



THESE
en cotutelle entre
L'UNIVERSITE DE YAOUNDE 1
et
L'UNIVERSITE BORDEAUX 1
Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur



**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
POLYTECHNIQUE**
DEPARTEMENT DE GENIE-CIVIL

**NATIONAL ADVANCED SCHOOL OF
ENGINEERING**
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

**Regroupement mécanique par méthode
vibratoire des bois du bassin du Congo**

Thèse

Présentée par :

MVOGO Jean Kisito

Ingénieur civil, DEA

En vue de l'obtention du

Diplôme de Doctor of Philosophy (Ph.D.) en Sciences de l'Ingénieur

Option : Génie civil – Bois

Sous la Co-Direction de :

L. M. AYINA OHANDJA, Maître de Conférences, Université de Yaoundé I;
P. MORLIER, Professeur, Université Bordeaux 1.

Président : M. KOFANE Timoléon Crépin, Professeur, Université de Yaoundé 1

Rapporteur : M. AYINA OHANDJA Louis-Max, M.C, Université de Yaoundé 1

Membres : M. BEAKOU Alexis, Professeur, Université de Clermont-Ferrand II
M. NGUENANG Jean Pierre, Chargé de Cours, Université de Douala
M. CASTERA Patrick, Directeur de Recherche, Université Bordeaux 1

Année académique 2007-2008

Date de soutenance : 20 septembre 2008

Dédicace

*A l'Éternel, le DIEU d'Abraham,
d'Isaac et de Jacob.*

