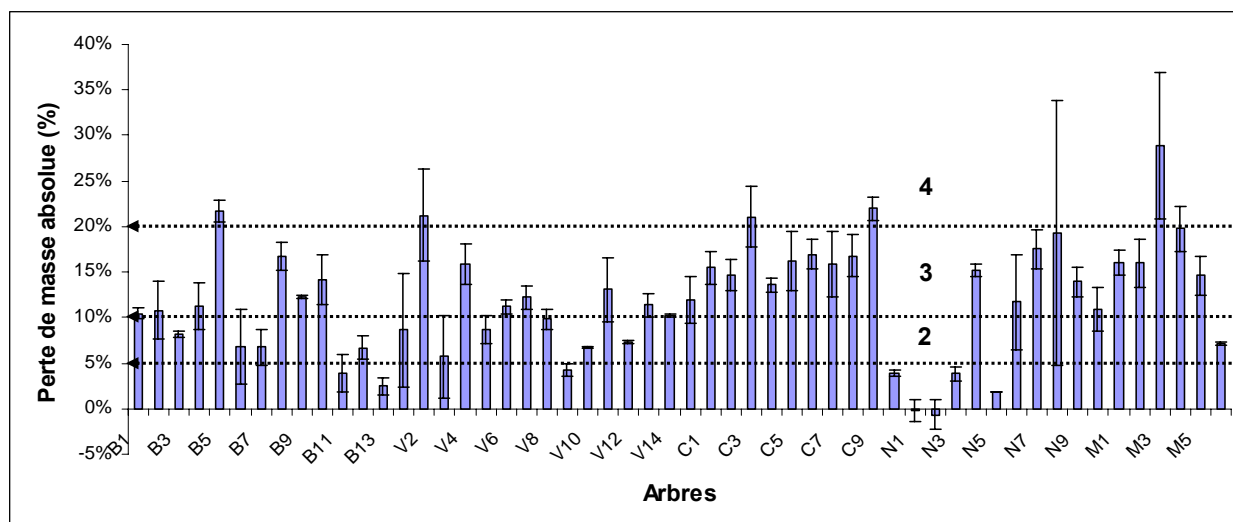


Figure 3.42 : Moyennes de pertes de masse absolues causées par *Pycnoporus sanguineus* sur l'Okoumé (193 éprouvettes provenant de 54 arbres).

	<i>G. trabeum</i>		<i>C. versicolor</i>		<i>Antrodia sp</i>		<i>P. sanguineus</i>	
	$\bar{x} \pm \sigma_x$	C	$\bar{x} \pm \sigma_x$	C	$\bar{x} \pm \sigma_x$	C	$\bar{x} \pm \sigma_x$	C
Bokoué	17,2±3,9% <i>0,72±0,16</i>	3 4	16,4±1,4% <i>0,5±0,04</i>	3 3	14,3±1,5% <i>0,46±0,05</i>	3 3	10,2±1,5% <i>0,26±0,03</i>	2 2
M' Voum	10,6±1% <i>0,44±0,5</i>	3 3	14,2±1,1% <i>0,44±0,04</i>	3 3	15,9±1,1% <i>0,51±0,04</i>	3 3	10,6±1,1% <i>0,26±0,03</i>	3 2
Cocobeach	12±1,2% <i>0,5±0,05</i>	3 3	15,2±1,1% <i>0,47±0,03</i>	3 3	19,9±1,8% <i>0,64±0,06</i>	3 4	15,7±1,6% <i>0,39±0,04</i>	3 3
Ndjolé	11±0,6% <i>0,46±0,02</i>	3 3	19±2,7% <i>0,58±0,08</i>	3 3	22,9±3,3% <i>0,73±0,1</i>	4 4	9,3±2,4% <i>0,23±0,06</i>	2 2
Mitzic	11,2±1% <i>0,47±0,04</i>	3 3	19,5±4,1% <i>0,6±0,13</i>	3 3	17,1±2,6% <i>0,55±0,08</i>	3 3	17,1±2,9% <i>0,42±0,07</i>	3 3
Plantation	13,7±2% <i>0,57±0,08</i>	3 3	15,2±0,9% <i>0,47±0,03</i>	3 3	15,1±0,9% <i>0,49±0,03</i>	3 3	10,4±0,9% <i>0,26±0,02</i>	2 2
Forêt naturelle	11,4±0,5% <i>0,48±0,02</i>	3 3	17,7±1,4% <i>0,54±0,04</i>	3 3	20,4±1,6% <i>0,65±0,05</i>	3 4	13,6±1,4% <i>0,34±0,04</i>	3 3
Zone A	11,2±1% <i>0,47±0,04</i>	3 3	19,5±4,1% <i>0,6±0,13</i>	3 3	17,1±2,6% <i>0,55±0,08</i>	3 3	17,1±2,9% <i>0,42±0,07</i>	3 3
Zone B	12,8±1,2% <i>0,53±0,05</i>	3 3	16±0,9% <i>0,49±0,02</i>	3 3	17,7±1% <i>0,57±0,03</i>	3 3	11,2±0,8% <i>0,28±0,02</i>	3 2
Okoumé	12,6±1% <i>0,53±0,04</i>	3 3	16,3±0,9% <i>0,5±0,03</i>	3 3	17,7±0,9% <i>0,57±0,03</i>	3 3	11,9±0,8% <i>0,3±0,02</i>	3 2

Tableau 3.3 : Bilan variabilité inter arbre de l'Okoumé en perte de masse absolue et relative (italique) en fonction des provenances. C=classe de durabilité (norme EN 350).

III-4 Détermination de la limite bois juvénile/bois adulte (BJ/BA)

Elle est réalisée par la méthode de régression linéaire segmentée. Mathématiquement un point d'inflexion (ou de cassure) est indiqué selon le caractère mis en confrontation avec l'âge cambial. Certains caractères émergents (longueur de fibre, retrait longitudinal total et diamètre des vaisseaux) définis par Nepveu (1994) ont principalement été utilisés. Cette méthode définit en plus du point d'inflexion les sous ensembles des valeurs qui caractérisent chaque type de bois. Rappelons que la limite BJ/BA varie en fonction du caractère utilisé (Zobel et Sprague 1998).

III-41 Evaluation des caractéristiques morphologiques des fibres d'Okoumé

L'analyse des caractères morphologiques a été réalisée sur 331876 fibres. La largeur moyenne de la fibre d'Okoumé varie entre 18 et 29 μm . Quant à la longueur, elle oscille en moyenne entre 820 et 1160 μm . Une régression polynomiale d'ordre 3 a été utilisée pour exprimer le profil de la longueur de fibres (Koubaa *et al.* 2004, Alteyrac *et al.* 2006). L'allure se répartit en trois étapes consécutives pour l'ensemble des fibres des deux sites (Figure 3.43) en fonction de l'âge cambial :

- ❖ Etape 1 : du cerne 1 au cerne 25, on a une croissance importante de la longueur de fibres,
- ❖ Etape 2 : du cerne 25 au cerne 31, on observe un ralentissement de la croissance,
- ❖ Etape 3 : du cerne 31 et au delà un palier s'établit.

Au seuil de 5%, l'analyse de variance conduit à un effet significatif de l'âge compté depuis la moelle sur la longueur de la fibre d'Okoumé ($P < 0,001$). Du point de vue de la position radiale, la longueur des fibres diffère significativement suivant les trois duramens ($P < 0,001$). Au niveau origine géographique, on n'a pas d'effet significatif ($T = -1,31$; $DL = 7$; $P = 0,193$). Cependant chaque provenance a une corrélation significative avec l'âge cambial à la même probabilité ($P < 0,001$).

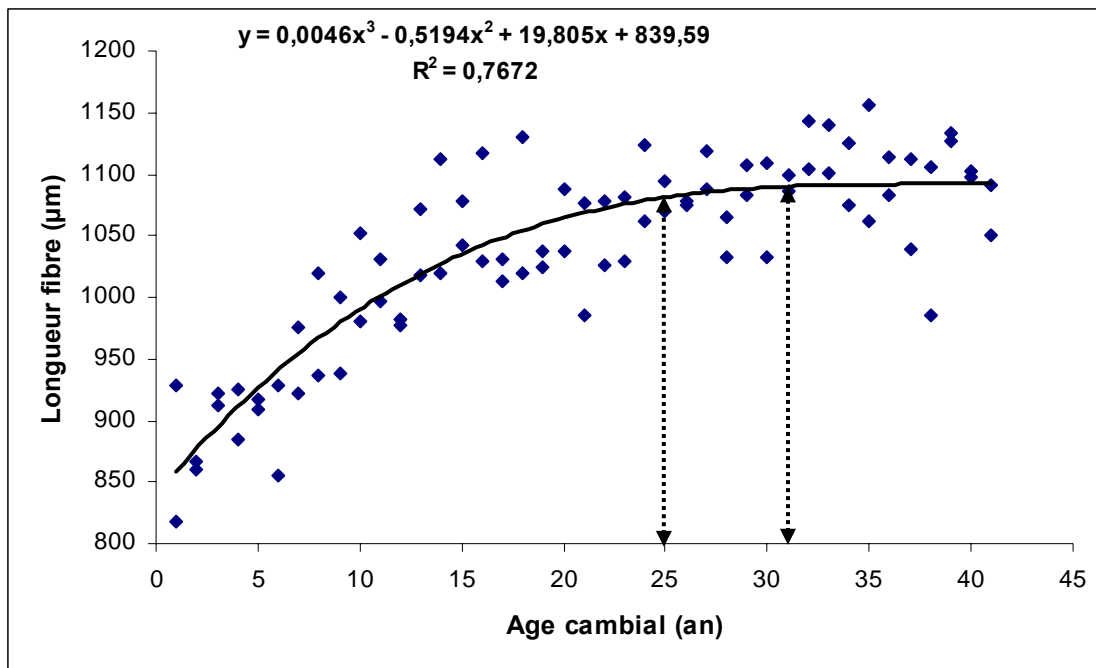


Figure 3.43 : Ensemble des moyennes individuelles des fibres par cerne toutes provenances confondues (Bokoué et M'Voum). La longueur des fibres croît significativement avec l'âge cambial ($P < 0,001$).

La recherche de la limite BJ/BA avec la longueur des fibres n'a pas donné de relation en confrontant l'ensemble de toutes les longueurs des fibres des deux sites et non plus pour les moyennes à âge cambial fixé. En revanche les analyses par site ont révélé des limites BJ/BA :

- ❖ A M'Voum ; la limite BJ/BA est indiquée à l'âge cambial 15 ans. Du cerne 1 à cet âge, la longueur des fibres est fortement influencée par l'âge cambial ($P < 0,001$) représenté par le segment V1 ($y = 16,3x + 849,2$; $R^2 = 0,72$) sur la figure 3.44. Après 15 ans, les fibres d'Okoumé ne marquent aucun effet avec l'âge cambial, dont l'allure est représentée par le segment V2 ($y = 2,96x + 1003,6$; $R^2 = 0,31$),
- ❖ A Bokoué la confrontation âge cambial et longueur des fibres d'Okoumé donne une limite BJ/BA à 20 ans. Le caractère longueur des fibres est très influencé chez l'Okoumé par l'âge cambial quelle que soit la position par rapport à 20 ans ; c'est-à-dire jusqu'à cet âge B1 ($Y = 10,96x + 856,7$; $R^2 = 0,88$; $P < 0,001$) et après B2 ($Y = 0,32x + 1065,9$; $R^2 = 0,003$; $P = 0,003$) (Figure 3.46).

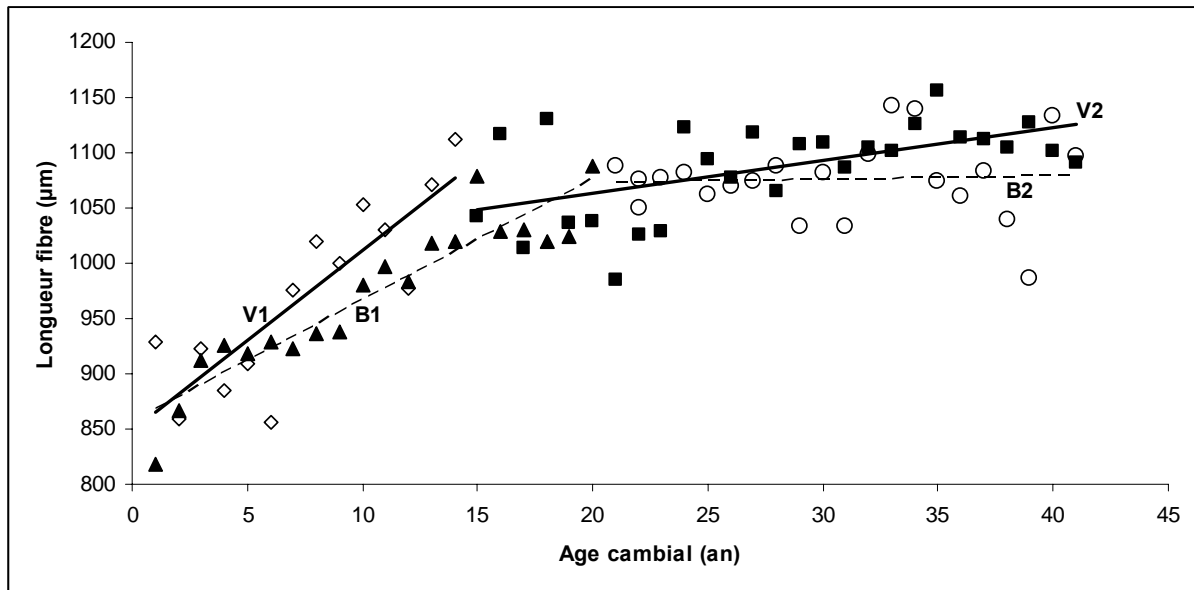


Figure 3.44 : Limite entre le bois juvénile et le bois adulte. Les deux segments V1 (1 à 14 ans) et V2 (15 à 41 ans) représentent l'évolution de la longueur des fibres des arbres de M'Voum et B1 (1 à 20 ans) et B2 (21 à 41 ans) ceux de Bokoué.

III-42 Retrait longitudinal total

Les variations du bois d'Okoumé dans la direction longitudinale montrent une diminution du retrait du duramen interne vers le duramen externe (Figure 3.45). Au seuil de 5%, le retrait longitudinal total est significativement influencé par la position du duramen dans le bois d'Okoumé ($P < 0,001$) mais il ne marque pas d'effet significatif avec l'âge cambial ($P = 0,707$) et l'appartenance à un site n'a pas non plus d'effet ($T = 0,14$; $DL = 75$; $P = 0,891$).

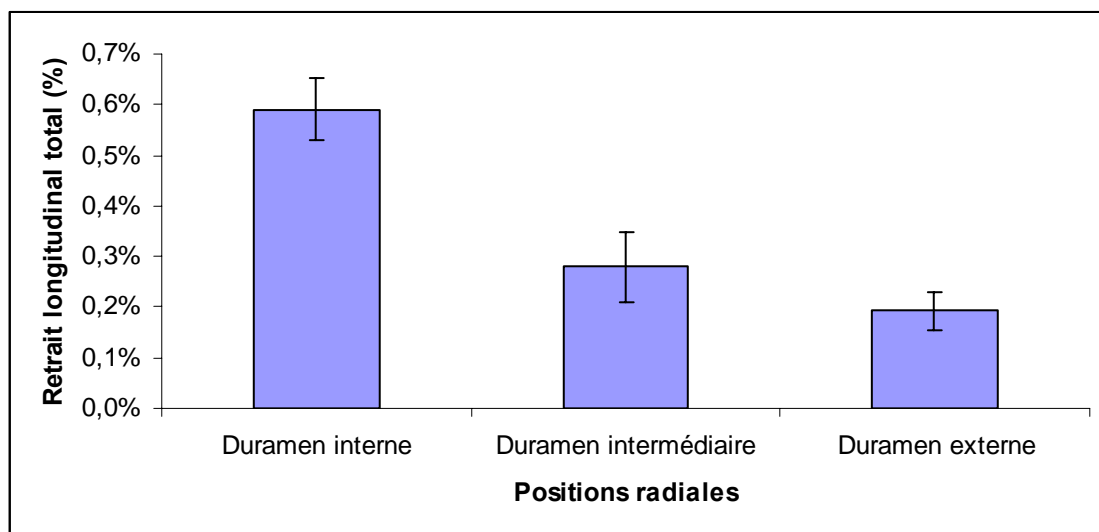


Figure 3.45 : Evolution du retrait longitudinal total de l'Okoumé en fonction des trois duramens

La mise en relation de l'âge cambial et le retrait longitudinal total en appliquant la régression linéaire segmentée indique une limite BJ/BA à l'âge cambial 13 ans (Figure 3.46). Ce caractère décroît significativement avec l'âge cambial jusqu'au 13^e cerne ($P < 0,001$). Au-delà de cet âge, il se forme un palier dont l'âge cambial n'influence plus significativement les variations longitudinales du bois d'Okoumé ($P = 0,36$). Cependant, il n'a été trouvé aucune relation entre l'âge cambial et les deux autres retraits linéaires (radial et tangentiel).

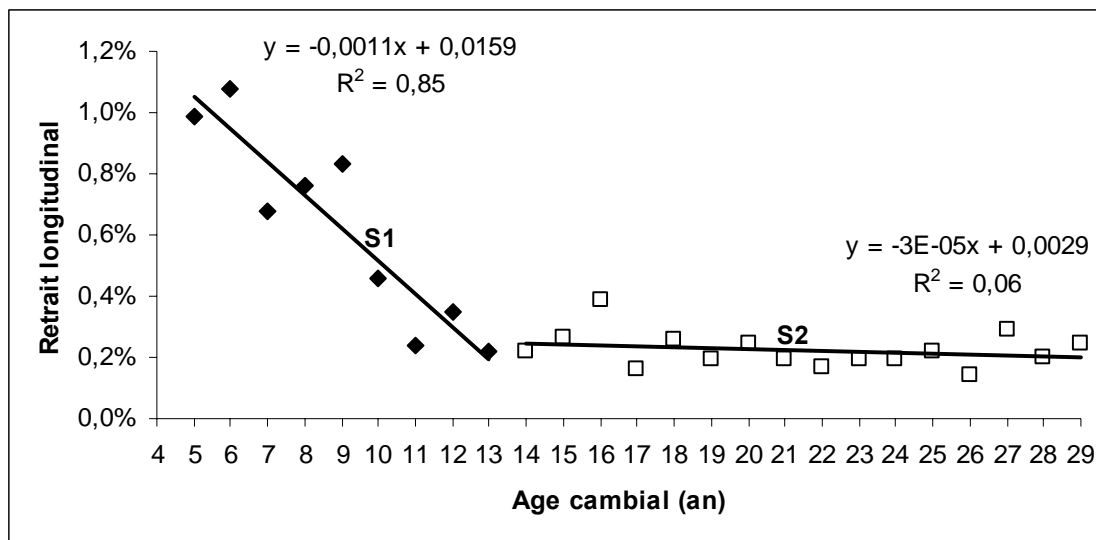


Figure 3.46 : Age cambial et retrait longitudinal total marquant la limite BJ/BA de l'Okoumé à 13 ans. S1 (1 à 13 ans) et S2 (14 à 41 ans) sont respectivement le segment de régression avant 13 ans et celui du bois adulte.

III-43 Diamètre des vaisseaux

On a été mesuré 744 vaisseaux de bois de plantations, partant du cerne 1 au cerne 41 quel que soit le type de bois (de saison sèche, de saison humide, juvénile, adulte). Le diamètre moyen en fonction de l'âge varie de 112 à 333 μm (Bokoué et M'Voum). Le diamètre de vaisseaux est significativement corrélé avec l'âge cambial ($R^2 = 0,7$; $P < 0,001$) dont respectivement Bokoué ($R^2 = 0,6$; $P < 0,001$) et M'Voum ($R^2 = 0,71$; $P < 0,001$). L'origine géographique (site) du bois d'Okoumé influence significativement le diamètre au seuil de 5% ($T = -4,4$; $DL = 78$; $P < 0,001$). Les vaisseaux de M'Voum sont en moyenne plus gros ($235 \pm 6,7 \mu\text{m}$) que ceux de Bokoué ($188,4 \pm 6,1 \mu\text{m}$). L'ouverture du vaisseau d'Okoumé croît significativement de la moelle vers la périphérie ($P < 0,001$) avec une moyenne de 159 μm pour le duramen interne, de 192 μm pour le duramen intermédiaire et de 228 μm pour le duramen externe (Figure 3.47). La relation entre ce caractère et l'âge cambial chez l'Okoumé marque une limite BJ/BA à 29 ans. Le diamètre des vaisseaux croît significativement jusqu'à cet âge ($P < 0,001$). La figure 3.48 montre qu'au-dessus du 29^e cerne il se forme un plateau et l'ouverture du vaisseau ne présente aucune différence significative.

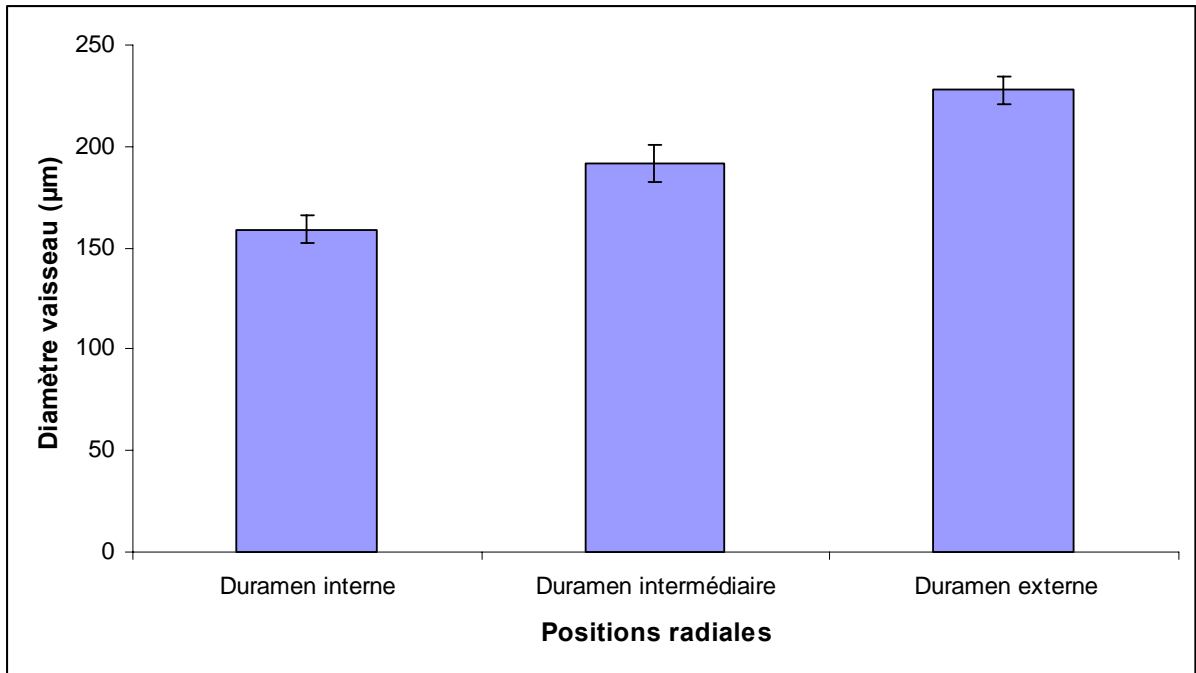


Figure : 3.47 : Evolution en moyenne du diamètre des vaisseaux selon la position dans le duramen.

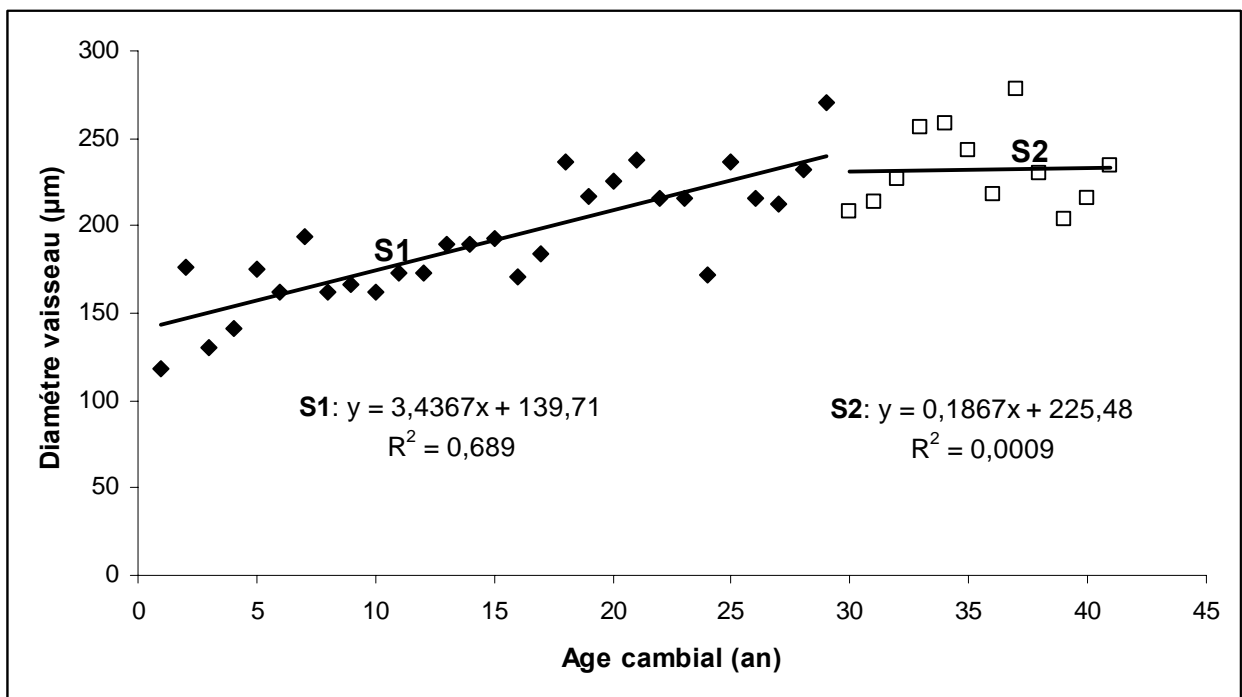


Figure 3.48 : Relation entre l'âge cambial et le diamètre des vaisseaux indiquant la limite BJ/BA à 29 ans. Les demi-segments S1 (1 à 28 ans) et S2 (29 ans à 41 ans) représentent respectivement les allures des vaisseaux avant et après 29 ans.

III-44 Largeur des cernes

Le comportement de la largeur de cerne chez l'Okoumé sur le gradient horizontal est présenté au paragraphe III-13 du présent chapitre. La largeur décroît légèrement suivant l'âge cambial mais leur mise en relation a permis de déterminer un âge cambial limite entre le bois juvénile et le bois adulte à 19 ans (Figure 3.49). C'est la seule caractéristique en dehors des caractères marqueurs du bois juvénile cités plus haut qui a donné mathématiquement une limite entre bois juvénile et bois adulte. Avant et après cet âge la longueur des fibres d'Okoumé n'est pas influencée par l'âge compté depuis la moelle.

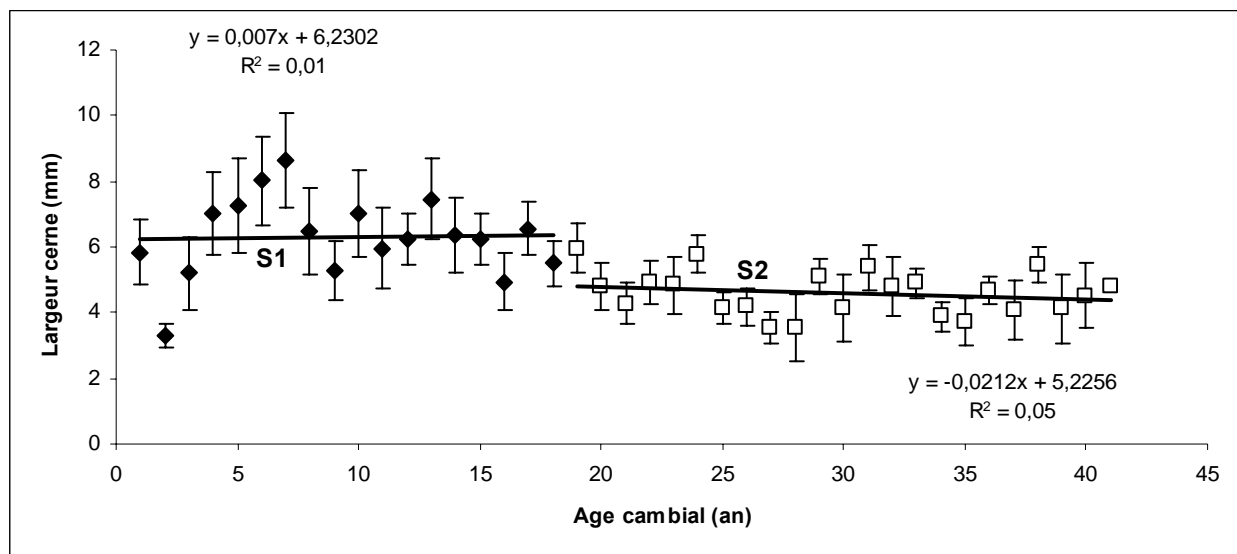


Figure 3.49 : Détermination de l'âge limite BJ/BA à 19 ans. Le demi-segment S1 représente le comportement du cerne 1 au 18 et le demi segment S2 au-delà.

III-5 Apport de la limite bois juvénile-bois adulte (BJ/BA)

On a cherché à voir si les âges limites déterminés en plantation étaient adaptés en milieu naturel et par prolongement sur l'ensemble échantillonné (plantation et forêt naturelle). Des profils des valeurs moyennes des caractéristiques juvéniles ont été tracés (masse volumique, module d'élasticité (Figure 3.50)), retrait radial, retrait tangentiel (Figure 3.51), retrait volumique et PSF tangentiel (Figure 3.52) déduites en fonction des différents âges limites BJ/BA. Pour les caractères de stabilité dimensionnelle, les profils ont la même allure (Figures 3.51 et 3.52). Au niveau de la masse volumique, en dehors de l'opposition du passage de l'âge cambial de 15 à 19 ans, les trois profils présentent des allures similaires (Figure 3.50). En revanche les profils relatifs au module d'élasticité longitudinal présentent peu de choses en commun (Figure 3.50).

Dans ce paragraphe, il est question de l'impact de la limite BL/BA sur l'ensemble des caractéristiques évaluées dans cette étude.

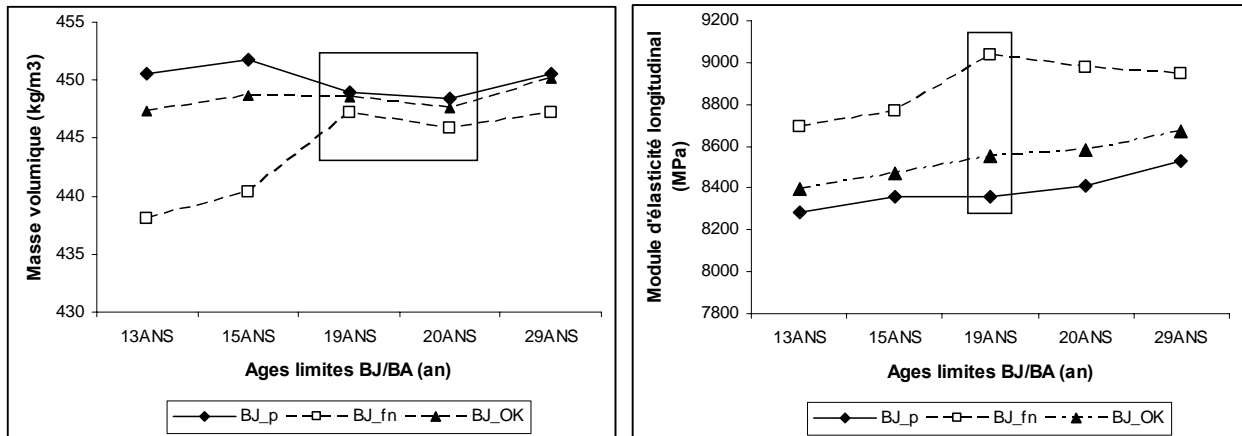


Figure 3.50 : Evolution de la masse volumique et du module d'élasticité longitudinal mesurés dans le bois juvénile dans les plantations (BJ_p), la forêt naturelle (BJ_fn) et sur l'ensemble des deux écosystèmes (BJ_OK) en fonction des âges limites BJ/BA déterminés.

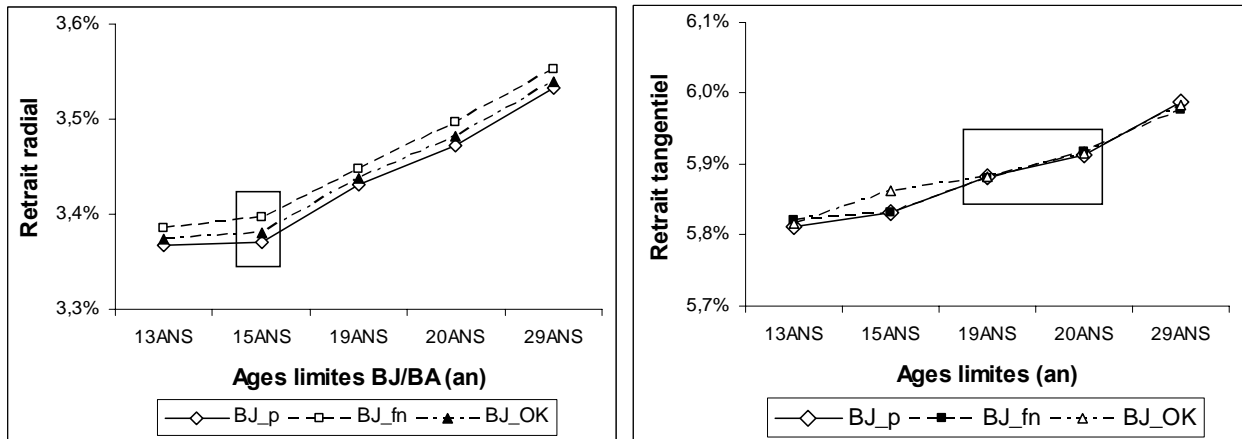


Figure 3.51 : Evolution des retraits linéaires radial et tangentiel mesurés dans le bois juvénile dans les plantations, la forêt naturelle et sur l'ensemble des deux écosystèmes en fonction des âges limites BJ/BA déterminés.

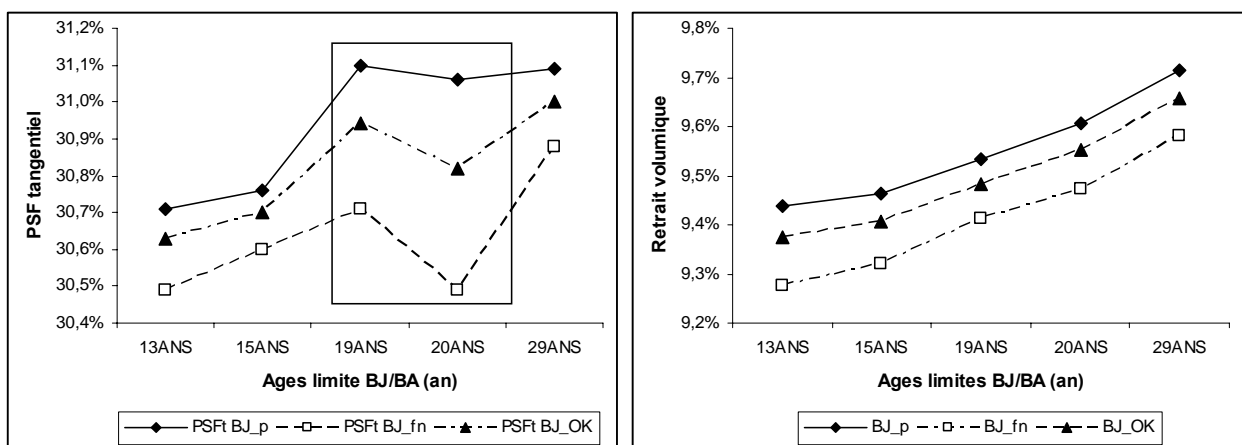


Figure 3.52 : Evolution des retraits volumiques et du PFS tangentiel mesurés dans le bois juvénile dans les plantations, la forêt naturelle et sur l'ensemble des deux écosystèmes en fonction des âges limites BJ/BA déterminés.

La limite BJ/BA varie selon le caractère étudié (Zobel et Sprague 1998) ; ceci est d'autant plus vrai que nous avons trouvé un intervalle limite BJ/BA allant de l'âge cambial 13 ans à 29 ans. Sur les profils (Figures 3.50, 3.51 et 3.52) il est fréquemment observé un événement aux âges cambiaux 19 et 20 ans. La limite entre BJ/BA a été donc considérée à l'âge cambial 20 ans. Le bois adulte a présenté des caractères supérieurs au bois juvénile, sauf dans le cas du PSFt (Tableau 3.4). A l'exception de ce dernier caractère et de la masse volumique, on observe un effet type de bois significatif chez l'Okoumé au seuil de 5%.

	Masse volumique	E _L	Retrait radial	Retrait tangentiel	Retrait volumique	PSFr	PSFt
BJ	447,6kg/m ²	8581MPa	3,5%	5,9%	9,6%	30,3%	30,8%
BA	453,5kg/m ²	8979MPa	3,7%	6,1%	9,9%	30,2%	31,4%
Probabilité	NS	S	S	S	S	NS	S

Tableau 3.4 : Moyennes des propriétés physiques et mécaniques

Quel que soit le champignon le bois adulte offre une meilleure résistance à la dégradation (Tableau 3.5). Cependant au seuil de 5%, on ne note pas d'effet type de bois sauf chez le *G. trabeum*. Ce champignon présente une perte de masse absolue de 2,1% de plus pour le bois juvénile. Néanmoins toutes les pertes de masse induites sur les différents types de bois classe le bois d'Okoumé en classe 3 (moyennement durable).

	<i>G. trabeum</i>	<i>C. versicolor</i>	<i>Antrodia sp</i>	<i>P. sanguineus</i>
BJ	14,5%	17,2%	19,8%	13,5%
BA	12,4%	16,9%	18,2%	12,2%
Probabilité	S	NS	NS	NS

Tableau 3.5 : Pertes de masse absolues causées par les champignons sur l'Okoumé en fonction du type de bois (juvénile et adulte).

III-6 Evaluation des constituants chimiques du bois de cœur et de l'oléorésine de l'Okoumé

III-61 Constituants pariétaux du bois d'Okoumé

Le tableau 3.6 regroupe les résultats des travaux antérieurs et ceux obtenus dans la présente étude. La proportion d'holocellulose obtenue (78,3%) dans cette étude est très proche du résultat de Lal (1977). Le rapprochement est également établi au niveau :

- ❖ de la cellulose (47,8%) avec Savard (1960) et Lal (1977) qui trouvent la même proportion ;
- ❖ de la lignine (30,4%) avec Brunck (1990) et Minkuè (2000),
- ❖ de l'extraction aux solvants organiques (2%) avec Savard,
- ❖ de l'extraction à l'eau (3,7%) avec Lal (1977).

En dehors de Minkuè, les autres auteurs ont réalisé leurs travaux avec du bois d'Okoumé issu des forêts naturelles. En regardant de façon globale, on n'observe pas d'écarts notables entre les résultats relevés par Minkuè (2000) et ceux qui ont été obtenus dans ce travail. Les deux investigations ont eu lieu dans les plantations, mais dans des massifs forestiers différents. Quand on soustrait les valeurs des composés pariétaux et ceux localisés dans les lumens cellulaires en tenant compte de la moyenne des cendres (cf. Tableau 1.9 page 36), la proportion des hémicelluloses peut être estimée à 16,1% en tenant compte de la moyenne des cendres (Tableau 1.9 à la page 36).

	Holocellulose	Cellulose	Lignine	Extraits	
				Solvants organiques	Eau
Savard (1960)		47,9%	31,4%	1,4%	0,9%
Lal (1977)	77,2%	47,8%	21,3%	12,6%	4,2%
Brunck <i>et al.</i> (1990)		46%	30%	1,5%**	
Minkuè (2000)	75,6%	50,9%	30,9%	1,2%	2,5
Safou (2005)	80,2%	48,4%	19%	2,1%**	
Présente étude*	78,3±2%	47,8±2%	30,4±0,7%	2±0,4%	3,7±0,8

Tableau 3.6 : Teneur des principaux constituants de l'Okoumé. ** indique l'ensemble des extractibles résultant de solvants organiques et de l'eau. Les trois premiers auteurs ont utilisé un mélange éthanol-benzène et les deux autres (Minkuè et Safou) ont réalisé leurs travaux avec les solvants organiques toluène et éthanol (2v/1v). * désigne les résultats de Medzege (présente étude). Les valeurs en gras marquent les rapprochements des résultats.

III-62.1 Analyse des extractibles du bois parfait d'Okoumé

Les recherches de composés volatils dans la sciure de bois par chromatographie en phase gazeuse n'ont pas donné de résultats positifs, ce qui a par conséquent entraîné l'arrêt de l'évaluation des volatils dans le bois de cœur.

III-62.12 Analyse des fractions isolées du duramen du bois d'Okoumé

Des proportions d'extractibles obtenues, leur dissolution dans le dichlorométhane (CH_2Cl_2) n'a pas été totale. Seulement 35% de produits de faible poids moléculaire ont été solubilisés. L'examen des solutions acquises à partir des différents arbres en chromatographie en phase gazeuse a révélé qu'à l'exception de l'arbre V9 de M'Voum, les chromatogrammes de tous les arbres présentaient la même allure, c'est-à-dire que les pics dominants avaient le même temps de rétention. C'est ainsi que la suite des analyses par couplage GC-MS a été effectuée distinctement sur l'arbre V9 dit fraction \mathbf{F}_9 et un mélange de six arbres dit fraction \mathbf{F}_M (V6, V8, V14, B4, B7 et B10) homogénéisé.

III-62.13 Comparaison des fractions brutes \mathbf{F}_9 et \mathbf{F}_M

En couplage GC-MS, les deux fractions ont une composition nettement différente :

- ❖ La fraction \mathbf{F}_9 présente deux composés majoritaires (Figure 3.53). La bibliothèque NIST attribue le premier pic dont le temps de rétention (t_R) est de 14,81 minutes au 2,4-di-tert-butylphénol et le deuxième pic ($t_R = 30,36$ minutes) au β -sitostérol. Le temps de rétention du 2,4-di-tert-butylphénol de référence et celui de la fraction \mathbf{F}_9 sont quasi identiques et les spectres de masse sont également identiques, confirmant ainsi la présence de ce phénol dans la fraction \mathbf{F}_9 .
- ❖ Dans la fraction \mathbf{F}_M (Figure 3.54), il n'y a plus qu'un pic largement majoritaire qui apparaît à 30,38 min. D'après la bibliothèque NIST, le pic est attribué au β -sitostérol, ce qui a été confirmé à l'aide d'un échantillon de référence. La présence de ce composé majoritaire dans les deux fractions a conduit à poursuivre exclusivement l'examen de la fraction \mathbf{F}_M par CCM.

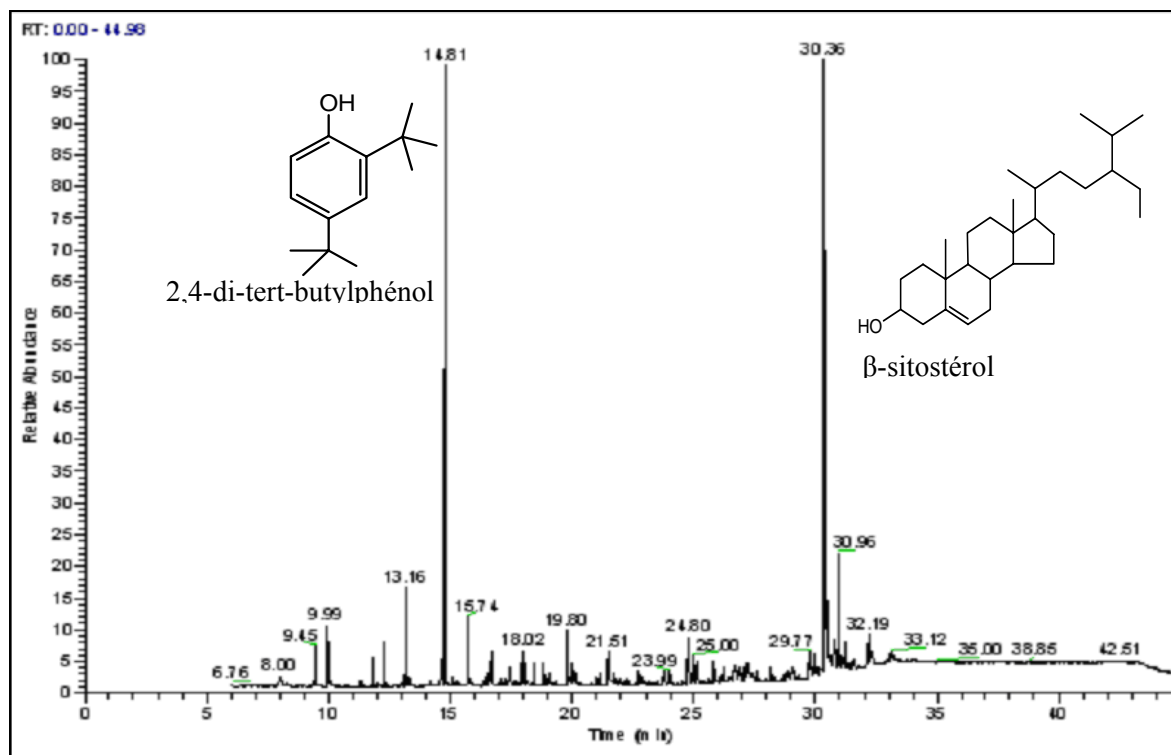


Figure 3.53: Chromatogramme du bois d'Okoumé issu de l'arbre V9 de M'Voum.

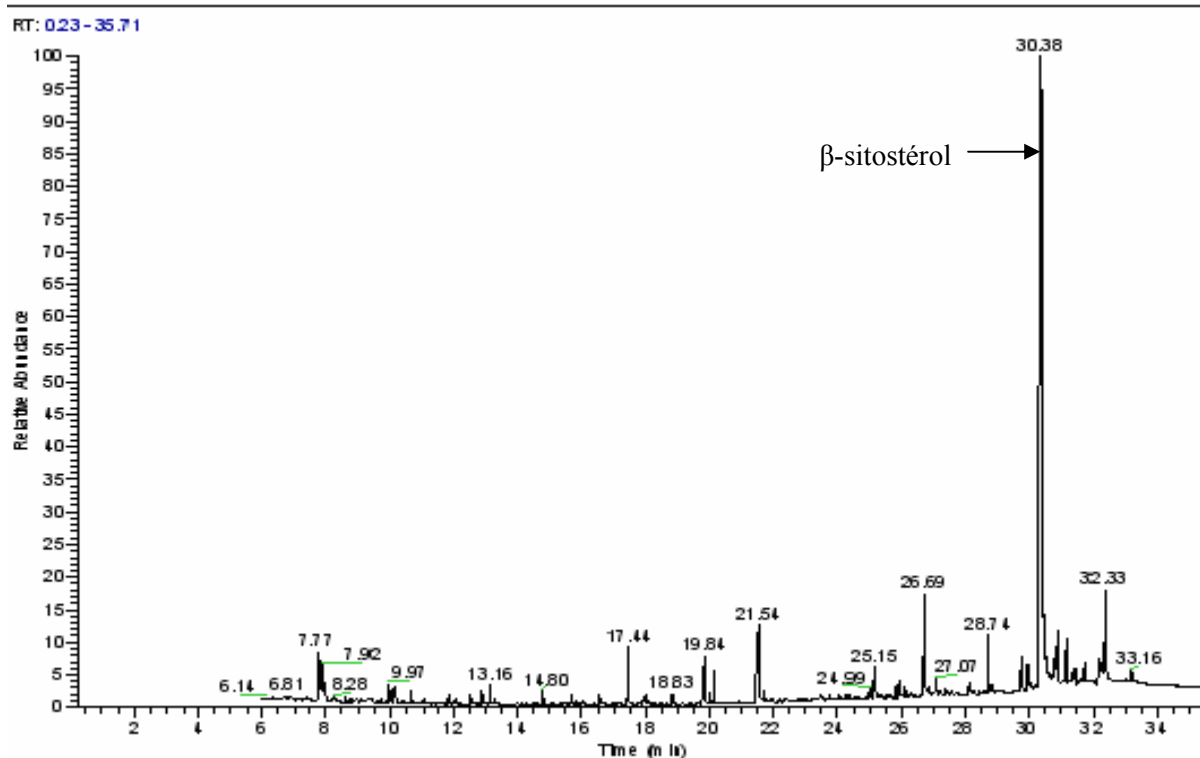


Figure 3.54: Chromatogramme du bois d'Okoumé issu du mélange. Le pic à $t_R = 14,81$ minutes n'apparaît plus.

III-62.14 Séparation de la fraction F_M par colonne de silice

La fraction F_M a été séparée avec un éluant fait d'un mélange d'acétate d'éthyle et de cyclohexane. Trois phases ont été en particulier isolées selon les proportions d'éluant suivantes :

- ❖ phase I: cyclohexane/acétate d'éthyle (80/20),
- ❖ phase II : cyclohexane/acétate d'éthyle (70/30),
- ❖ phase III : cyclohexane/acétate d'éthyle (60/40).

III-62.15 Analyse de la fraction F_M par couplage GC-MS

Les produits élués au mélange cyclohexane/acétate d'éthyle, après élimination des par évaporation sont dissous dans CH_2Cl_2 puis analysés par couplage GC-MS.

Phase I

L'examen de cette phase par couplage GC-MS révèle la présence de **β -sitostérol**. La bibliothèque NIST propose en outre les produits suivants : 9,19-cyclolanostan-3-ol-2,4-ène ; 9,19-cyclolanostan-3-ol-2,4-méthylène, ainsi que des traces de lanostérol et de **β -amyrine** (Figure 3.55).

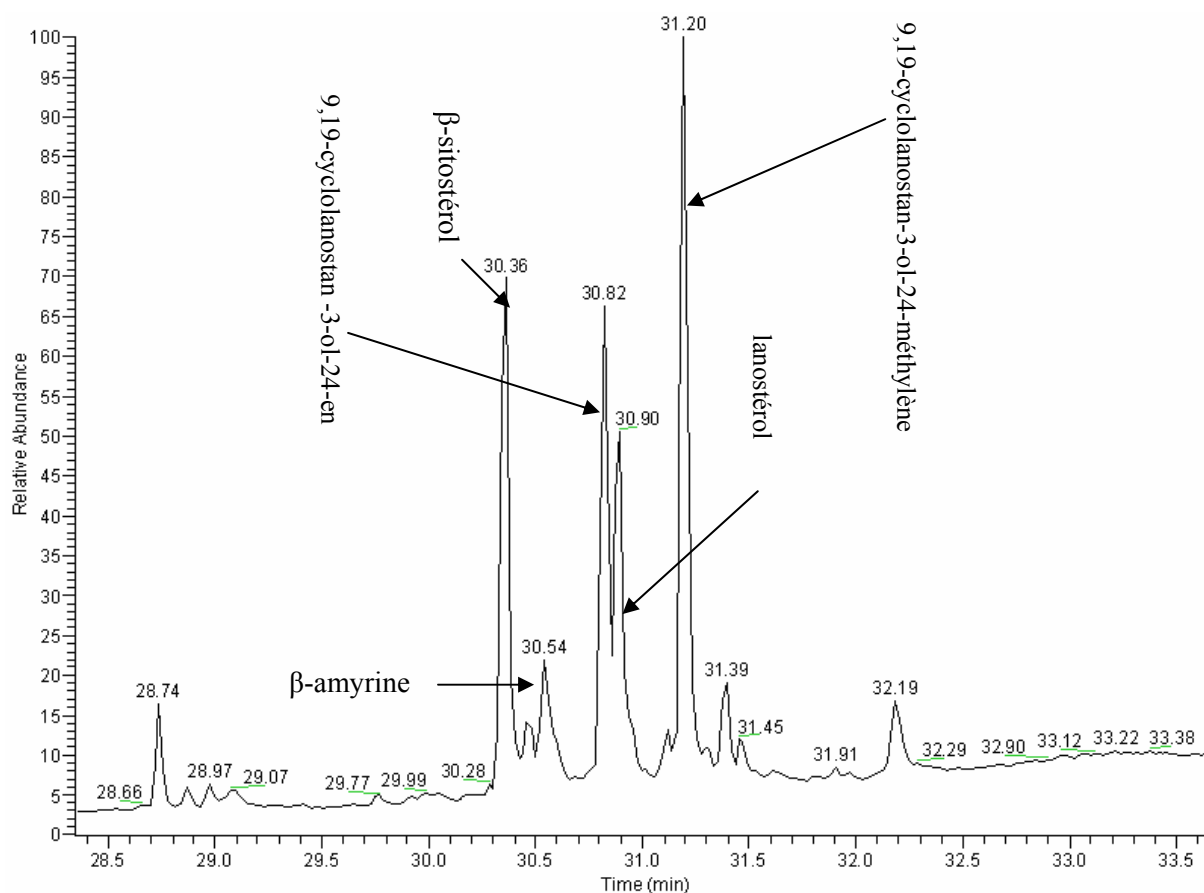


Figure 3.55 : Chromatogramme de la phase I

Phase II

L'examen par couplage GC-MS a montré que le **β -sitostérol** était le principal produit dans cette phase. Les autres produits proposés par la bibliothèque NIST sont à l'état de traces, il s'agit de : undécane, dodécane, bicyclohexyle, acide lignostérique, cholestadiénol, campestérol, stigmastérol, propylidène cholestérol, 9,19-cyclocholestan-3-ol-7-one.

Une chromatographie sur couche mince de cette deuxième phase a été réalisée afin d'isoler les stérols. L'éluant conduisant au meilleur résultat est un mélange cyclohexane/éther diéthylique, aux proportions 40/60. Trois fractions ont été distinguées, la première avec $R_f = 0$ la deuxième avec $R_f = 0,39$ et la troisième avec $R_f = 0,45$.

Chaque fraction a été recueillie, ensuite extraite à froid au méthanol et enfin analysée en GC-MS. La bibliothèque NIST et le produit de référence ont révélé que la deuxième fraction est composée majoritairement de **β -sitostérol** et des traces de campestérol et stigmastérol (Figure 3.56). La troisième fraction a présenté la même composition en plus faible quantité et des composés non identifiés (traces).

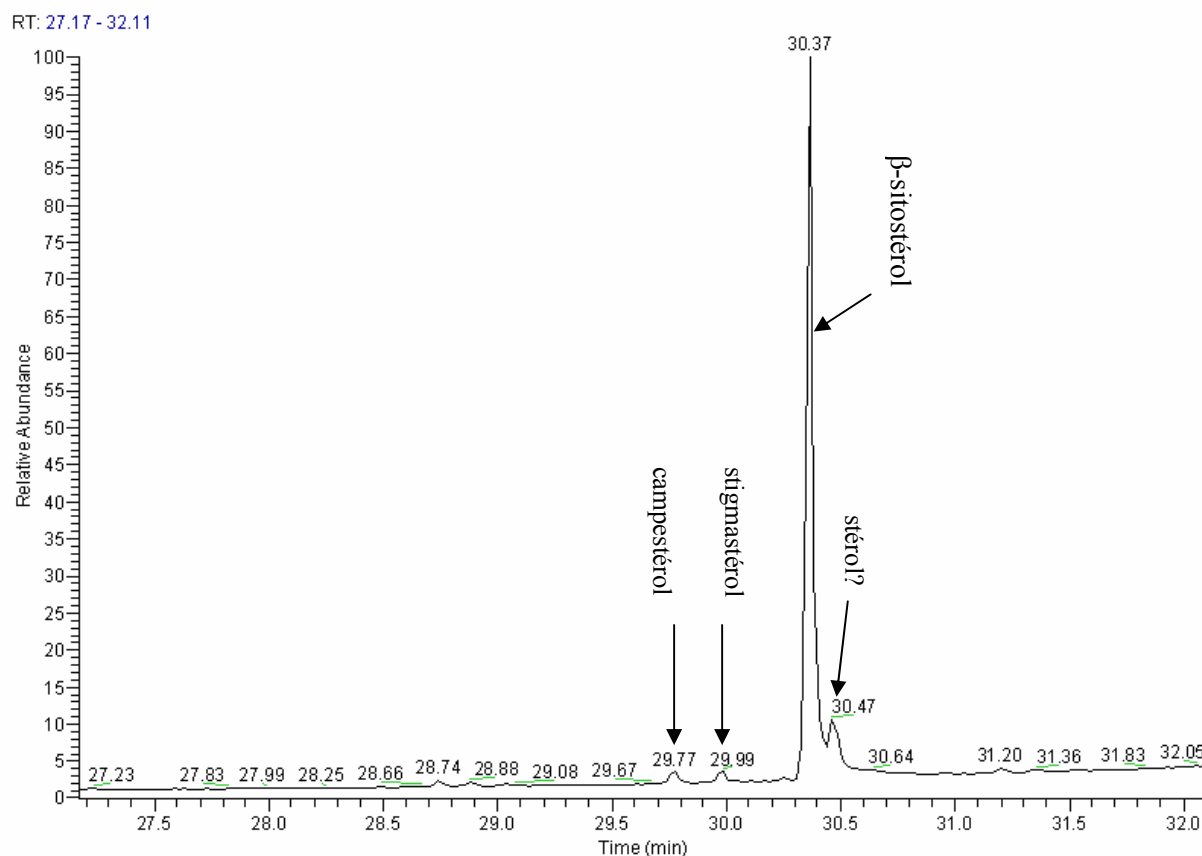


Figure 3.56 : Chromatogramme de la fraction 2 de la phase II montrant les stérols.

Phase III

L'analyse par GC-MS a révélé principalement deux composés à l'état de traces à $t_R = 19,82$ minutes et $t_R = 21,52$ minutes identifiés respectivement comme étant l'acide oléique et l'acide palmitique (Figure 3.57).

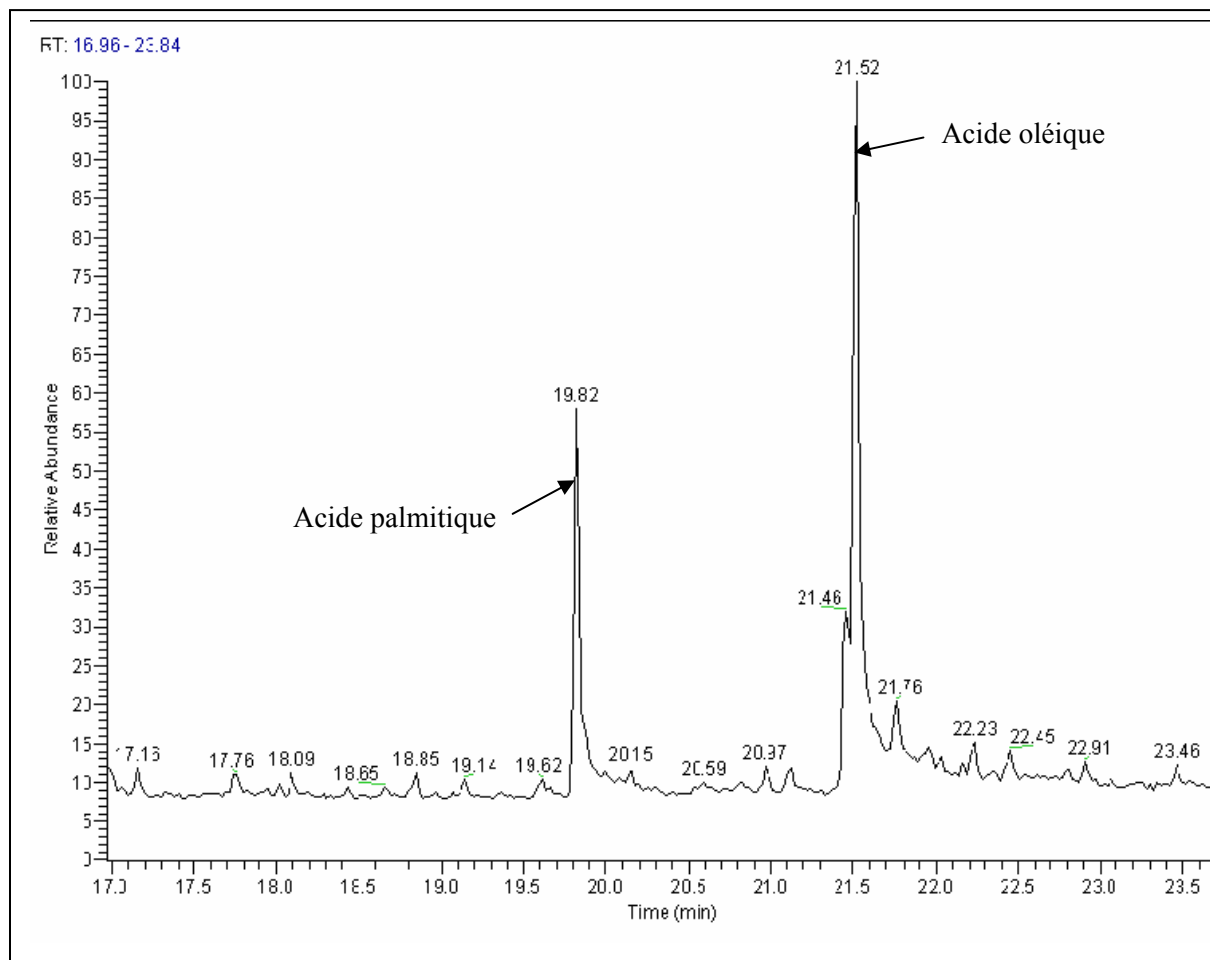


Figure 3.57 : Chromatogramme de la fraction I du bois d'Okoumé.

Les formules chimiques développées des composés de bois de cœur qui ont été identifiés par la bibliothèque NIST et confirmé par les produits de référence sont présentées sur la figure 3.58

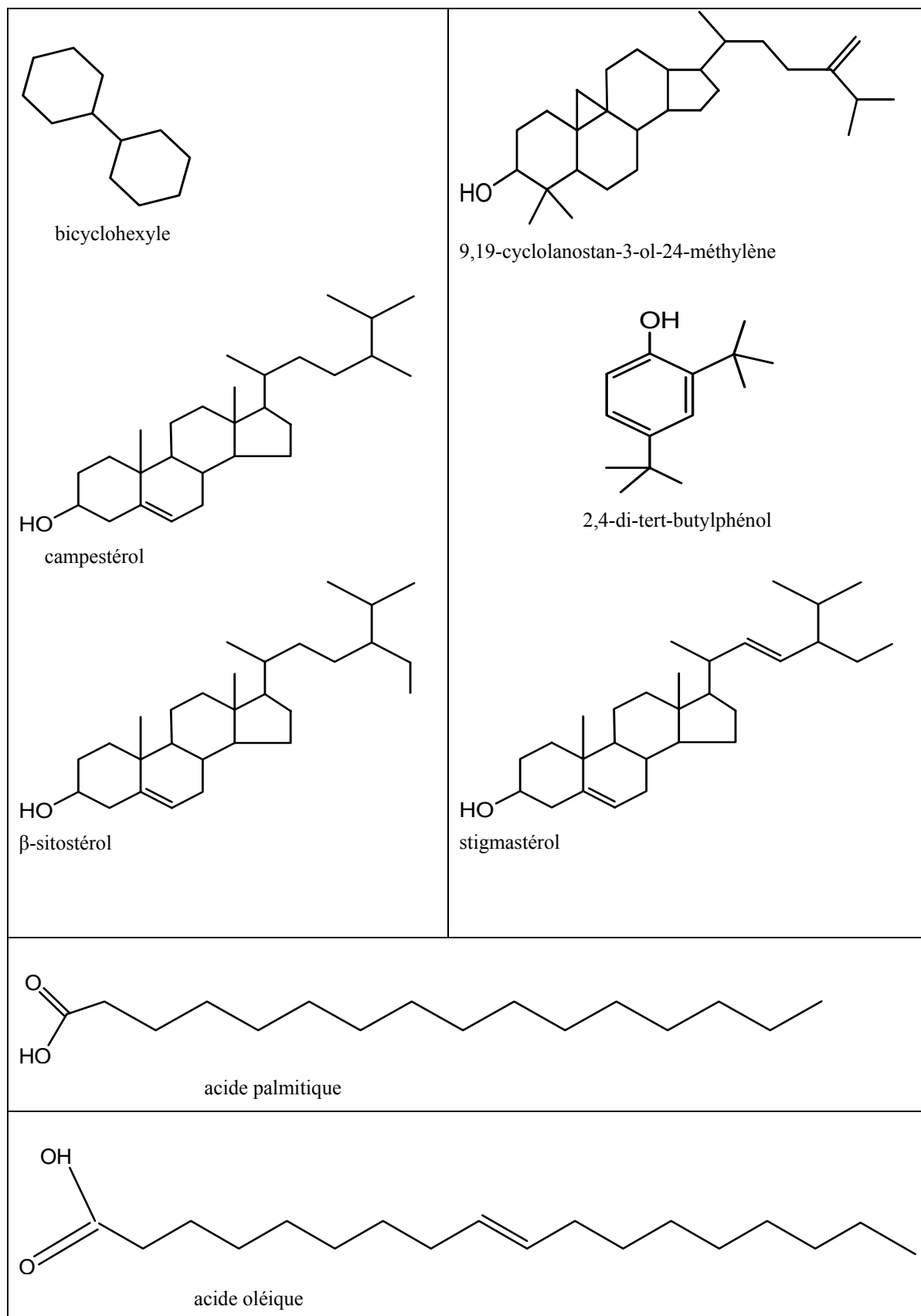


Figure 3.58 : Formules chimiques développées des composés trouvés dans le bois de coeur

III-63 Oléorésine

III-63.1 Analyse des composés volatils

Par espace de tête statique, il a été proposé par la bibliothèque NIST et confirmé par les produits de référence les composés suivants : α -pinène, β -pinène, α -phellandrène, Δ -3-carène, *p*-cymène, limonène, eucalyptol et α -terpinéol. Dans le cas de l'oléorésine de la forêt de Ntoun, le couplage GC-MS a permis de mettre en évidence en plus la présence de β -phellandrène (Figure 3.59). Le composé majoritaire varie selon le site ; Δ -3-carène (37,3%) à Cocobeach, α -phellandrène (63%) à Ntoun et à Bokoué les résultats sont plus complexes. Sur les deux prélèvements effectués, le constituant majoritaire varie d'un échantillon à l'autre. On obtient sur le premier test dit Bokoué 1 le *p*-cymène (41,4%) comme constituant majoritaire et sur le deuxième test dit Bokoué 2, le mélange limonène-eucalyptol (50,5%) est dominant (Tableau 3.7). Les proportions respectives des constituants ont été obtenues par mesure directe des aires. La figure 3.60 permet de voir l'architecture des composés identifiés par la Bibliothèque NIST.

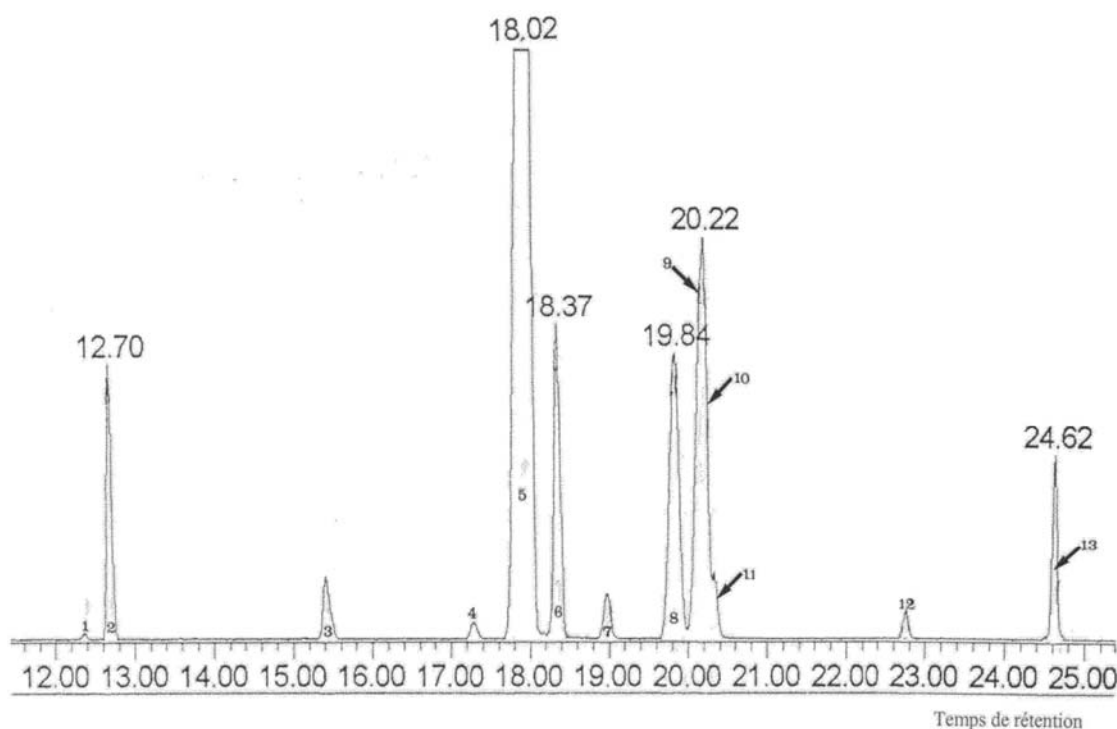


Figure 3.59 : Chromatogramme ionique total (TIC) obtenu à partir de l'essence de l'oléorésine de Ntoun (appareil HP G1800C GCD Série II avec une colonne de 30 m).

Sur la figure 3.59 ci-dessus, on distingue 13 pics qui ont été élués selon l'ordre suivant : terpène (1), α -pinène (2), β -pinène (3), produit non identifié (4), α -phellandrène (5), Δ -3-carène (6), terpène (7), *p*-cymène (8), β -phellandrène (9), limonène (10), eucalyptol (11), terpène (12) et α -terpinéol (13).

Les pics du limonène et de l'eucalyptol sont très mal résolus sur la phase la moins polaire. Cependant la caractérisation de ces deux pics est possible avec une phase très polaire et une colonne plus longue. Pour ce faire un appareil de type Shimadzu 14B avec une colonne plus longue (30 m) a été utilisé. Les caractéristiques de cet appareil et les conditions chromatographiques et opératoires figurent en annexe page 197. Suivant la phase stationnaire utilisée, l'ordre d'élution des composés diffère. Néanmoins les indices de Kováts trouvés (Tableau A9 annexe page 197) sont en accord avec la littérature (www.flavornet.org/info).

Nom du produit	Cocobeach/ oléorésine de forêt naturelle (%)	Ntoum / oléorésine de forêt naturelle (%)	Bokoué1/ oléorésine de plantation (%)	Bokoué2/ oléorésine de plantation (%)
α -pinène	2,7	6	2,6	2,3
β -pinène	0,6	1,5	0,4	0,8
α -phellandrène	11,4	63	4	16,6
Δ -3-carène	37,3	9	0,2	3
<i>p</i> -cymène	10,5	5	41,4	8,1
Limonène + eucalyptol	17,2	13*	28,5	50,5
α -terpinéol	12,9	0,8	7,2	12,1
Produits non identifiés	7,4	2,5	15,7	6,6

Tableau 3.7 : Valeurs des proportions de composés volatils trouvés dans l'oléorésine d'Okoumé en forêt naturelle et en plantation. * : présence de β -phellandrène dans le pic de limonène (Gardrat *et al.* 2005)

Un test de répétabilité réalisé avec l'oléorésine de Ntoum a montré que les temps de rétention sont répétables avec des écart-types variant de 0,2 à 1,8 secondes. On observe également des écarts des proportions relatives assez importants autour des moyennes soit pour α -phellandrène 6%, pour Δ -3-carène 9% et pour limonène 4% (Tableau A10 annexe page 197).

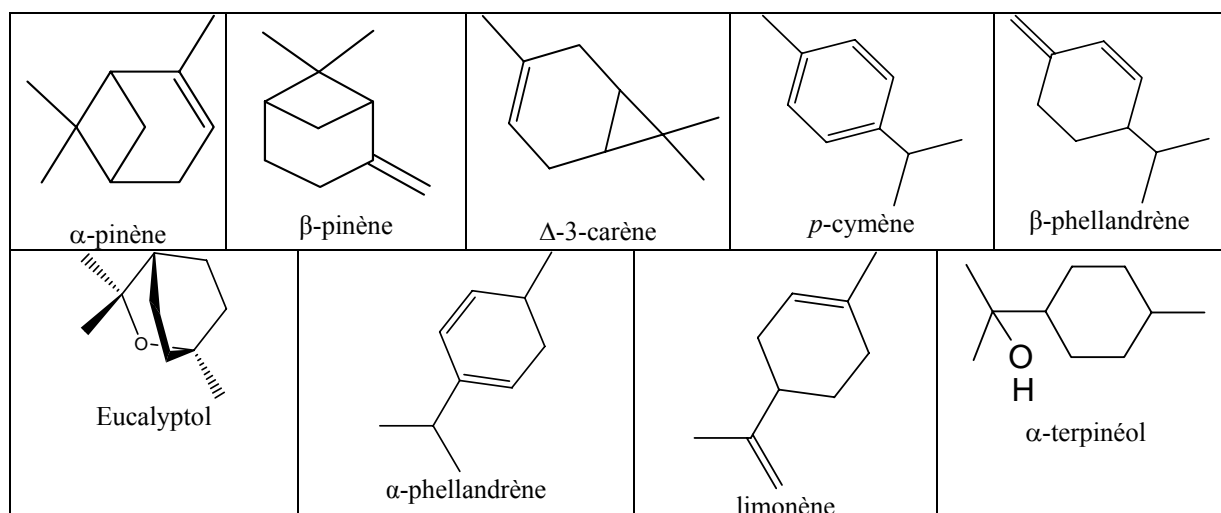


Figure 3.60 : Noms et formules chimiques développées des composés volatils de l'oléorésine que la bibliothèque NIST a pu identifier.

III-63.2 Analyse des composés non volatils de l'oléorésine

L'oléorésine (13 g) pure et sans essence a été fractionnée sur colonne de silice avec comme éluant un mélange cyclohexane/acétate d'éthyle de polarité croissante (Figure 3.61). L'usage du méthanol en fin de colonne s'est avéré inévitable afin d'éluer tous les composés. Cinq fractions (A, B, C, D et E) ont été séparées avec des proportions respectives de 2,3%, 14,6%, 38,5%, 7,7% et 36,9%. Chacune des fractions obtenues a été étudiée par couplage GC-MS sauf la fraction E.

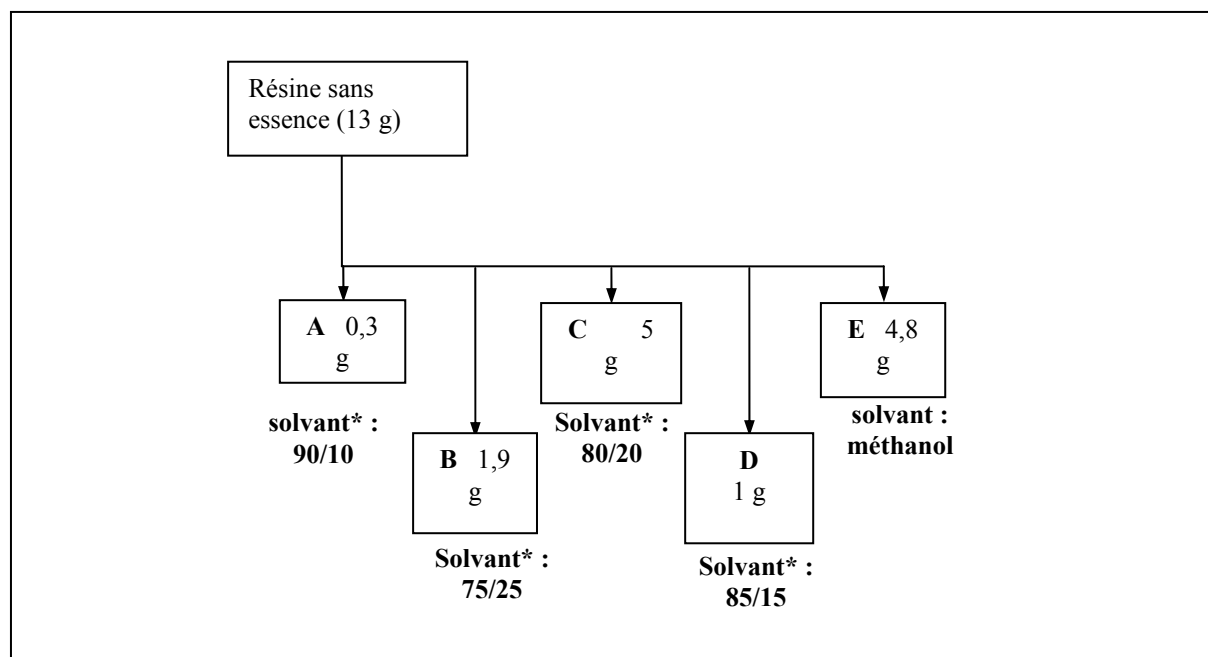


Figure 3.61 : Séparation sur colonne de silice des composés non volatils présents dans l'oléorésine d'Okoumé.* indique l'éluant cyclohexane/acétate d'éthyle.

Fraction A

Un couplage GC-MS permet l'obtention de plusieurs pics dont les composés n'ont pu être identifiés par la bibliothèque NIST.

Fraction B

Le chromatogramme ionique total montre la présence de plusieurs composés à l'état de traces dont les deux principaux ont les mêmes temps de rétention que les produits présents dans la fraction C.

Fraction C

La présence de structures triterpéniques a été révélée à l'aide du test de Liberman³ qui indique l'existence de triterpènes et/ou de stéroïdes. L'analyse de cette fraction par couplage GC-MS a conduit à l'identification par la bibliothèque NIST de l' **α -amyrine** et de la **β -amyrine**. La méthode des ajouts a permis de confirmer cette identification. Les temps de rétention des deux amyrines sont dans le même ordre que ceux qui ont été décrits récemment par Grandmougin (1999) : la **β -amyrine** est éluée en premier suivie de l' **α -amyrine** (Figure 3.62). Leurs spectres de masse sont quasiment identiques, néanmoins l' **α -amyrine** est majoritaire comme l'a également démontré Tessier (1981).

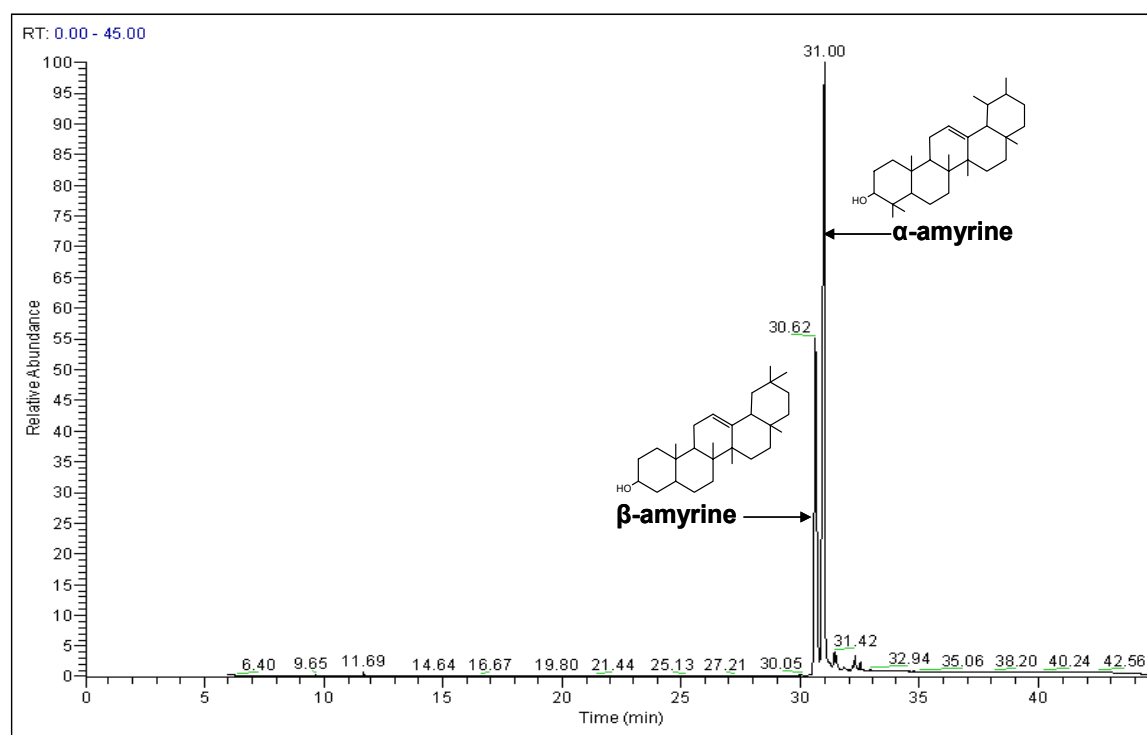


Figure 3.62 : Chromatogramme de la fraction C de l'oléorésine d'Okoumé.

³ Test de Liberman : dans un tube à essai on introduit 2 à 3 mg de substance à analyser et du chloroforme (1mL) puis de l'anhydride acétique (1mL) et on y ajoute le long des parois quelques gouttes d'acide sulfurique. Le test est positif s'il se forme une coloration rouge à l'interface.

Cependant les deux amyrynes se distinguent par l'intensité des ions à m/z à 218 et 203 (Grandmougin *et al.* 1999 ; Mathe *et al.* 2004). La figure 3.63 présente la fragmentation des deux amyrynes. Les ions issus de la fragmentation de la β -amyryne sont plus stables ; l'intensité du pic de cette amyryne à m/z 203 est plus forte. La β -amyryne conduit à deux carbocations tertiaires alors que l' α -amyryne donne deux carbocations secondaires et une carbocation tertiaire.

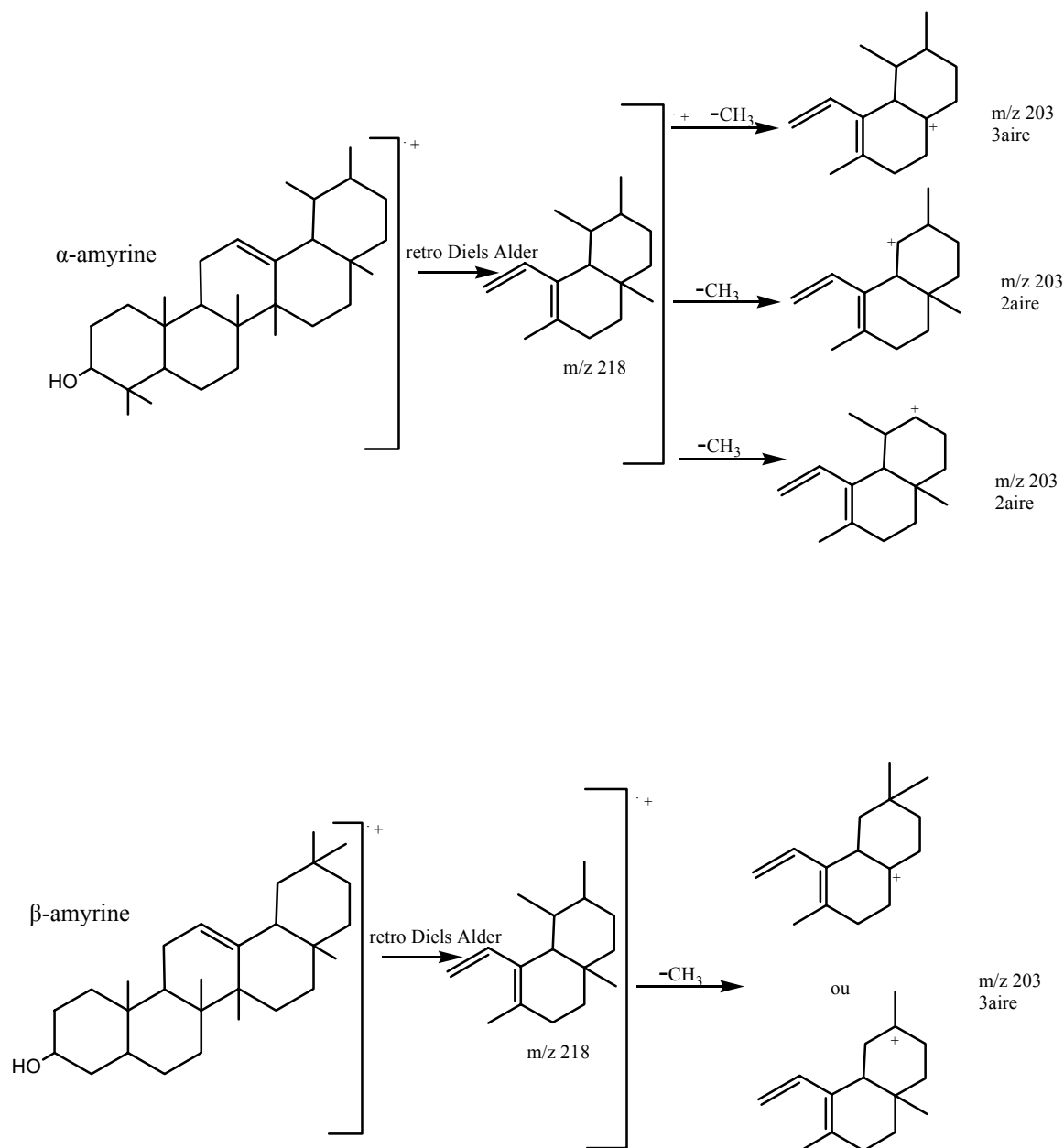


Figure 3.63 : Fragmentation des deux amyrynes permettant leur distinction (dans Grandmougin *et al.* 1999).

Les essais de séparation des deux amyrynes par CCM avec le mélange cyclohexane/acétate d'éthyle n'ont pas permis d'obtenir des taches distinctes.

Fraction D

L'analyse de ladite fraction par GC-MS a montré que les deux amyrynes étaient majoritaires accompagnées de produits à l'état de traces non identifiés. Les composés majoritaires ont été isolés par CCM.

III-7 Activité des amyrynes sur les champignons

Le solvant THF n'inhibe pas le développement des champignons, la figure 3.64 présente le bon recouvrement de la surface du milieu de culture par les différentes souches fongiques (*Coriolus versicolor* et *Antrodia sp*). Cependant, il faudra veiller à ce que le solvant ne soit pas en contact avec le récipient afin d'éviter les risques de réaction. Pour cela l'utilisation des boîtes de pétri en verre ou tout autre récipient interdisant toute interaction avec le solvant ont été utilisées.

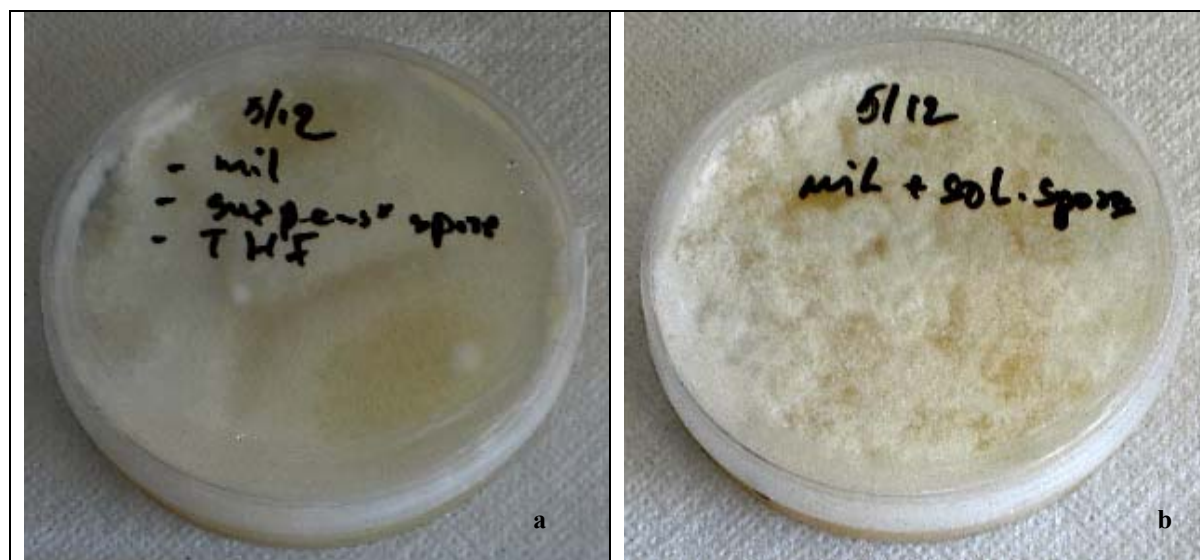


Figure 3.64 : Test témoin pour vérifier que le solvant utilisé n'empêche pas le développement des spores. a = test avec *C. versicolor* et b = test avec *Antrodia sp*.

Les figures allant de 3.65 à 3.67 représentent les résultats obtenus selon les différents dosages des amyrynes. L'action de ces composés est proportionnelle au dosage. Au fur et à mesure que la quantité du mélange α - et β - amyryne augmente une meilleure résistance est observée.

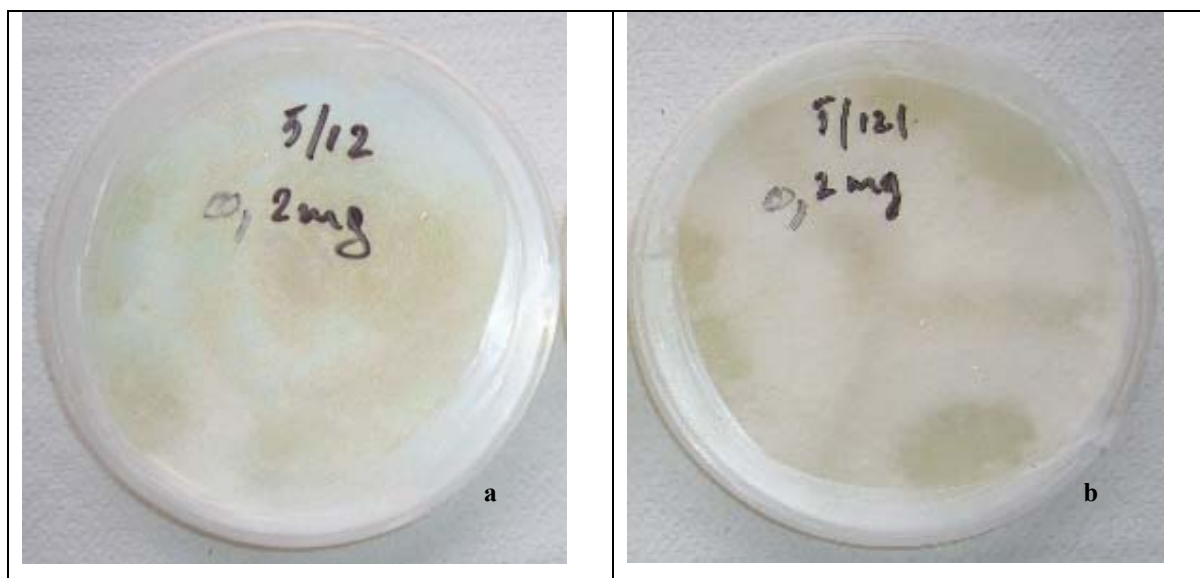


Figure 3.65 : Dosage des amyriines pour 0,2 mg pour 10 mL de THF.

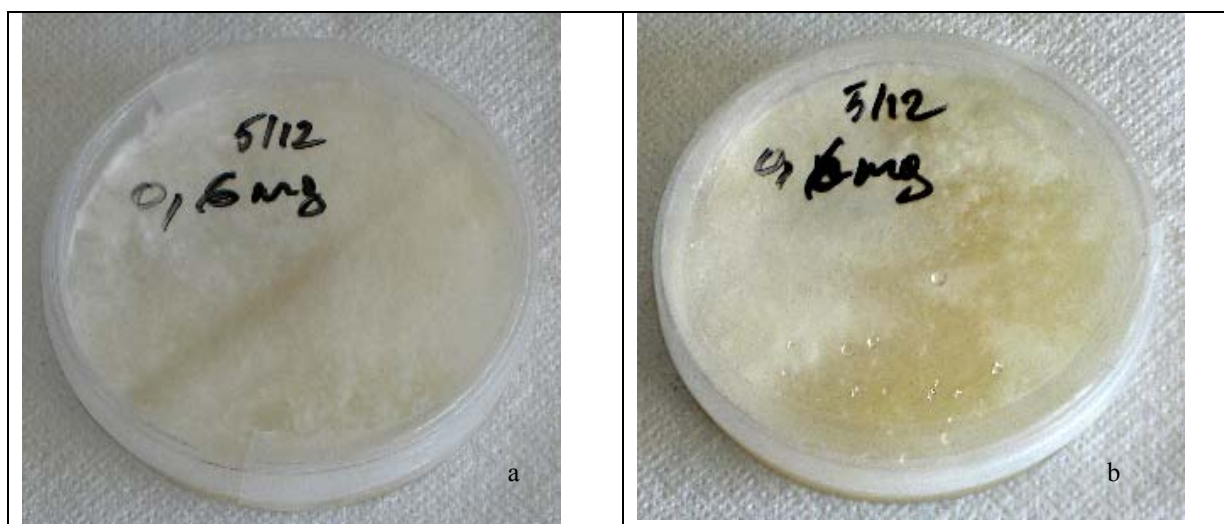


Figure 3.66 : Dosage des amyriines pour 0,6 mg pour 10 mL de THF.

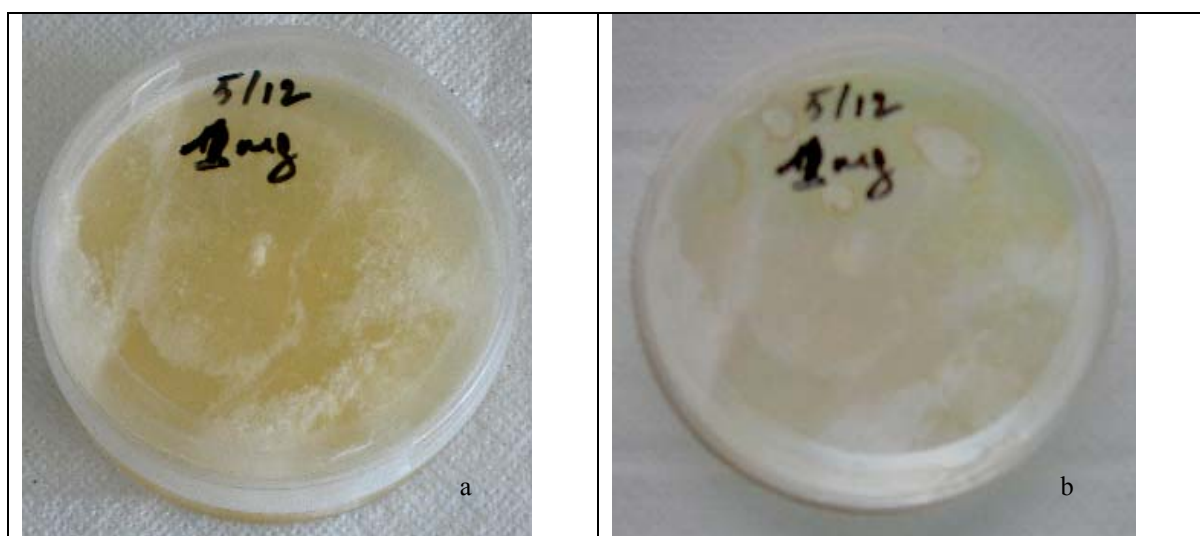


Figure 3.67 : Dosage des amyriines pour 1 mg pour 10 mL de THF.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous allons tenter de déterminer les causes qui peuvent être à l'origine des résultats présentés au chapitre précédent en partant de la fixité du plan ligneux du bois d'Okoumé, en se référant aux caractéristiques anatomiques des bois de feuillus déterminées par Normand (1972). Des comparaisons sont tirées avec certains bois commerciaux qu'on trouve au Gabon.

IV-1 Fixité du plan ligneux

Ce terme signifie que, pour une espèce donnée, on retrouvera toujours un schéma-robot caractéristique de cette espèce (Normand 1972). La description faite dans la présente étude est étroitement similaire avec les précédentes faite par Brunck (1990), Richter (2000) et Minkuè (2000). Le bois d'Okoumé a des pores disséminés dans le cerne sans disposition particulière. Il a une structure moyenne en vaisseaux soit 5 à 9 pores/mm² composés à 85% de diamètre tangentiel qui varie de moyen à grossier (diamètre supérieur ou égal à 150 µm). Cette taille des vaisseaux résulte du climat régnant dans ce pays. Les précipitations annuelles atteignent 2000 à 3800 mm en moyenne avec des températures moyennes oscillant entre 22 et 32°C. Les fibres sont également de dimensions moyennes tant en longueur (820 à 1160 µm) qu'en largeur (18 à 29µm). La disposition du parenchyme axial paratrachéal juxtavasculaire plaqué au vaisseau justifie la forte présence du phénomène de thylose. Les thyloses sont des proliférations d'une cellule de parenchyme adjacente à un vaisseau. Il y a expansion d'une cellule parenchymateuse, plus turgescente au milieu du lumen de l'élément vasculaire à travers la membrane mitoyenne d'un couple de ponctuation. Les méats des rayons ligneux sont remplis d'oléorésine mais il n'existe pas de canaux sécréteurs dans le bois d'Okoumé. On les trouve plutôt dans le liber. La présence de l'oléorésine dans les rayons peut être justifiée par les échanges de substance entre cellules adjacentes par osmose et le fait que les rayons ligneux rayonnant à partir de la moelle et se poursuivant au-delà du bois dans le liber. Ce type de structure et de fonctionnement ont également été observés par Delabarre *et al.* (1995) chez l'hévéa (*Heva brasiliensis*). Les rayons ligneux chez l'Okoumé sont étroits, petits et leur proportion au millimètre est rare à moyen.

IV-2 Cerne annuel de l'Okoumé

L'Okoumé est un bois à pores diffus n'ayant ni disposition particulière ni évolution graduelle précise des diamètres des vaisseaux. Cette situation ne permet pas de définir l'accroissement annuel de l'Okoumé.

La disposition du parenchyme axial n'offre pas non plus l'opportunité de délimiter le cerne chez ce bois comme Mariaux (1969) a pu le démontrer chez le limba (*Terminalia superba*). Cependant, l'observation au microscope du tissu fibreux révèle une diminution progressive du diamètre radial au profit du tangentiel au fur et à mesure que l'on se rapproche de la bande sombre. Parallèlement, on note que les parois deviennent plus épaisses.

Mariaux (1970) a défini le cerne d'Okoumé à quatre bandes dont une grande bande claire, une grande bande sombre, une fine bande claire et une fine bande sombre, qu'il fait correspondre avec les quatre saisons dont on a coutume de caractériser le climat du Gabon. Cependant, il relève l'ambiguïté quant à la présence ou l'absence des fines bandes qui devraient résulter des deux petites saisons sèche et pluvieuse. Cette situation est également évoquée par Berlingard *et al.* (1996). Dans la présente étude, on a observé qu'au-delà de la quinzième année d'existence de l'Okoumé les fines bandes sont rarissimes voire inexistantes et le plus souvent ne sont pas présentes sur tout le périmètre du cerne ce qui donne l'impression d'un détachement ponctuel. Leur présence les premières années reposerait sur le caractère biologique de cette Burseraceae. L'Okoumé est une espèce héliophile et très sensible aux variations mésoclimatiques. L'existence de ces fines bandes est plus en rapport avec le phototropisme entraînant par la suite le phénomène de verticalisation ou une réponse à un stress hydrique et aux sollicitations causées par le monde animal comme c'est le cas des éléphants qui apprécient les jeunes pousses d'Okoumé et s'y frottent le plus souvent. Ce qui amène à considérer ces fines bandes non continues et résultant souvent de réponses de l'arbre comme étant de faux cernes. L'existence de ces faux cernes a également été démontrée chez le teck par Priya *et al* (1998) qui imputent cela à la réponse de l'arbre induite par les facteurs du milieu comme la sécheresse ou l'excès de précipitations pendant la période sèche.

Le climat du Gabon se caractérise par deux saisons ; une longue saison humide de neuf mois et une saison sèche de trois mois (juin, juillet et août). L'état des précipitations au Gabon interdit d'évoquer une situation de stress hydrique pouvant affecter le bois d'Okoumé en dehors de la saison sèche. Au mois d'août le niveau des précipitations avoisine zéro mais il y a une intense activité des chutes occultes. Au cours de la période sèche, il se produit un phénomène physiologique remarquable chez l'Okoumé (Leroy-Deval 1976, Brunck *et al.* 1990). D'après ces auteurs « tout se passe comme si au mois d'août, un certain nombre de rameaux étaient prêts à fleurir mais que les ébauches florales apparaissent soit à partir du 15 août soit le 15 septembre... ». On pense donc que la conjugaison du déficit hydrique marqué de juin à août et l'amorce de la floraison marquent la limite du cerne chez l'Okoumé

Les pluies qui arrivent vers mi-septembre pour s'arrêter au mois de mai vont plutôt entretenir un cycle de métabolisme chez l'Okoumé :

- ❖ Poursuite de la floraison jusqu'en novembre voir mi-décembre,
- ❖ Feuillaison de décembre à janvier,
- ❖ Fructification de janvier à mars.

Ce cycle est continu et nécessite un apport suffisant en eau, écartant toute présence de stress hydrique. De plus c'est à la fin de ce cycle que l'Okoumé augmente grandement en diamètre (Mariaux 1970).

A la lumière de ce qui précède le cerne du bois d'Okoumé a été limité aux deux grandes bandes conduisant à la définition de deux types de bois dans l'accroissement annuel du bois d'Okoumé :

- ❖ La grande bande sombre qui caractérise l'amorce du métabolisme et la saison sèche de juin à août. Elle représente le bois de saison sèche qui serait l'équivalent du bois d'été ou bois final,
- ❖ La grande bande claire qui caractérise l'entrain du métabolisme et correspond à la longue saison de pluies ou humide de septembre à mai. Elle représente le bois de saison humide qui serait l'équivalent du bois de printemps ou bois initial.

Les largeurs des accroissements annuels ont ainsi été mesurées à partir de cette définition du cerne. La chute de la largeur des cernes à la deuxième année serait consécutive à l'affranchissement de la plantule de la graine. La plante doit chercher à se fixer et puiser les ressources nutritives dans le sol. Quant au pic de largeur observé au cerne d'âge cambial 7 ans, il est la conséquence d'une croissance exponentielle après la difficile étape d'adaptation du cerne 2 mais à la 8^e année survient la compétition intraspécifique pour l'accession à la strate supérieure, entraînant la diminution de largeur de cerne.

IV-3 Limite bois juvénile et bois adulte

On n'a pas trouvé une limite fixe ou définitive du fait que la limite entre les deux types de bois est spécifique au caractère mesuré (Zobel et Sprague 1998) et que l'état vivant de la structure végétale implique nécessairement une notion de variation qui caractérise son côté matériau hétérogène. Les différents âges limites trouvés chez l'Okoumé retracent plutôt l'évolution d'un peuplement de cette espèce, décrite au chapitre 1 (paragraphe I-13).

En faisant un rapprochement avec l'évolution d'un peuplement d'Okoumé, on constate que :

- ❖ La limite trouvée à 13 ans correspond à la plénitude de la strate 2,
- ❖ La limite à 15 ans correspond à la compétition intraspécifique pour accéder à la 3^e strate,
- ❖ Les limites à 19 ans et 20 ans marquent l'expansion de la strate 3 et la constitution des cellules biologiques par les anastomoses racinaires,
- ❖ La limite à 29 ans exprime l'équilibre d'un peuplement d'Okoumé, car vers 30 ans le peuplement d'Okoumé atteint son équilibre.

Le tissu cellulaire du bois d'Okoumé retrace l'histoire de son peuplement et son bois relate également l'histoire climatique. En somme ce bois peut être considéré comme un indicateur biologique dont on peut se servir pour interpréter les mouvements écologiques dans le temps.

IV-4 Masse volumique

Quel que soit le site étudié, la masse volumique du bois d'Okoumé trouvé est inférieure à 500 kg/m³, classant l'Okoumé dans la catégorie des bois très légers selon la classification des bois tropicaux établie par le Cirad (cf. chapitre 1, paragraphe I-24.1). Cette faible masse volumique est imputable à la structure anatomique du bois d'Okoumé. Ce bois est constitué à 85% de vaisseaux ayant un diamètre tangentiel moyen supérieur ou égal à 150 µm. La disposition des pores y contribue également ; les vaisseaux n'ont ni disposition particulière ni une évolution singulière dans le cerne. Cependant, cette position offre l'avantage de la flottabilité du bois d'où son utilisation dans la construction de bateaux de plaisance. Cette propriété varie peu chez l'Okoumé quelle que soit la position géographique. Ceci résulterait du non suivi des plantations forestières entraînant une conversion des forêts plantées en forêt naturelle secondaire. On n'observe pas non plus de variation significative entre le bois juvénile et le bois adulte (données en annexe page 201). Le caractère héliophile de l'Okoumé en est responsable avec la présence de bois de tension qui est produit lors du phototropisme. Le bois de tension peut avoir une masse volumique supérieure d'environ 30% par rapport au bois normal (Nepveu 1994). La détermination de manière plus ou moins arbitraire de l'âge cambial des éprouvettes n'est pas en reste.

Le cerne médian définit l'âge cambial de l'éprouvette mais les accroissements adjacents participent également de façon effective à la mesure du caractère, ce qui peut entraîner une confusion aux limites des duramens et entre bois juvénile et bois adulte d'autant plus qu'il ne faut pas négliger l'effet de l'angle biologique⁴ de l'arbre. Le facteur eau est à prendre également en considération.

Les sites et zones écologiques à fortes précipitations donc bien drainés présentent les moyennes de masse volumique les plus faibles notamment Cocobeach et Ndjolé. A l'opposé Mitzic qui se situe en zone écologique **A** caractérisée par le plus faible niveau des précipitations et ne renfermant pas de grand cours d'eau, présente la plus forte masse volumique par rapport aux sites étudiés. Dans cette zone **B** à grande eau les arbres connaissent en permanence un flux hydraulique assez bon, maintenant par conséquent les vaisseaux grandement ouverts.

IV-5 Module d'élasticité longitudinal (E_L)

Les modules d'élasticité longitudinaux calculés selon les sites sont tous faibles selon la classification établie par le Cirad ; l'Okoumé fabrique donc un bois faible. Comme pour la masse volumique ce résultat est tributaire de la structure anatomique. Les bois ayant un module d'élasticité élevé ont une proportion de vaisseaux au millimètre carré faible à très faible et leurs fibres sont longues avec des parois d'épaisseur moyenne à très épaisse : tel est le cas de l'ozouga (*Sacoglottis gabonensis*), du padouk (*Pterocarpus soyauxii*), du wengé (*Millettia laurentii*) et d'azobé (*Lophira alata*) (tableau 4.1). Nepveu (1994) relève également cette conséquence néfaste des fibres de faible longueur sur les propriétés mécaniques. Les deux duramens les plus proches de l'aubier (intermédiaire et externe) ne marquent pas de différence significative ; le critère de l'âge cambial de l'éprouvette par le chevauchement de cerne entre les deux duramens peut en être en partie responsable. Le E_L chez l'Okoumé est très affecté par son origine (site, écosystème, zone écologique). La contribution de l'homme par l'apport sylvicole, bien qu'approximatif dans le cas du Gabon peut avoir également des conséquences. De plus les plantations d'intérêt dans cette étude datent de 1960 mais ce n'est que dans les années 70 que l'on a commencé à maîtriser la sylviculture de cette espèce (Leroy-Deval 1976). Le facteur eau influence le E_L chez l'Okoumé. Il est relevé que les sites à faibles précipitations notamment Mitzic offrent la meilleure rigidité.

⁴ Un angle biologique résulte du fait que le long d'une génératrice de la grume même si celle-ci est un tronc de cône parfait, l'angle du fil n'est jamais nul. Cet angle varie de façon non négligeable dans l'arbre (Nepveu 1994)

Ce facteur peut être mis à profit pour des orientations sylvicoles compte tenu de l'utilisation d'Okoumé dans les constructions. La contribution édaphique devrait aussi être prise en considération mais aucune orientation n'a été prise dans ce sens pour la présente étude, ce qui interdit de se prononcer de manière effective.

Les faibles valeurs des masses volumiques et des E_L fréquemment rencontrées à Cocobeach et M'Voum peuvent être imputées dans une certaine mesure à la surexploitation de ces sites. Ces massifs forestiers sont sujets à une intense récolte de bois depuis le 19^e siècle (Heizt1943). Les embruns marins devraient également jouer un rôle (les deux sites sont situés dans les environs de la côte atlantique).

IV-6 La stabilité dimensionnelle

Les moyennes obtenues avec les retraits totaux sont assez faibles tandis que les PSF sont plutôt moyens et presque identiques quelle que soit la provenance. Le faible retrait résulte de la forte présence de thylles et dans une certaine mesure du taux assez élevé de silice qui peut être de 0,335% d'après Brunck *et al.* (1990). Ces composantes anatomiques rendent difficiles ou ne permettent pas les échanges (Dirol *et al.* 2001). En plus le bois d'Okoumé est moyennement dense.

Il existe une relation significative entre la position radiale et les retraits linéaires. Ces derniers augmentent significativement de la moelle vers l'écorce comme Dumonceaud (2001) l'a également observé sur le châtaignier. Une relation est faite entre ce phénomène et la masse volumique : plus elle est forte plus les retraits transversaux sont importants (Aubert 1987, Mazet 1991). Les taux des retraits diffèrent remarquablement d'un site à l'autre. Les sites à forte pluviométrie ont les moyennes les plus élevées. Cette variabilité résulterait certainement de la sylviculture pratiquée, de la disponibilité en eau, surtout d'un contrôle génétique (Harris 1989, Zobel et Buijtenen 1989). Ces causes justifient également la variabilité observée au niveau du PSF. Les écarts entre les valeurs de PSF radial et PSF tangentiel sont assez faibles avec les valeurs tangentielles toujours supérieures comme le rapporte la littérature (Skaar 1988, Dumonceaud 2001).

IV-7 Constituants chimiques de l'Okoumé

Les parois de l'Okoumé sont en grande partie constituées de polysaccharides. Les quantités trouvées sont en accord avec les études antérieures (Tableau 3.6 au chapitre 3). En faisant la moyenne des cendres soit 0,7% (cf. tableau 1.9 au chapitre 1), on déduit par soustraction une quantité d'hémicellulose de 15,4%, quantité voisine de celles trouvées par Savard (1960), Brunck *et al.* (1990), Minkuè (2000). Les stérols constituent majoritairement les composés de faibles poids moléculaires dans les fractions analysées, c'est-à-dire les extraits toluène/éthanol solubles dans le dichlorométhane. La présence de produits phénoliques dans le bois d'Okoumé reste cependant à rechercher. L'existence de 2,4-di-tert-butylphénol dans un arbre en provenance de M'Voum intrigue d'autant plus que dans les études antérieures il n'est pas fait état d'un tel produit tout comme dans la suite des analyses faites. Dans ce travail seul 35% d'extraits toluène/éthanol se sont solubilisés et ont fait l'objet de cette étude. Il y a lieu de s'interroger sur la nature et le potentiel que représentent les 65% de produit restant. La présence de la β -amyrine à l'état de traces se justifie par l'étalement du rayon ligneux de la moelle jusqu'au liber et ces rayons ligneux sont de faible proportion et de petite taille chez l'Okoumé.

Les composés volatils de l'oléorésine d'Okoumé présente des variations assez importantes, à l'intérieur de site (cas de Bokoué) et entre sites. La variabilité mise en évidence dans la présente étude n'est pas un cas isolé. L'examen des résultats obtenus par Dupont (1930), Tessier (1982) et Guang-Yi (1988) révèlent également des différences remarquables pour les composés majoritaires.

L'amyryne est majoritaire comme composé non volatil. Il a également été ainsi quantifié par les trois précédents auteurs. Que le produit soit volatil ou non, la variation des résultats observés peut s'expliquer par l'origine de l'échantillon, les phénotypes des arbres, la disposition en éléments minéraux des stations et les conséquences liées à l'héritabilité. En plus des sesquiterpènes n'ont pas été trouvés alors que la méthode d'analyse utilisée pour l'examen des composés non volatils permet de les identifier.

IV-8 Durabilité naturelle du bois d'Okoumé

Des quatre champignons de type pourriture testés, une souche dans chaque zone a occasionné des dégâts importants toutes éprouvettes confondues, notamment *Antrodia sp* champignon de pourriture brune des zones tropicales avec 18,8% de pertes de masse absolues et *Coriolus versicolor* champignon de pourriture blanche des zones tempérées avec 17% de pertes de masse absolues. Les deux autres agents de dégradation ont causé des pertes de masse relativement moins importantes que les deux précédents dont *G. trabeum* (zones tempérées) avec 13,2% de pertes de masse et *P. sanguineus* (zones tropicales) avec 12,7%. A la vue de ces résultats et compte tenu des utilisations transversales du matériau bois, il serait intéressant de ne pas catégoriser les tests de durabilité ou affecter des spécialisations à l'action d'un micro-organisme en tenant uniquement compte de l'origine climatique du matériel végétal. Il n'existe pas de différence notable entre les dégâts causés entre les champignons dans les sous-groupes (superficiels) établis plus haut. En plus la durabilité vis-à-vis d'un groupe de champignons ne peut pas servir à prédire celle vis-à-vis d'autres organismes (De Groot et al. 2000). Les bois tropicaux peuvent être aussi bien attaqués par les pourritures de zones tropicales que celles des zones tempérées dès lors que les conditions de croissance du champignon sont réunies (Kokutse 2002).

L'expression des résultats de durabilité sous forme de pertes de masse absolues ou relatives peut générer des différences plus ou moins sensibles (Dumoncaud 2001, Kokutse 2002). La conversion des résultats en perte de masse relative peut soit augmenter ou diminuer le comportement de l'essence testée. Les éprouvettes exposées au *P. sanguineus* ont vu leur résistance améliorée en pertes de masse relatives, la classe 2 (durable) a eu un gain de 9% par rapport à la perte de masse absolue, du coup l'Okoumé frôle la classe durable. C'est avec justesse que Van Acker et al. (1998) recommandent de déduire la durabilité d'une essence directement de sa perte de masse absolue. On peut ainsi s'affranchir de la variabilité naturelle de l'essence de référence et minimiser les sources d'erreurs possibles.

L'expression de la durabilité dans le bois d'Okoumé est très complexe puisque chaque site présente sa spécificité (l'origine génétique, les influences environnementales et l'apport positif ou négatif de l'homme). L'examen de l'Okoumé nécessite une prise en compte de la différenciation géographique (Muloko 2001). Le comportement de l'Okoumé face aux quatre champignons est regroupé par territoire géographique.

Dans l'étude de l'évolution de la durabilité sur le rayon de l'arbre, aucune influence de l'âge n'est marquée quel que soit le champignon. L'action de chaque micro-organisme se trouve indépendante suivant le site et l'arbre qui porte l'éprouvette. On n'a pas toujours l'évolution classique selon laquelle le duramen adjacent serait moins résistant que le duramen proche de l'aubier. A Bokoué, le duramen externe s'est toujours avéré moins résistant que le duramen interne. L'influence de l'arbre sur la durabilité naturelle des éprouvettes a été mise en évidence au travers des quatre champignons utilisés (*G. trabeum*, *C. versicolor*, *Antrodia sp.* et *P. sanguineus*). Autrement dit, chaque arbre a un comportement qui lui est propre face aux agents de dégradation. A l'exception de *C. versicolor*, on retrouve cet individualisme par rapport aux différents sites. Ne retrouvant pas de schéma classique de disposition de la résistance de la moelle vers l'écorce (Deon *et al.* 1980, Guilley *et al.* 2004, Dumonceaud 2000, Kokutse 2006). On peut donc penser que les constats le long du rayon entre site et arbre sont davantage liés au mode propre d'attaque du champignon et de la disponibilité de substances nourricières et à leur accessibilité.

Les facteurs responsables de la durabilité sont généralement de deux ordres :

- ❖ D'ordre chimique dont la singularité revient aux biocides naturels (Schultz *et al.* 1995). Les constituants pariétaux contribuent également par le taux de cristallinité de la cellulose, la lignification des parois cellulaires surtout de leur constitution monomérique avec une dominance d'unités guaïacyles (Scheffer et Cowling 1966, Syaffi *et al.* 1988),
- ❖ D'ordre anatomique dont la disponibilité des substances appréciées par les agents de dégradation et la structure du plan ligneux (Dirol *et al.* 2001).

L'examen des extractibles du bois d'Okoumé n'a pas permis de découvrir un composé avec une propriété biocide évidente et les recherches antérieures ne disent rien également. Rappelons que 65% des produits restent à analyser. Quant à la lignine de l'Okoumé, son rapport S/G est de 0,44 et le taux de cristallinité faible soit 57% (Safou 2005). Les unités monomériques de l'Okoumé sont à dominance syringyle. Avec une telle constitution le complexe lignine-carbohydre ne représente pas une barrière suffisamment solide pour contrer de façon effective l'activité enzymatique des champignons.

L'Okoumé renferme une grande quantité d'holocellulose offrant ainsi une source de nourriture appréciée par les micro-organismes. En revanche le phénomène de thylose est bien développé dans les vaisseaux de l'Okoumé, obstruant le lumen et bouchant les punctuations pendant la prolifération du parenchyme dans le vaisseau. Cette barrière à une action double (verticalement dans le sens du fil et horizontalement par les ouvertures de communications inter et radiovasculaires) rendant difficile voire impossible la progression des hyphes et la reprise de l'humidité par le bois. L'examen des composés à faible poids moléculaire n'ayant pas à ce niveau permis de trouver un biocide, le rapport S/G assez fort et le taux de cristallinité faible laissent entrevoir que la contribution des constituants chimiques est faible. Brunck *et al.* (1990) ont montré que cette essence renferme un taux élevé de silice, et compte tenu du phénomène de thylose en présence. Ceci, nous conduit à dire que l'Okoumé doit sa résistance face aux champignons, principalement à l'action conjuguée de thylles et de la silice. Les essences classées très durables à durables (Tableau 4.2) en dehors de leur masse volumique élevée, présentent des caractères anatomiques communs avec l'Okoumé : punctuations des vaisseaux aréolées, nombre de pores au millimètre carré rare à moyen et présence du phénomène de thylose comme chez l'Okoumé.

Au niveau inter-arbre quel que soit le champignon en présence, le facteur de variabilité arbre se distingue des autres. Il est le seul à influencer significativement l'action du champignon. Chaque arbre se défend selon son potentiel chimique et biologique. Dirol *et al.* (2001) rapportent que les facteurs contribuant à la durabilité naturelle d'un bois reflètent son potentiel génétique. Ce constat se dégage également au niveau des écosystèmes où l'Okoumé issu des plantations s'est le mieux comporté face aux champignons les plus virulents (*C. versicolor* et *Antrodia sp*) par rapport à celui de la forêt naturelle. Dans ce milieu ces deux souches fongiques ont le plus dégradé le bois issu de Ndjolé. La résistance des plantations est certainement due à la contribution de l'homme par le type de sylviculture pratiquée. Le traitement sylvicole joue sur la formation du bois et si l'intervention avait été assez assidue dans ce milieu la durabilité de bois d'Okoumé de plantations serait peut être meilleure. Les résistances entre les arbres pourraient être attribuées à la virulence des souches fongiques utilisées. Les sources de variabilité sont nombreuses et il ne serait pas judicieux de penser exclusivement aux interactions potentielles qui peuvent provenir du matériau testé ou du biotope.

La présente étude a permis de tester des méthodes d'évaluation de la durabilité naturelle en laboratoire. La méthode de Laboratoire utilisée n'a pas présenté statistiquement de différence significative avec la méthode de test recommandée par la norme EN 350-1. On a certes une différence au niveau de la perte de masse absolue mais l'écart entre les deux méthodes reflète plutôt le temps d'exécution. Par ailleurs l'information obtenue demeure identique. En plus dans le temps l'Okoumé des plantations oppose toujours une résistance moyenne face à *Antrodia sp.* Van Acker et al. (1998) ont réalisé des tests de durabilité naturelle sur des essences des zones tropicales et tempérées en confrontant les résultats de la méthode de réduction de temps à ceux donnés par la norme EN 350. Ils retrouvent le même classement des essences bien que les proportions de pertes de masse absolues marquent des écarts ; mais elles ne diffèrent pas significativement. D'après les résultats obtenus avec un test en temps et en équipement réduits, l'information acquise sur le bois d'Okoumé reste la même qu'avec les 16 semaines exigées par la norme : le bois d'Okoumé est moyennement durable. On doit plutôt voir la norme EN 350 dans son rôle de guide mais pas comme une épée de Damoclès sur la tête du praticien.

La présente étude classe selon la norme EN 350 le bois d'Okoumé moyennement durable donc **classe 3**, quels que soient le champignon utilisé et la méthode pratiquée. Ce résultat rejoint le classement établi par l'ATIBT et positionne le bois d'Okoumé largement au dessus du classement de Brunck *et al.* (1990) et Gérard *et al.* (1998).

IV-9 Impact des amyrynes

Les tests réalisés avec les amyrynes présentent un grand intérêt pour l'amélioration de la durabilité du bois d'Okoumé vis-à-vis des champignons et ouvrent la marche vers un traitement de bois respectant l'environnement. L'emploi de biocide naturel limiterait les problèmes liés à la pollution par sa biodégradabilité. Le mélange α - et β - amyryne de l'oléorésine de l'Okoumé oppose une résistance au développement de spores de champignons. Les tests se poursuivent pour confirmer l'efficacité de ce produit.

IV-10 Récapitulatif

Le bilan présenté au tableau 4.1 souligne les potentialités des produits issus des plantations par rapport à ceux de la forêt naturelle. Fort est de constater que les différences entre les deux écosystèmes sont minimales. Le bois des plantations peut très bien être utilisé dans les emplois habituels du bois d'Okoumé et par conséquent renforcer le capital ligneux naturel qui existe déjà. La connaissance de l'origine des semis aurait permis de faire une discrimination pour d'éventuels programmes de reboisement. Les valeurs moyennes dissipent un peu l'apport génétique des graines. Compte tenu de la hauteur moyenne (7 m) considérée dans cette étude et vu les résultats obtenus, le bois d'éclaircie peut être mis en œuvre.

	$\bar{x} \pm \sigma_x$					
	Plantation	Forêt naturelle	Probabilité	Zone A	Zone B	Probabilité
M.volumique (kg/m ³)	451±2,7	449,5±3,8	P=0,763	475±9,4	449±2,3	P=0,004
E _L (MPa)	8535±72	9127±109	P<0,001	9587±314	8707±63	P=0,012
R. volumique (%)	9,8±0,5	9,7±0,4	P=0,181	9,5±0,8	9,8±0,4	P=0,014
R. radial (%)	3,56±0,2	3,64±0,2	P=0,015	3,53±0,5	3,6±0,2	P=0,136
R. tangentiel (%)	6±0,3	6±0,2	P=0,375	5,9±0,3	6±0,3	P=0,087
PSFr (%)	30,4±0,2	30±0,2	P=0,136	29±0,4	30,4±0,2	P=0,007
PSFt (%)	31,4±0,4	30±0,2	P=0,773	30,2±0,4	31,2±0,2	P=0,038
GT (%)	13,6±1	12,8±0,6	P=0,498	13,7±1	13±0,6	P=0,622
CV (%)	15,2±0,6	18,6±0,9	P=0,002	19,1±2	16,7±0,6	P=0,271
A (%)	15,9±0,6	21,1±1,1	p<0,001	19,9±2,2	18,6±0,7	P=0,562
PS (%)	11,4±0,7	13,8±0,9	P=0,031	15,8±0,2	12,2±0,6	P=0,056

Tableau 4.1 : Caractéristiques technologiques du bois d'Okoumé par écosystème et zone écologique

	Pores N/mm ²	Ponctuation/v aisselle	Long/ fibre (µm)	Paroi/ fibre	Ponctuation/f ibre	Thylle	*E _L (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)	Retrait radial (%)	Retrait tangential (%)	Classe durabilité
Tola	6-15	aréolé	1000- 1800	moyen	simple/ aréolée	non	10900	470-580	2,4	5,5	
Douka	5-19	aréolé	1060- 2330	moyen	simple/ aréolée	oui	13900	600-750	5,6	3,3	
Kotibé	17-29	aréolé	-	moyen	simple/ aréolée	non	13000	750-800	5,6	9	
Iroko	1-10	aréolé	590- 2030	moyen	simple/ aréolée	oui	12700	550-750	3,7	5,8	1-2
Dibétou	5-13	aréolé	880- 1460	moyen	simple/ aréolée	non	10400	450-580	3,7	5,8	
Obéché	1-8	aréolé	-	moyen	simple/ aréolée	oui	7300	320-440	2,9	5	
Ozouga	6-9	aréolé	-	épaisse	aréolée	non	21800	890	5,5	9,1	
Padouk	1-2	aréolé	1035- 1660	moyen	simple/ aréolée	non	15600	650-900	3,2	5	
Bilinga	2-12	aréolé	1100- 2500	moyen	aréolée	non	14600	730-890	7,5	12,3	
Khaya	2-7	aréolé	1380- 1620	moyen	simple/ aréolée	non	11800	500-680	3,7	5,4	
Wengé	1-3	aréolé	1540- 2060	épaisse	simple/ aréolée	non	21000	870	5,9	9,1	2
Bahia	15-40	aréolé	1750- 2950	épaisse	aréolée	non	11000	550-600	4,3	8,9	
Azobé	1-7	aréolé	1700- 2900	très épaisse	simple/ aréolée	non	21500	1000-1100	7,3	10,3	1-2
Aiélé	2-5		990- 1415	mince	simple/ aréolée	oui	10400	400-600	5,9	9,8	
Doussié	-	aréolé	-	moyen	simple/ aréolée	non	17000	700-880	3	4,4	1
Teck	4-9	aréolé	700- 1400	moyen	simple/ aréolée	oui	13700	670	2,6	4,7	1

Tableau 4.2 : Bilan non exhaustif des caractéristiques anatomiques, physico-mécaniques et classes de durabilité.

Ce tableau 4.2 est un regroupement de travaux provenant de trois sources dont les caractéristiques anatomiques par Richter *et al.*(2000), physico-mécaniques par Gérard *et al.* (1998) et classes de durabilité naturelle selon la norme EN 350. Les modules d'élasticité longitudinaux ont été recalculés en utilisant le coefficient de passage du module de flexion 3 points à celui 4 points 1,24 défini par Brancherau (1997). Le tableau 4.3 donne les noms scientifiques des essences du tableau 4.2 et en langue du Gabon.

Nom pilote ou commercial	Appellation gabonaise	Nom scientifique	Famille
Tola	Emolo	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	Fabaceae
Douka		<i>Tieghemelle africana</i> Pierre	Sapotaceae
Kotibé	Olborbora	<i>Nesogordonia papaverifera</i> Capuron	Sterculiaceae
Iroko	Abang	<i>Milicia excelsa</i> Berg	Moraceae
Dibétou	Eyan	<i>Lovoa trichilioides</i> Harms	Meliacea
Obéché		<i>Triplochiton scleroxylon</i> Sshum.	Sterculiaceae
Ozouga		<i>Sacoglottis gabonensis</i> Urban	Humiriaceae
Padouk	M'Bel	<i>Pterocarpus soyauxii</i> Taub.	Fabaceae
Bilinga	Aloma	<i>Nauclea diderrichii</i> Merrill	Rubiaceae
Khaya	N'Gollon	<i>Khaya ivorensis</i> A.	Méliciaceae
Wengé	Awong	<i>Millettia laurentii</i> De Wid.	Fabaceae
Bahia	Elolom	<i>Mitageny ciliata</i> Aubréville	Rubiaceae
Azobé	Ekki	<i>Lophira alata</i> Banks	Ochnaceae
Aiélé	Abeul	<i>Canarium schweinfurthii</i> Engl.	Burseraceae
Doussié		<i>Afzelia africana</i> Smith	Fabaceae
Teck		<i>Tectona grandis</i> L.	Verbenaceae

Tableau 4.3 : Noms scientifiques et famille de quelques essences qu'on rencontre au Gabon trouvée avec une appellation en gabonais.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La *démarche Okoumé* est une idée qui englobe des problèmes scientifiques qui concernent et gravitent autour de l'Okoumé ; essence première au Gabon. Cet arbre représente le plus gros capital du potentiel ligneux du Gabon soit 130 millions de mètres cubes (MEF 1995). Ce capital naturel est-il suffisant pour répondre aux besoins futurs de ce pays en matière de bois d'œuvre ? Le capital ligneux des forêts naturelles est insuffisant pour répondre à une industrie pérenne de la filière bois (Buttoud 1991). En forêt tropicale, les coupes d'exploitation constituent une sorte de cueillette des produits forestiers. A cet approvisionnement quantitatif, il convient d'ajouter un appauvrissement qualitatif car la cueillette porte exclusivement sur les beaux arbres et les mauvais restent comme porte graines (Leroy-Deval 1976). Le Gabon dispose théoriquement de 30000 ha de forêts plantées (Koumba Zaou 1999).

Ces réponses ne sont pas du tout rassurantes pour garantir un développement permanent de la filière bois et garantir la sauvegarde de la biodiversité au Gabon.

Devant ce flou, la « *Démarche Okoumé* » est mise en route. Pourquoi l'Okoumé? Le monde ligneux gabonais tourne autour de cet arbre et ses dérivés. Il est vrai que beaucoup de choses ont été dites à propos de cet arbre donnant l'impression de sujet épuisé mais en fait peu de choses ont été réalisées sur le bois fabriqué par cette burseraceae. C'est également l'essence au centre de la filière forêt-bois au Gabon depuis 1889.

Dans le présent travail qui marque le départ de la démarche, l'urgence est de renforcer le capital forestier potentiellement utilisable. Le seul recours possible dans le cas du Gabon reste les produits du reboisement peu ou mal connus des gestionnaires et des potentiels investisseurs et autres. Nous avons donc entrepris une étude mettant en évidence la qualité du bois d'Okoumé des plantations dans certaines de ses propriétés technologiques et chimiques. Les valeurs intrinsèques des bois issus de ce milieu artificiel sont confrontées avec celles de la forêt naturelle évaluée, parallèlement par le rapport *biocénose-biotope*. En tenant compte de ce qui a été fait antérieurement, on a mesuré la masse volumique, le module d'élasticité longitudinal, le retrait volumique total, le retrait radial total, le retrait tangentiel total, les PSF et la durabilité naturelle. La détermination des différentes caractéristiques est précédée de la description du plan ligneux et de la limitation du cerne annuel de l'Okoumé, conduisant à l'estimation des propriétés en fonction de l'âge cambial. Leur mise en relation a permis de définir la limite entre le bois juvénile et le bois adulte (BJ/BA).

Pour l'Okoumé, on peut parler de fixité du plan ligneux car les descriptions antérieures [Mariaux (1970), Brunck (1990), Minkuè (2000), Richter (2000)] et la présente étude autant sur la forêt naturelle que sur les plantations présentent le même schéma-robot. La mise en relation des observations (macroscopiques et microscopiques), des caractères biologiques (essence héliophile et sensible aux mésoclimats) et des facteurs environnementaux (précipitations et températures) a permis de définir de façon simplifiée la limite du cerne annuel de l'Okoumé. Par conséquent les différents bois caractérisant le cerne ont été définis. L'accroissement de l'Okoumé se compose de deux grandes bandes :

- ❖ Une grande bande claire (environ trois quarts de la largeur du cerne) qui résulte des neuf mois de saison de pluies encore dite saison humide qui fabrique le bois de saison humide,
- ❖ Une grande bande sombre résultant d'une synergie entre la saison sèche et l'amorce de la floraison qui fabrique le bois de saison sèche.

A partir de ce cerne annuel, les caractéristiques de l'Okoumé ont été évaluées en fonction de l'âge cambial suivant un gradient radial de la moelle à l'aubier.

La limite entre le bois juvénile et le bois adulte est exclusivement mesurée en plantation et définie mathématiquement pour s'affranchir de l'interprétation visuelle. Par la méthode de régression linéaire segmentée, les deux types de bois ont été démarqués à partir des caractères émergents du bois juvénile peu sensible à l'effet largeur de cerne. Les accroissements annuels de l'Okoumé décroissent de la moelle à l'écorce avec une chute de largeur au cerne d'âge cambial 2 ans et un pic à 7 ans ($8,6 \pm 1,6$ mm) qui est suivie d'une diminution progressive entravée par des réponses au stress. Différents âges cambiaux limitant les deux types de bois ont été obtenus suivant les caractères évalués : 13 ans avec le retrait longitudinal, 15 ans avec la longueur des fibres de M'Voum, 19 ans avec la largeur de cerne, 20 ans avec la longueur des fibres de Bokoué et 29 ans avec le diamètre moyen des vaisseaux par cerne. Les âges limites trouvés correspondent à la vie d'un peuplement d'Okoumé. D'autres paramètres devraient être mesurés dans un proche avenir, notamment l'angle de microfibrilles et la microdensité dans le cerne.

Les caractéristiques technologiques évaluées sur le bois d'Okoumé présentent des spécificités géographiques. Les sites fortement drainés tel que Cocobeach par le fleuve Como ajouté aux apports maritimes et Ndjolé par le fleuve Ogooué ont les masses volumiques les plus faibles.

Ce caractère est l'un des premiers critères de classification et d'attraction ; il ne serait pas intéressant de choisir dans ce cas les semenciers dans ces sites pour un éventuel reboisement. A l'inverse, la provenance Mitzic avec sa masse volumique proche du bois léger est conseillée pour le choix d'arbres élites. Cette position est confortée par sa meilleure rigidité ; les arbres du site de Mitzic offre la plus forte moyenne de module d'élasticité longitudinal. Le site de Bokoué se positionne en seconde position pour l'approvisionnement en graines. Il offre un comportement assez équilibré tant pour la masse volumique que pour le module d'élasticité. Les orientations de provenances tiennent des pratiques en cours au Gabon sur l'utilisation de *graines tout venant*.

Par rapport à la durabilité naturelle, *Antrodia sp* et *C. versicolor* sont les souches qui ont causé le plus de dégâts au bois d'Okoumé particulièrement à celui en provenance de Ndjolé, entraînant un mauvais comportement des bois de la forêt naturelle. Quel que soit le champignon auquel l'Okoumé a été soumis, son niveau de résistance place son bois dans la classe 3 (moyennement durable) selon l'échelle de classification définie par la norme EN 350. La résistance du bois de cette burseraceae résiderait principalement dans sa structure biologique par le phénomène de thylose, du nombre de pores/mm², des ponctuations de vaisseaux et de son taux assez élevé de silice.

La recherche de biocides naturels dans le bois de cœur a donné un résultat assez mitigé. L'Okoumé renferme-t-il des produits phénoliques qui participeraient à sa défense ? L'analyse chimique de l'oléorésine a plutôt donné des résultats intéressants avec d'une part la détermination et la quantification de produits volatils tels que l' α -phellandrène qui est demandé en cosmétique et l'isolement des α - et β -amyrines de l'oléorésine sans essence. Le test mettant en confrontation les deux souches fongiques ayant occasionné le plus de dégâts avec les composés majoritaires de l'oléorésine montre une opposition de ce mélange d'amyrines au développement des spores des champignons. D'autres tests sont en cours pour confirmer le résultat et l'améliorer.

A la question d'entrée sur le potentiel, nous avons apporté un début de réponse. Dans la présente étude, les propriétés de l'Okoumé sont évaluées de façon à utiliser le maximum possible une grume et à augmenter le capital ligneux utile. Le regroupement des caractéristiques technologiques de l'Okoumé (Tableau 4.2) montre qu'il existe peu ou pas de différences entre le bois issu de forêt naturelle et des plantations.

En dehors du module d'élasticité longitudinal, l'avantage est souvent du côté de la forêt artificielle. Si les plantations avaient eu un suivi efficace, le bois de ce milieu présenterait certainement des qualités meilleures. Par conséquent, le scepticisme sur les produits issus des plantations doit cesser. Ce pays tient une bonne occasion pour établir des parcelles de semenciers et s'assurer un potentiel ligneux en anticipant sur les remplacements des pieds. Pour les futures initiatives sylvicoles, la zone **B** dans les environs des plantations (Estuaire et Moyen-Ogooué) doit être peu sollicitée en termes de semence. La zone **A** est en revanche conseillée. Cependant la relance de programmes de reboisement passe par une identification stricte de l'origine du matériel génétique et les lieux d'exécution des cultures. Les grands déplacements de graines entraîneraient des pertes du potentiel génétique et induiraient des adaptations. Par conséquent, la production et la qualité du bois sont susceptibles d'être affectées. C'est peut-être l'une des causes à l'origine du mauvais comportement de l'Okoumé comme essence de reboisement hors de son aire naturelle.

Dans la continuité des travaux sur l'Okoumé, le rôle bio-indicateur signalé au chapitre 3 doit être approfondi tant pour cette essence que d'autres au Gabon. De récentes études sur des essences forestières ont montré qu'il existait une corrélation spécifique entre la largeur des cernes annuels et les données climatiques particulièrement avec certains mois de façon récurrente (Morales *et al.* 2004, Brien *et al.* 2005). On ignore si la croissance radiale de l'Okoumé offre des corrélations avec les données météorologiques comme les précipitations ou les températures mensuelles. De telles relations ont été trouvées avec d'autres espèces tropicales (Trouet *et al.* 2006). L'assise cambiale est sensible à l'action des facteurs extérieurs ; c'est le cas de la température qui joue un rôle majeur sur la régulation de son activité (Fahn et Werker 1990). Il a été démontré que le régime mensuel des précipitations affectait considérablement la croissance en longueur des fibres d'*Acacia mangium* (Honjo *et al.* 2005). Il serait intéressant de transposer de telles études sur l'Okoumé. En plus de l'allongement des fibres on intégrera de nouvelles données comme le diamètre des vaisseaux et le module d'élasticité longitudinal de l'Okoumé afin d'examiner s'il existe des relations conséquentes avec les facteurs climatiques, notamment les précipitations et les températures. Quant à la durabilité naturelle, la contribution des thylles à la défense de l'Okoumé devrait faire l'objet d'un examen particulier sur le rayon de la moelle à l'aubier en évaluant leur proportion au mm². Si les résultats avec le mélange α - et β -amyrines sur la résistance face aux souches fongiques sont confirmés, il faudrait passer à l'étape de durabilité conférée sur l'Okoumé.

Une fenêtre a été ouverte sur la limite de l'aire de l'Okoumé, des inventaires forestiers sur 1 à 2 Km au départ de la limite actuelle pourraient donner une première estimation. Tous ces aspects représentent des canaux de la « *démarche Okoumé* ».

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdel-Gabir Y.A., Kraemer R.L. 1993: Estimating thage of demarcation af juvenile and mature wood in Douglas-fir. *Wood Fiber Sci.* 25: 242-249.

Aloui F., Ayadi N., Charrier F., Charrier B. 2004: Durability of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) against white rot fungi (*Coriolus versicolor*) relations with phenol extractives *Holz Roh Werkst* (2004) 62:286–290
DOI 10.1007/s00107-004-0489-7.

Alteyrac J., Cloutier A., Zhang S.Y. 2006: Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill) B.S.P) at different stand densities and sampling heights. *Wood Sci. Technol.* (40) 124-138.

Amobi C.C. - 1973 - Periodicity of wood formation in some trees of lowland rainforest in Nigéria. *Ann. Bot.* 37:211-218.

Association Technique Internationale des Bois Tropicaux 1986 : Atlas des bois tropicaux. Tome 1-Afrique.

Aubreville A. 1948 : Etude sur les forêts de l’Afrique Equatoriale Française et du Caeroun. IRAT ; Nogent-sur-Marne. France.

Bakraji E.H., Salman N., Othman I. 2002: Radiation-induced polymerization of acrylamide within Okoumé (*Aucoumea klaineana* Pierre). *Rad. Phys. Chem.* 64 () 277-281.

Bamber, R.K., 1976: Heartwood and formation. *Wood Science and Technology.* 10, 1-8.

Bamber, R.K., Fuzakawa K., 1985: Sapwood and heartwood : a rewiev. *For. Prod. Abstract.* 8(9), 265-312.

Gartner B.L., Morell J.J, Freitag M.C., and Spicer R. 1999: Heartwood decay resistance vertical and radial position in Douglas-fir trees from a yong stand. *Can. J. For. Res.* 29: 1993-1996.

Bedel, J. 1969 : Estimation de la croissance de l’Okoumé en forêt naturelle. Résultats des lectures de cernes effectués en 1969. – CTFT/Gabon, 20p.

Belalia R. 2006 : Synthèse d’un biocide par modification chimique de chitosane : préservation du bois, préservation des aliments. Thèse Université Bordeaux 1, N°3142.

Bendtsen B.A., Sneft J. 1986: Mechanical and anatomical properties in individual growth ring of plantation grown easten cotton wood and loblolly pine. *Wood Fiber Sci.* 18: 23-38.

Bergström B. 2000 : Aspect on heartwood formation in scot pine. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Genetic and Plant Physiology. Umeä.

Bouet C., Cahiers O.R.S.T.O.M., 3-4, 269-272 (1980).

Brienen Roel J. W., Zuidema Pieter A. 2005: Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forest: a test for six species using tree ring analysis. *Ecologia.* 146: 1-12.

Brunck F., Grison F., Maître H.F. 1990 : L'Okoumé (*Aucoumea klaineana* Pierre). Monographie. Centre Technique Forestier Tropical, 102p.

Buttoud G., 1991 : Les bois africains à l'épreuve des marchés mondiaux. ENGREF.

Casagrandé S. 1998 : Evaluation non destructive par une analyse vibratoire des performances mécaniques de bois reconstitués. Thèse Université Bordeaux 1.

CD-ROM Xylos 1996 : Les bois du monde, Base de données des bois indigènes et tropicaux, clés d'identification des essences. Conception CTBA, FORMABOIS et Add-On Multimédia. Paris.

Charron S., Jourez B., Marchal M., Hébert J. 2003 : Etude comparative des caractéristiques physiques et mécaniques du bois des mélèzes d'Europe (*Larix decidua*), du Japon (*Larix kaempferi*) et de leur hybride (*Larix eurolepis*). Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 7 (1) : 5-16.

Centre Technique Forestier Tropical 1975 : Inventaire forestier dans le Centre-Est du Gabon. CTFT-PNUD/FAO.

Capdevielle, J.M. 1949 : Tres estudios y un ensayo sobre temas forestales de la Guinea continental española – Instituto de Estudios africanos, Madrid, 235p.

Christy P., Jaffré R. Ntougou O. Wilks C. 2003 : La forêt et la filière bois au Gabon. Multipresse-Gabon.

CIRAD 2003 : Fiche technique sur l'Okoumé.

lark A. and Saucier J.R. 1989: Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in southern pine. Forest Prod. J. 39: 42-48.

Climent, J., Gil, L., Pardos, A., 1998: Xylem anatomical traits related to resinous heartwood formation in *Pinus canariensis*. Trees. 12,139-145.

Colling C. 2002 : Les champignons du bois. www.transdata.fr/bois/documents/champignons.

Coster Ch., 1927 : Zur Anatomie und Physiologie der Zuwachszonen- und Ann. Jard. Bot. Buitenzorg 37: 49-160.

Datta S.K, Kumar A. 1987 : Histochemical studies of transition from sapwood to heartwood in *tectona grandis*. IAWA bulletin 8 (4), 363-368.

De Groot R.C., Woodward B., Hennon P.E. 2000: Natural decay resistance of heartwood from dead standing yellow cedar trees: laboratory evaluations. Solid Wood Products. Forest Products Journal 50 N°1.

Delabarre M.A., Serier J.B. 1995: L'hévéa. Le technicien de l'agriculture tropicale. Eds Maisonneuve Larose. Paris.

Déon G.M., Chardon H.M., 1980 : Influence des extraits naturels du bois sur sa résistance à la pourriture. Bois et forêt des tropiques. 191 p : 75-90.

Déon, G.M., 1981 : Etude des variabilités radiale et longitudinale et de la durabilité naturelle dans un fût de Dabéma. Cahier scientifique n°6. CTFT. Bois et Forêts des Tropiques.

Détienne P. et Mariaux A. 1975 : Nature et périodicité des cernes dans le bois de Niangon. *Bois et Forêts des tropiques* 159:29-37.

Détienne P. et Mariaux A. 1976 : Nature et périodicité des cernes dans le bois de Samba. *Bois et Forêts des tropiques* 169:29-35.

Détienne P. et Mariaux A. 1977 : Nature et périodicité des cernes dans les bois rouges des Méliacées africaines. *Bois et Forêts des tropiques* 175:52-61.

Détienne P. 1989: Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. IAWA Bulletin n.s., Vol 10 (2):123-132.

Détienne, P., Oyono, F., Durrieu De Madron, L., Demarquez, B., Nasi, R., 1998 : L'analyse de cernes : application aux études de croissance de quelques essences en peuplements naturels de forêt dense africaine. Cirad-Forêt.

Dirol D., Deglise X., 2001 : Mécanique et Ingénierie des Matériaux. Durabilité des bois. Hermes Sciences. Paris.

Dumoceaud O. 2001 Petits naturellement durables dans des usages extérieurs en vue de limiter les traitements par les pesticides : problèmes posés par l'utilisation du Châtaignier (*Castanea sativa Mill.*) et un traitement de type friture à basse température. Thèse de l'Université de Montpellier II. 214p.

Dupont G. et Barraud M. 1930 : Chimie et Industrie, n° spécial, 430.

Dupont G., Daure P. et Levy J., 1932 : Bull. Soc. Chim. France, 51, 921-932.

Dupont G., Dulou R. et Vilkas M., 1948 : Peintures Pigments-Vernis, 24, 46-48.

Dupuy, B. 1984 : Bilan en 1983 de la croissance des plantations Okoumés de la réserve forestière de la Kienké-Sud (Kribi, Cameroun) – Station de recherches forestières d'Edéa, Cameroun.

Eaton R. Halle M.D.C. 1993 : Wood decay, paets and protection. 546 p.

Fahn A., Werker E. 1990 : The vascular cambium : 139-158. Research Studies Press, Taunton, UK.

Fougerousse M. 1960 : Durabilité naturelle du bois. Bois et Forêts des Tropiques. 73, 43-56.

Fuhr, M. Nasi, R. Delege, M.A. 1998: Dynamique et croissance de l'Okoumé en zone côtière du Gabon. Cirad-Forêt. 55p.

Fujiwara S. and Yang K.C. 2000 : The relationship between cell length and ring width and circumferential growth rate in five Canadian species. IAWA J. 21: 335-345.

Gardrat C., Rocher A., Medzegue M.J., Safou R., Grelier S., Castellan A. 2005: Analyse des composés volatils présents dans *Aucoumea klaineana* P. par espace de tête/GC/MS. 1^{er} symposium de chimie et de biologie analytique. Montpellier.

Geiser, J. 1972 : Développement forestier du Gabon, croissance de l'Okoumé en troisième zone. – CTFT/FAO, Libreville (Gabon), 22p.

Gérard J., Edi Kouassi A., Daigremont C., Détienne P., Fouquet D., Vernay M. 1998 : Synthèse sur les caractéristiques technologiques des principaux bois commerciaux africains. CIRAD-Forêt. Montpellier. France.

Gérard J. 1998 : Contraintes de croissance, variations internes de densité et module d'élasticité longitudinal et déformation de sciage chez les eucalyptus de plantation. Thèse Université Bordeaux 1.

Giustina G.D. 1985: La pathologie des charpentes en bois, causes des désordres et remèdes. Editions du Moniteur.

Grandmougin-Ferjani A., Dalpé Y., Hartmann M., Laruelle F. et Sancholle M. 1999 : Phytochemistry, 50, 1027-1031.

Grison F. 1975 : Note à propos de la dispersion des graines d'Okoumé. CTFT/Gabon.

Groulez, J. 1983 : Etude préalable aux reboisements en Okoumé en république populaire du Congo. CTFT/Office congolais des forêts, 72p.

Guang-Yi L., Bates C.D., Gray A.I. et Waterman P.G. 1988: Planta Medica, 368-369.

Guang-Yi L., Gray A.I., Patalinghug W.C., Skelton B.W., Waterman P.G. et White A.H. 1989: Aust. J. Chem., 42, 1169-75.

Ph Guinier : botaniste du début du 20^e siècle cité dans Xylos 1996.

Guillén M.D, Manzanos M.J., 2001: Some compounds detected for the first time in oak wood extract by GC/MS. Sciences des aliments, 21. 65-70.

Guilley E., Charpentier J.P. Ayadi N., Snakkers G., Nepveu G. Charrier B. 2004 : Decay resistance against *Coriolus versicolor* in sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) : analysis of the between-tree variability and correlation with extractives, tree growth and other basic wood properties. Wood Sci. Technol. 38 : 539-554.

Guitard D. 1987 : Mécanique du matériau bois et composites. Capaduees-Editions, France.

Hallé F. et Oldman R. 1970 : Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson et Cie, Paris.

Haluk J.P. 1994 : Composition chimique du bois. Le bois matériau d'ingénierie. Edition ARBOLOR. 433 p: 53-88.

Haupt M., Leithoff H., Meier J., Puls H.G., Richter O.F. 2003: Heartwood extractives and natural durability of plantation-grown teakwood (*Tectona grandis* L.) – a case study. Holz als Roh-und Werkst 61: 473-474. Springer-Verlag.

Heitz H. 1943 : La forêt du Gabon. Larose.

- Hillis W.E. 1962:** Wood extractives and their significance to the pulp and paper industries. Academic Press, New York, 513 p.
- Honjo K., Furukawa I. Sahri M.H. 2005 :** Radial variation of fiber length increment in *Acacia mangium*. IAWAI J 26: 339-352.
- Keller R. 1994.** La constitution du bois. Le bois matériau d'ingénierie. Edition ARBOLOR. 433 p: 13-51.
- Kokutse A.D. 2002 :** Analyse de la qualité du bois de teck (*Tectona grandis L.F*) en plantation au Togo: formation du bois de coeur, propriétés mécaniques et durabilité. Thèse de Bordeaux I.142 p.
- Kokutse A.D., Baillères H., Stokes A., Kokou K., 2004:** Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis L.f*). For. Ecol. Manag. 189; 37-48.
- Kokutse A.D., Stokes A., Baillères H., Kokou K., Baudasse 2006:** Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis L.f*) heartwood and relationship with colour. Spinger-Verlag. Trees 20: 219-223.
- Kolb B., Ettre L.S. 1997:** Static headspace-gas chromatography. ISBN 0-47-19238-4 Willey-VCH, Inc (USA).
- Koubaa A., Isabel N., Zhang S.Y., Beaulieu J., Berbier-Cardou M., Bousquet J. 2004 :** Transition from juvenile to mature wood in *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Wood Fiber Sci.
- Koumba Zao, P., Mapaga D., Verkaar H.J., 1998:** Effect of shade on young *Aucoumea klaineana* Pierre trees of various provenance under field conditions. For. Ecol. Manage. (106) 107-114.
- Koumba Zaou P., 1999 :** Etat du reboisement au Gabon. Rapport FAO.
- Lal N.K., Batnaru R., Simionescu C. 1977:** cite dans Wood Chemistry Ultrastructure Reactivity. (1989), Berlin, 58.
- Laks P.E. 1991:** Wood preservation as tree do it. Scottish Forestry, Vol 45 (4): 275-284.
- Leonard G., Richard A. 1993 :** Le Gabon. EDICEF/EDIG.
- Leroy-Deval J. 1973 :** Note sur la limite de l'aire de l'Okoumé dans le Nord-Est du Gabon. Bois et Forêts des Tropiques. 151 : 57-62.
- Leroy-Deval J. 1974 :** Structure dynamique de la rhizosphère de l'Okoumé dans ses rapports avec la sylviculture. CTFT, Nogent-sur-Marne (France). 113p.
- Leroy-Deval J., 1976 :** Biologie et sylviculture de l'Okoumé. La sylviculture de l'Okoumé. Tome 1. CTFT/Nogent-Sur-Marne. 355p.
- Letouzey, R. 1978 :** Flore du Cameroun – Documents phytogéographiques n°1. – CNRS, Paris, env. 200p.
- Loubinoux B. kilbertus G. 1994 :** La Préservation du bois. Techniques et produits de préservation. Le bois matériau d'ingénierie. Edition ARBOLOR. 433 p : 365-377.

Loupe D., Hamel O., Jaffre R. et Roda J.M., 2000 : Etude coûts et bénéfices des plantations d'Okoumé au Gabon. CIRAD-Forêt/Projet Forêts et Environnement-Gabon.

Lowe R.G. 1968: Periodicity of a tropical rain forest tree, *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. Commonw. For. Rev. 47 (n°132):150-163.

Magel E ; JAY6Allemand C., Ziegler H. 1994: Formation of heartwood substances in the stemwood of *Robinia pseudoacacia* L. II. Distribution of non-structural carbohydrates and wood extractives across the trunk. Tree. 14, 85-87.

Maître H.F Maître, P. Mauranges et Y. Roederer, 1982 : Projet de relance d'une brigade de reboisement. Première partie : Bilan de croissance des plantations d'Okoumé, techniques sylvicoles préconisées. – CTFT Nogent-sur-Marne (France), 51p.

Maley J. 1990 : Histoire récente de la forêt dense africaine : essai sur la dynamique de quelques formations végétales. Eds Paysages Quaternaires de l'Afrique centrale Atlantique : 367-383. Paris, Mémoires ORSTOM.

Maley J. 2001 : La destruction catastrophique des forêts d'Afrique centrale survenue il ya environ 2500 ans exerce encore une influence majeure sur la répartition actuelle des formations végétales. Syst. Geogr. Pl. 71 : 777-796.

Mariaux A. - 1967 - Les cernes dans les bois tropicaux africains. Nature et périodicité. Bois et Forêts des Tropiques 113: 3-14 & 114: 23-37.

Mariaux A. - 1969 - La périodicité des cernes dans le bois de Limba. Bois et Forêts des tropiques 128:39-54.

Mariaux A. - 1970 - La périodicité de formation des cernes dans le bois de l'Okoumé. Bois et Forêt des Tropiques 131:37-50.

Mariaux, A 1973 : Quelques données sur la croissance en diamètre de l'Okoumé dans la région de Sibiti-Zanaga (Congo), CTFT, Nogent-sur-Marne, 10p.

Mathe C., Gulioli G., Archier P., Vieillescazes C. 2004: Characterization of archaeological frankcense by gas chromatography-mass spectrometry. J. Chrom. A. 1023: 277-285.

MatWeb. The online materials database. Tropical Okoume Wood, consulté le 28/01/2004.

Medzegue M.J. 2003 : Développement d'une méthode spectroscopique non destructive pour l'évaluation de la durabilité naturelle du bois et de la détermination de sa composition chimique. DEA Université Bordeaux 1.

Medzegue M.J., Grelier S., Stokes A. M'Batchi B. 2004 : Wood anatomy and dendrochronology of plant grow Okoumé (*Aucoumea klaineana* P.). International symposium on wood sciences. IAWA-IAWS. October 24th/29th. Montpellier, France.

Medzegue M.J., Grelier S., M'Batchi B., Nziengui M., Stokes A.: Radial growth and characterisation of juvenile and adult wood in plantation grown Okoumé (*Aucoumea klaineana* P.) from Gabon. An. For. Sc. Sous presse.

Minkué S. 2000: Etude chimique des substances extractibles d'Okoumé. Faculté de foresterie et de géométrie Université Laval (Mémoire). 73p sans annexes.

CTFT 1989 : Memento du forestier. 3^e édition. Ministère de la Coopération et du Développement. Paris. France.

Morales M.S., Villalba R., Grau H.R., Paolini L. 2004: Rainfall-controlled in high-elevation subtropical treelines. *Ecology* 85: 3080-3089.

Muloko-Ntoutoume N., Petit R.J., White L. and Abernethy K. 2000: Chloroplast DNA variation in a rainforest tree (*Aucoumea klaineana*, Burseraceae) in Gabon. *Molecular Ecology*. 9: 350-363.

Nasi R. 1997 : Les peuplements d'Okoumé. *Bois et Forêts des Tropiques* 251, 4-26.

Nepveu 1994 : Variabilité. *Le Bois, Matériau d'ingénierie*. Edition ARBOLOR. 433p.

Ngavoura P. 1998 : Variations inter et intra-arbre des propriétés du bois d'Okoumé (*Aucoumea klaineana* Pierre). DEA sciences du bois. Nancy. 42 p.

Ngavoura P. 1998. Variations inter et intra-arbre des propriétés du bois d'Okoumé (*Aucoumea klaineana* Pierre). DEA sciences du bois. Nancy. 42 p.

Normand D. et Paquis J. 1972 : Manuel d'identification des bois commerciaux. Tome II. Centre Technique forestier Tropical (CTFT). Nogent-sur-Marne, 335p : 144-149.

Oosterbaan R.J., 2005: SegReg. Segmented Linear Regression. <http://www.waterlog.info>.

Polge, H., 1964 : Le bois juvénile des conifères. *Revue Forestière Française*, 6, 473-505.

Puig, H., 2001 : forêt tropicale humide. Edition Belin.

Reynaud-Farrera I., Maley L., Wirmann D. 1996: Végétation et climat dans les forêt du Sud-Ouest Cameroun depuis 4770 ans BP ; analyse pollinique des sédiments du Lac Ossa. *C.R Acad. Sci.* 322 : 749-755.

Richter H.T. and et Dallwitz M.J. 2000 : Commercial timbers : descriptions, illustrations, identification and information retrieval. <http://delta-intkey.com/wood/fr>.

Rivière L. 1992 : Etude de l'évolution des peuplements naturels d'Okoumé (*Aucoumea klaineana* Pierre) sans le sud-estuaire du Gabon. Construction de tables de production provisoire. Thèse de Diplôme d'Etudes Doctorales. Université de Paris VI, 163p.

Rogers S. 1981: Seasonal variation in radial growth and phloem activity of *Terminalia ivorensis* A.Chev. *Ann. Bot.* 47 : 603-610.

Rowell R.M. 1984: The chemistry of solid wood. The American Society, Washington, 614 pages.

Saint Aubin 1963 : La forêt du Gabon – CTFT. Nogent-sur-Marne (France), 208p.

Sarlin, P. 1969 : Etude de deux Okoumé sur sol sableux et sur sol argileux à M'bel (Gabon). CTFT, Nogent-sur-Marne (France), 16p.

- Sauter U.H., Mutz R., Munro B.D. 1999:** Determining juvenile-mature wood transition in Scots pine using latewood density. *Wood Fiber Sci.* 31 (4): 416-425.
- Savard et al. 1960:** (dans) *Woode chemistry Ultrastructure Ractivity* (1989). Berlin 58.
- Scheffer, C.T., Cowling, B.E., 1966:** Natural resistance of wood to microbial deterioration. *Annual Review of Phytopathology.* 4, 147-170.
- Shigo A.L. 1984:** Compartmentalization : a conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves, *Annual Review of Phytopathology,* 22: 182-214.
- Syafii, W., Yashimoto, T., Samejima, Masahiro, 1988 :** The effect of lignin structure on decay resistant of some tropical woods. *Bulletin Tokyo University Forestry.* 80, 69-77.
- Shiokura T. 1982 :** Extent and differentiation of the juvenile wood zone in coniferous tree trunks. *Mokuzai Gakkaishi* 28: 85-90.
- Schultz T.P., Harms W.B., Fischer H.T., McMurtrey K.D., Minn J., Nicholas D.D. 1995:** Durability of Angiosperm heartwood: the importance of extractives. *Holzforschung* 49: 29-34.
- Schultz T.P., Nicholas D.D. 2002:** Naturally durable heartwood: evidence for a proposed dual defensive function of the extractives. *Phytochemistry* 54: 47-52.
- Tessier A.M., Delaveau P. et Piffault N., 1982:** *Planta Medica,* 44, 215-217.
- Thibaut B. 1997 :** Tree biomechanics and related problems in wood technology. *Plant Biomechanics.* Reading (UK). Center for Biomimetics.
- Trouet V., Coppin P., Beeckman H. 2006:** Annual growth ring patterns in *Brachystegiaspiciformis* reveal of precipitation on tree growth. *Biotropica* 38: 375-382.
- Vernay M., Fouquet D. 1997 :** Guide d'utilisation des bois de Guyane dans la construction. ISBN : 2-87614-268-6. CIRAD-Forêt.
- Vitiello, D., 1983 :** Etude analytique des produits de pyrolyse et d'extraction de bois tropicaux. Thèse de l'Université de Bordeaux 1.
- Wannan B. S. and Quinn C. J. 1990 :** Pericarp structure and genetic affinities in the anacardiaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society.* 102: 225-252.
- Watson L. and Dallwitz M. J. 2000:** The families flowering plants. Burseraceae Kunth.: descriptions, illustrations, identification and information retrieval. <http://biodiversity.uno.edu/delta/delta>.
- Wilks, C., Issembé, Y., 2000:** Guide pratique d'identification – Les arbres de la Guinée Equatoriale. CUREF.
- Willetner H., Peek R.D. 1997:** The natural durability story. IRG/WP 97-20119.
- Wise, L.E., 1944:** *Wood chistry,* Reinhold publishing corporation, The International Group on Wood Preservation. Doc IRG/WP 97-20119.

White L.J.T., Oslisly R., Abernethy K. and Maley J. 2000: L'okoumé (*Aucoumea klaineana*): expansion et decline d'un arbre pionnier en Afrique Centrale Atlantique au cours de l'holocène. UNESCO, Paris, France.

Zobel, J.B., Van Buijtenen, J.P., 1989: Wood variation. Its causes and control. Springer. Series in Wood Science, 355pp.

Zobel B.J., Sprague J.R. 1998: Juvenile wood in forest trees. Berlin, Allemagne. Springer-Verlag, 300p.

Ministère des eaux et forêt 1998 : Horizon 2025 : Plan directeur en matière d'industrialisation. DGEF. Libreville.

Ministère des Eaux et Forêts 2005 : Rapport sur la production forestière et industrie au Gabon. DGEF. Libreville.

ANNEXES

ANNEXE 1
DONNEES DENDROMETRIQUES

N° arbre	Diamètre (cm)	Hauteur prélèvement (m)	Longueur souche-culée (m)
B1	73	6,3	1,3
B2	71	8	1,8
B3	71,5	6	1,9
B4	80	9	1,75
B5	80	6	1,8
B6	86	9	1,85
B7	63	9	4,4
B8	70	8	1,85
B9	66	5	3,25
B10	78,5	5	2,1
B11	70	7	1,6
B12	67	6	1,4
B13	71	6,5	1,45
V1	65	7	1,7
V2	77,5	6,3	1,4
V3	77	8,5	1,4
V4	67	7,5	1,55
V5	68	7	0,7
V6	57	6	1,25
V7	58	6	1
V8	72	6	1,2
V9	64	6	1,25
V10	61	4	1,2
V11	63	6	1
V12	68	8	1,1
V13	63	6	1,4
V14	71	7	1,7
V15	70	6	1,6
C1	74	8	1,75
C2	78	7	1,5
C3	71	4	2,5
C4	70	6	1,7
C5	75	7	3
C6	72	7,5	1,6
C7	73,5	5	2
C8	76	4,5	2,75
C9	77,5	8	2,5
C10	70 ;5	8	1,85

N° arbre	Diamètre (cm)	Hauteur prélèvement (m)	Longueur souche-culée (m)
N1	70,5	4	2
N2	72	5	1,85
N3	76	8	1,5
N4	75	9	3
N5	74	7,5	2,4
N6	75	7	1,7
N7	83	6,5	2
N8	74	6,5	2
N9	80	9	3,3
N10	77,5	6	2,75
M1	95	5	1,8
M2	71	8	2,9
M3	73,5	7	3,1
M4	70	9	3,3
M5	76	6,4	2,4
M6	74	6	3

Tableau A1. : Quelques caractéristiques dendrométriques des arbres échantillons

ANNEXE 2
PARAMETRES PHYSICO-MECANIQUES

Arbre	Masse volumique (en kg/m ³)			Module d'élasticité longitudinal (MPa)		
	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation
B1	461	15	3,1%	8634	791	9,2%
B2	413	17	4%	7640	608	8%
B3	431	21	4,8%	8938	1899	21,2%
B4	490	38	7,8%	8267	448	5,4%
B5	442	10	2,3%	9284	618	6,7%
B6	535	22	4,1%	9843	826	8,4%
B7	419	43	10,3%	7151	866	12,1%
B8	425	35	8,3%	8127	814	10%
B9	494	17	3,5%	9758	549	5,6%
B10	475	24	5,1%	9308	696	7,5%
B11	440	15	3,4%	8039	329	4,1%
B12	427	24	5,7%	8231	462	5,6%
B13	450	20	4,3%	8764	735	8,4%
V1	480	32	6,7%	9040	1350	14,9%
V2	512	22	4,3%	8463	675	8%
V3	421	29	6,8%	7497	898	12,9%
V4	431	24	5,6%	9430	1122	11,9%
V5	463	28	6,1%	9224	1039	11,3%
V6	381	47	12,2%	7395	1194	16,1%
V7	465	22	4,8%	8971	792	8,8%
V8	443	32	7,2%	7981	467	5,8%
V9	483	16	3,3%	8859	618	6,9%
V10	411	22	5,3%	7648	670	8,8%
V11	466	56	12,1%	8894	694	7,8%
V12	442	22	5,1%	8426	713	8,5%
V13	397	46	11,6%	7443	849	11,4%
V14	444	27	6,2%	7055	971	13,8%
V15	442	41	9,2%	8336	678	8,1%
C1	433	19	4,4%	8025	152	1,9%
C2	440	12	2,6%	8410	582	6,9%
C3	403	28	7,1%	8412	556	6,6%
C4	452	45	9,9%	8763	1172	13,4%
C5	456	7	1,6%	8869	405	4,6%
C6	490	98	19,9%	9027	513	5,7%
C7	486	38	7,8%	9708	1143	11,8%
C8	413	7	1,7%	7907	408	5,2%
C9	482	35	7,2%	9142	1068	11,7%
C10	392	24	6,1%	8056	333	4,1%

Arbre	Masse volumique (en kg/m ³)			Module d'élasticité longitudinal (MPa)		
	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation
N1	424	13	2,9%	8914	473	5,3%
N2	457	45	9,9%	9640	1172	12,2%
N3	497	16	3,1%	9812	862	8,8%
N4	442	19	4,3%	8972	955	10,6%
N5	406	14	3,4%	8256	396	4,8%
N6	486	25	5,1%	11405	1740	15,3%
N7	414	22	5,3%	8717	735	8,4%
N8	455	48	10,5%	9381	1644	17,5%
N9	410	24	5,8%	7850	478	6,1%
N10	402	26	6,6%	9016	456	5,1%
M1	488	45	9,2%	9574	1047	10,9%
M2	458	33	7,3%	9056	985	10,9%
M3	442	27	6,1%	7891	243	3,1%
M4	511	47	9,1%	10345	841	8,1%
M5	440	32	7,2%	8828	467	5,3%
M6	510	23	4,6%	12010	1517	12,6%

Tableau A2. : Moyennes, écart types et coefficients de variation par arbre de la masse volumique et du module d'élasticité longitudinal des 54 arbres.

	Cocobeach			NDJOLE			MITZIC		
	Moyenne	Ecart type	Coef. Variation	Moyenne	Ecart type	Coef. Variation	Moyenne	Ecart type	Coef. Variation
Retrait radial	3,6%	0,1%	3,1%	3,7%	0,1%	3,4%	3,6%	0,1%	3,0%
Retrait tangentiel	6,0%	0,1%	1,9%	6,1%	0,1%	1,7%	5,9%	0,1%	3,0%
Retrait volumique	9,8%	0,3%	2,7%	9,7%	0,3%	2,9%	9,5%	0,1%	2,0%
PSFr	30,3%	0,9%	2,8%	30,2%	1,5%	4,9%	29,1%	1,2%	4,0%
PSFt	31,4%	1,1%	3,4%	31,1%	2,3%	7,3%	30,6%	0,4%	1,4%

Tableau A3. : Moyennes, écart types et coefficients de variation des retraits totaux radial, tangentiel et volumique, PSFr et PSFt en fonction des sites en forêt naturelle.

	Bokoué			M'Voum		
	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation
Retrait radial	3,5%	0,1%	3,2%	3,5%	0,1%	4,2%
Retrait tangentiel	6,0%	0,1%	1,1%	6,0%	0,2%	4,0%
Retrait volumique	9,7%	0,3%	2,7%	9,7%	0,4%	4,0%
PSFr	30,6%	0,9%	3,0%	30,6%	1,9%	6,1%
PSFt	31,5%	1,1%	3,6%	31,0%	1,0%	3,1%

Tableau A4. : Moyennes, écart types et coefficients de variation des retraits totaux radial, tangentiel et volumique, PSFr et PSFt en fonction des sites en plantation.

	R. radial	R. tangentiel	R. volumique	PSFrad	PSFtang
C1	3,6%	6,1%	9,7%	31,8%	33,2%
C2	3,6%	5,9%	9,5%	29,9%	30,9%
C3	3,7%	6,1%	9,6%	30,7%	31,7%
C4	3,6%	6,1%	9,9%	31,1%	31,4%
C5	3,7%	6,1%	10,0%	28,8%	30,9%
C6	3,5%	6,0%	9,7%	30,3%	30,8%
C7	3,8%	6,2%	10,0%	29,4%	30,4%
C8	3,6%	6,2%	10,2%	29,9%	33,1%
C9	3,7%	6,0%	9,7%	30,4%	32,0%
C10	3,4%	5,8%	9,3%	30,3%	30,0%
N1	3,9%	6,2%	10,1%	30,8%	31,0%
N2	3,8%	6,2%	9,8%	31,4%	33,6%
N3	3,6%	6,0%	9,6%	31,4%	30,8%
N4	3,8%	6,1%	9,9%	30,1%	32,6%
N5	3,6%	6,0%	9,6%	28,9%	31,6%
N6	3,8%	6,1%	9,6%	27,4%	28,7%
N7	3,8%	6,1%	9,7%	30,4%	30,3%
N8	3,7%	6,0%	10,0%	28,3%	26,2%
N9	3,5%	5,9%	9,1%	31,5%	33,3%
N10	3,8%	6,1%	9,6%	31,6%	32,6%
M1	3,4%	6,0%	9,4%	29,0%	30,8%
M2	3,4%	5,9%	9,5%	30,4%	29,2%
M3	3,7%	6,0%	9,6%	28,2%	29,5%
M4	3,6%	6,0%	9,6%	28,9%	30,8%
M5	3,5%	6,0%	9,6%	28,2%	30,0%
M6	3,5%	6,0%	9,3%	29,6%	31,1%
B1	3,5%	6,1%	9,8%	30,6%	32,2%
B2	3,4%	5,9%	9,4%	31,1%	31,8%
B3	3,4%	6,0%	9,6%	30,7%	31,4%
B4	3,6%	6,0%	9,9%	30,4%	30,5%
B5	3,6%	6,1%	10,1%	30,0%	30,8%
B6	3,5%	6,1%	9,5%	29,6%	29,9%
B7	3,4%	6,0%	9,4%	31,1%	32,1%
B9	3,7%	6,0%	9,8%	30,7%	31,2%
B10	3,6%	6,0%	9,8%	31,6%	33,0%
B11	3,6%	6,1%	9,8%	31,7%	33,4%
B12	3,4%	6,0%	9,6%	30,9%	32,2%
B13	3,7%	6,2%	10,2%	28,4%	29,8%

	R. radial	R. tangentiel	R. volumique	PSFrad	PSFtang
V4	3,6%	6,1%	9,9%	28,1%	31,6%
V5	3,5%	6,0%	9,7%	29,2%	30,8%
V6	3,6%	5,9%	9,6%	30,0%	30,3%
V7	3,5%	5,9%	9,3%	30,8%	32,5%
V8	3,7%	5,9%	9,9%	31,1%	31,6%
V9	3,8%	6,4%	10,5%	28,1%	29,1%
V10	3,5%	6,1%	9,8%	31,7%	30,2%
V12	3,5%	5,9%	9,7%	30,4%	30,3%
V13	3,5%	5,7%	9,4%	31,8%	31,0%
V14	3,2%	5,5%	9,1%	34,7%	32,0%
V15	3,6%	6,2%	10,1%	30,4%	31,2%

Tableau A5 : Moyennes des retraits totaux radial, tangentiel et volumique, PSFr et PSFt par arbre.

ANNEXE 3
DURABILITE NATURELLE

Evaluation de la durabilité naturelle selon la norme EN 350-1

Le débit des éprouvettes réalisé, les étapes constitutives de l'essai sont chronologiquement les suivantes :

- peser les éprouvettes stabilisées pour avoir la masse initiale avant l'essai (**P_i**);
- mettre en sachet hermétique les éprouvettes et les faire stériliser par irradiation ionisante (Rayons gamma) de façon à éliminer tout germe éventuel avant essai ;
- préparer le milieu de culture : mettre dans un ballon 40 g d'agar-agar + 80g de malt en poudre et deux litres d'eau distillée, agiter le mélange avec une baguette. Le milieu de culture ne doit causer aucune inhibition à la croissance des champignons. Placer le ballon dans un autoclave à 121°C pendant 20 minutes, temps nécessaire pour une dissolution complète du mélange. Mettre 60 mL de milieu ainsi préparé dans chaque flacon d'essai à l'aide d'une pompe péristaltique. Fermer le flacon avec un bouchon muni d'un tampon en coton permettant les échanges gazeux. Stériliser les flacons pendant 20 minutes à 121°C dans l'autoclave, puis les laisser refroidir couchés à plat dans leur position de culture;
- inoculer les milieux de culture par des fragments de culture de champignon une semaine (au maximum) après cette préparation. Cette opération doit se faire en milieu stérile pour éviter toute contamination. Il faut travailler sous une hotte à flux laminaire horizontal, les manipulations s'effectuant à l'aide d'une tige à anse de platine sans cesse passée sous la flamme d'un bec Bunsen. Après l'inoculation, déposer quelques gouttes d'un anti-acarien (Rhodiatox dilué à 5%) sur le coton du bouchon des flacons et les fermer ;
- entreposer les flacons dans une pièce conditionnée ($22 \pm 2^\circ\text{C}$ et $65 \pm 5\%$ d'humidité relative) pendant environ 15 jours. Ce délai est nécessaire pour que le mycélium inoculé pousse et recouvre entièrement la surface du milieu de culture ;
- exposer les éprouvettes de bois aux champignons cultivés dans un délai ne dépassant pas 4 semaines après l'inoculation du milieu. Cette étape se fait toujours sous la hotte donc en milieu stérile. Placer deux éprouvettes par flacons d'essai en les déposant avec une pince saine sur des supports métalliques préalablement stérilisés à l'autoclave ;
- replacer les flacons dans la pièce conditionnée avec des paramètres de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ et $70 \pm 5\%$. Le temps d'exposition des éprouvettes aux champignons est de 16 semaines conformément à la norme.
- au terme des 16 semaines, d'exposition retirer les éprouvettes des flacons et les débarrasser soigneusement du mycélium adhérent à l'aide d'une brosse à dents,

- peser les éprouvettes pour avoir la masse humide après l'essai (P_h).
 - sécher les éprouvettes dans une étuve ($103 \pm 2^\circ$) pendant 48 heures jusqu'à masse constante.
 - peser les éprouvettes anhydres pour avoir la masse anhydre finale (P_f) de l'essai,
 - calculer l'humidité (H_f) de chaque éprouvette à la fin de l'essai en exprimant sa teneur en eau ($P_h - P_f$) en pourcentage de sa masse sèche [$H_f = (P_h - P_f)/P_f$] et rejeter les éprouvettes ayant (H_f) <25% ou >85%
 - calculer la perte de masse (P_M) exprimée en pourcentage de masse anhydre initiale [$P_M = (P_s - P_f)/P_s$], avec $P_s = K \times P_i$, la masse anhydre supposée de l'échantillon avant l'attaque du champignon.
- P_s est la masse anhydre réelle de l'éprouvette multipliée par le coefficient de correction K
 - P_i est la masse de l'éprouvette réellement mesurée avant le début de l'essai. Elle correspond à une humidité à 12% ; c'est-à-dire au moment où l'éprouvette a été stabilisée jusqu'à masse constante.

	Duramen interne		Duramen intermédiaire		Duramen externe	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
<i>G. Trabeum</i>						
Bokoué	11,7%	1,6%	15,5%	1,5%	21,6%	0,8%
M'Voum	14,9%	0,7%	14,1%	0,4%	9,7%	0,8%
Cocobeach	18,9%	6,1%	12,9%	0,6%	10,5%	1,0%
Ndjolé	12,0%	1,9%	13,7%	1,2%	9,8%	0,7%
Mitzic	17,3%	0,8%	19,8%	1,4%	10,5%	0,8%
<i>C. versicolor</i>						
Bokoué	10,6%	3,5%	14,3%	1,7%	16,9%	1,0%
M'Voum	13,3%	2,3%	14,6%	2,5%	15,1%	0,9%
Cocobeach	21,0%	3,4%	16,8%	0,7%	15,3%	0,9%
Ndjolé	15,9%	1,7%	29,2%	4,9%	19,0%	2,1%
Mitzic	16,4%	3,6%	20,1%	3,0%	19,5%	2,9%
<i>Antrodia sp</i>						
Bokoué	14,3%	3,4%	19,7%	2,4%	14,9%	1,2%
M'Voum	17,7%	3,7%	16,0%	4,1%	14,0%	3,9%
Cocobeach	22,6%	3,4%	15,1%	5,5%	17,9%	1,8%
Ndjolé	20,9%	3,0%	25,1%	5,9%	26,2%	4,9%
Mitzic	29,3%	8,4%	22,0%	2,7%	17,0%	3,7%
<i>P. sanguineus</i>						
Bokoué	14,2%	2,9%	8,5%	3,4%	14,9%	2,4%
M'Voum	15,1%	0,1%	14,3%	1,4%	11,1%	1,6%
Cocobeach	16,2%	2,0%	16,0%	3,0%	13,9%	1,8%
Ndjolé	6,5%	1,9%	15,8%	4,5%	6,8%	2,2%
Mitzic	10,8%	5,3%	16,1%	0,5%	21,5%	3,1%

Tableau A6 : Moyennes et écart types des pertes de masse absolues causées par chaque champignon dans chaque duramen.

Arbre	<i>G. trabeum</i>		<i>C. versicolore</i>		<i>Antrodia sp</i>		<i>P. sanguineus</i>	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
B1	14,0%	2,0%	26,3%	5,7%	18,5%	8,3%	10,4%	0,6%
B2	60,6%	2,1%	19,9%	2,7%	18,5%	5,0%	10,8%	3,1%
B3	8,2%	0,4%	8,8%	1,1%	3,4%	1,5%	8,2%	0,4%
B4	7,8%	0,6%	13,6%	1,3%	6,6%	0,1%	11,2%	2,6%
B5	15,8%	3,1%	18,7%	4,3%	18,2%	8,1%	21,7%	1,2%
B6	8,1%	3,6%	14,0%	0,1%	10,4%	4,6%	6,8%	4,0%
B7	12,1%	0,0%	9,5%	1,7%	8,7%	1,3%	6,7%	2,0%
B8	15,3%	2,7%	11,5%	1,0%	17,8%	5,7%	16,8%	1,6%
B9	13,4%	2,1%	16,1%	1,8%	15,7%	0,9%	12,2%	0,2%
B10	12,9%	0,7%	21,9%	0,6%	18,3%	3,0%	14,2%	2,7%
B11	12,4%	3,6%	16,4%	1,5%	18,2%	1,1%	3,9%	2,0%
B12	28,1%	0,3%	18,3%	1,4%	14,1%	0,3%	6,7%	1,3%
B13	15,2%	0,1%	18,0%	2,7%	17,3%	2,6%	2,5%	0,9%
V1	10,8%	2,8%	21,0%	3,1%	15,0%	6,8%	8,7%	6,3%
V2	23,3%	3,1%	18,2%	2,2%	26,4%	2,3%	21,3%	5,0%
V3	6,2%	1,1%	12,5%	6,0%	12,5%	2,7%	5,7%	4,6%
V4	10,2%	0,6%	16,1%	2,1%	14,3%	1,1%	15,9%	2,2%
V5	8,7%	4,1%	8,6%	1,8%	19,2%	6,4%	8,7%	0,0%
V6	12,2%	6,1%	13,3%	4,6%	15,4%	4,0%	11,2%	0,8%
V7	9,9%	0,5%	9,0%	0,8%	10,5%	1,3%	12,2%	1,3%
V8	8,8%	0,2%	15,5%	0,9%	13,3%	1,5%	9,8%	1,1%
V9	9,0%	0,5%	14,3%	2,2%	11,0%	3,0%	4,2%	0,7%
V10	7,2%	0,0%	6,2%	0,1%	16,1%	0,3%	6,7%	0,0%
V11	10,4%	2,0%	14,5%	3,8%	15,4%	5,2%	13,1%	3,5%
V12	13,5%	5,9%	14,8%	2,3%	20,7%	3,2%	7,3%	0,2%
V13	5,4%	3,9%	18,9%	1,1%	20,9%	5,7%	11,4%	1,3%
V14	10,7%	0,3%	20,4%	0,5%	15,8%	1,4%	10,3%	0,2%
V15	12,3%	4,2%	9,9%	0,2%	11,8%	2,9%	11,9%	2,6%
C1	10,7%	0,9%	15,6%	3,3%	27,7%	10,5%	15,5%	1,8%
C2	7,9%	0,3%	12,9%	4,4%	13,3%	4,1%	14,7%	1,6%
C3	12,3%	2,9%	12,6%	2,7%	28,3%	14,9%	21,1%	3,3%
C4	8,5%	0,6%	22,1%	1,5%	17,1%	2,9%	13,6%	0,8%
C5	9,2%	4,2%	9,6%	0,2%	25,1%	7,5%	16,2%	3,2%
C6	20,7%	7,4%	18,3%	4,9%	19,8%	3,2%	17,0%	1,6%
C7	15,1%	0,8%	16,1%	0,3%	15,6%	0,2%	15,9%	3,7%
C8	9,7%	1,1%	12,9%	0,5%	17,3%	3,6%	16,8%	2,3%
C9	13,2%	3,0%	17,4%	2,5%	13,6%	5,7%	22,0%	1,2%
C10	12,7%	0,5%	14,8%	0,1%	21,4%	0,1%	3,9%	0,3%

Arbre	<i>G. trabeum</i>		<i>C. versicolore</i>		<i>Antrodia sp</i>		<i>P. sanguineus</i>	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
N1	9,8%	3,2%	15,7%	1,3%	37,2%	6,5%	-0,2%	1,2%
N2	12,8%	0,9%	33,4%	0,4%	31,4%	4,0%	-0,7%	1,6%
N3	8,5%	0,4%	10,8%	1,4%	8,8%	1,7%	3,8%	0,8%
N4	10,8%	0,3%	19,9%	4,6%	16,6%	7,6%	15,2%	0,6%
N5	8,2%	3,3%	27,3%	9,2%	39,7%	5,0%	1,8%	0,0%
N6	11,6%	3,5%	18,8%	3,7%	13,9%	2,1%	11,7%	5,2%
N7	10,1%	0,1%	10,3%	0,0%	17,6%	10,5%	17,5%	2,1%
N8	11,7%	0,6%	17,9%	2,8%	15,6%	3,3%	19,4%	14,5%
N9	14,2%	0,0%	28,2%	15,4%	20,4%	5,1%	13,9%	1,6%
N10	12,4%	0,2%	7,7%	0,2%	27,5%	8,9%	11,0%	2,4%
M1	12,8%	2,6%	24,0%	2,2%	15,8%	0,5%	16,1%	1,4%
M2	10,6%	0,5%	37,7%	7,3%	14,2%	1,8%	16,0%	2,7%
M3	8,1%	3,0%	15,9%	1,6%	27,5%	7,7%	28,8%	8,0%
M4	12,8%	3,5%	16,0%	0,5%	9,4%	0,6%	19,7%	2,5%
M5	14,0%	0,1%	14,4%	0,1%	15,0%	3,9%	14,6%	2,1%
M6	9,1%	1,6%	9,2%	1,6%	21,0%	9,6%	7,2%	0,2%

Tableau A7 : Moyennes et écart types des pertes de masse absolues par arbre causées chaque champignon.

ANNEXE 4
ANALYSE CHIMIQUE

Caractérisation de l'appareillage SHIMADZU 14B.

- Colonne capillaire : L = 30m ; diamètre interne = 0,25 mm ; phase stationnaire = DB WAX, épaisseur = 0,25 µm,
- Conditions chromatographiques : injecteur = 210°C, détecteur = 230°C, gaz vecteur = azote ; mode split ;
- Conditions opératoires : four à 50°C pendant 5 minutes puis montée à 180°C à raison de 6°C/min suivie d'un maintien à 180°C pendant 1 minute.

Nom du produit	Colonne peu polaire (5% phénylméthylsiloxane)		Colonne très polaire (DB WAX)	
	tr (min)	Indice de Kováts	tr (min)	Indice de Kováts
α-pinène	4,86	939	4,50	1032
β-pinène	6,61	981	6,58	1116
α-phellandrène	8,01	1007	8,24	1166
Δ-3-carène	8,25	1009	7,76	1148
p-cymène	9,01	1027	11,37	1261
limonène	9,18	1030	9,23	1178
eucalyptol	9,26	1033	9,62	1186
α-terpinéol	17,18	1137	22,10	1589

Tableau A9. : Identification des différents composés volatils sur deux phases stationnaires

	Analyse1	Analyse2	Analyse3	Analyse4	Moyenne	Ecart type
α-pinène	4,86 min	4,85 min	4,86 min	4,85 min	4,855 min	0,005 min
	9,3%	5,5%	6,1%	6,4%	6,8%	1,7%
β-pinène	6,60 min	6,59 min	6,59 min	6,58 min	6,59 min	0,007 min
	1,3%	1%	1%	1,1%	1,1%	0,1%
α-phellandrène	8,04 min	8,07 min	8,1 min	8,12 min	8,08 min	0,03 min
	45,4%	30,7%	38,2%	36,5%	37,7%	6%
Δ-3-carène	8,26 min	8,33 min	8,32 min	8,32 min	8,31 min	0,028 min
	10,4%	30,6%	19,8%	14,%	18,7%	8,8%
p-cymène	9,01 min	9,04 min	9,05 min	9,07 min	9,04 min	0,022 min
	13,4%	12,8%	14,7%	13,8%	13,7%	0,8%
limonène*	9,14 min	9,2 min	9,2 min	9,21 min	9,19 min	0,028 min
	10,7%	12,3%	12,9%	20,6%	11,6%	4,4%
α-terpinéol	17,15 min	17,14 min	17,14 min	17,14 min	17,14 min	0,004 min
	1,7%	1,5%	1,3%	1,5%	1,5%	0,2%
produits non identifiés	7,8%	5,6%	6,%	6,1%	6,4%	1%

Tableau A10 : Résultats de l'analyse de répétabilité réalisée avec l'oléorésine de Ntoum

ANNEXE 5
APPORT DE LA LIMITE ENTRE BOIS JUVENILE ET BOIS ADULTE

Masse volumique (kg/m³)									
13 ans		15 ans		19 ans		20 ans		29 ans	
BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA
450,6	451	451,8	450,4	449	452,9	448,4	454,9	450,5	454,1
41,7	40	43,6	38,8	42,4	38,3	41,3	39	41,3	32,6
NS		NS		NS		NS		NS	
Module d'élasticité longitudinal (MPa)									
13 ans		15 ans		19 ans		20 ans		29 ans	
BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA
8287	8654	8359	8635	8359	8733	8412	8733	8528	8602
1029	1069	1084	1049	1090	1011	1117	956	1085	910
NS		NS		P=0,009		P=0,025		NS	
Retrait volumique total (%)									
13 ans		15 ans		19 ans		20 ans		29 ans	
BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA
9,4%	9,9%	9,5%	10,0%	9,5%	10,1%	9,6%	10,0%	9,7%	10,1%
0,5%	0,6%	0,5%	0,6%	0,5%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
P<0,001		P<0,001		P<0,001		P<0,001		P=0,001	
Retrait radial total (%)									
13 ans		15 ans		19 ans		20 ans		29 ans	
BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA
3,4%	3,7%	3,4%	3,7%	3,4%	3,7%	3,5%	3,7%	3,5%	3,7%
0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%	0,2%
P<0,001		P<0,001		P<0,001		P<0,001		P=0,003	
Retrait tangentiel total (%)									
13 ans		15 ans		19 ans		20 ans		29 ans	
BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA
5,8%	6,1%	5,8%	6,1%	5,9%	6,1%	5,9%	6,1%	6,0%	6,1%
0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
P<0,001		P<0,001		P<0,001		P<0,001		P=0,062	
PSFr (%)									
13 ans		15 ans		19 ans		20 ans		29 ans	
BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA
30,7%	30,3%	30,7%	30,3%	30,7%	30,2%	30,5%	30,3%	30,3%	31,1%
2,4%	2,7%	2,3%	2,8%	2,5%	2,7%	2,6%	2,7%	2,5%	2,9%
NS		NS		NS		NS		NS	
PSFt (%)									
13 ans		15 ans		19 ans		20 ans		29 ans	
BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA	BJ	BA
30,7%	31,4%	30,8%	31,4%	31,1%	31,2%	31,1%	31,3%	31,1%	31,4%
1,8%	2,4%	1,8%	2,4%	2,1%	2,4%	2,1%	2,3%	2,0%	3,0%
NS		NS		NS		NS		NS	

Tableau A11 : Moyennes, écart-types et probabilités des caractéristiques physico-mécaniques selon le type de bois en fonction des différents âges limites entre bois juvénile (BJ) et bois adulte (BA).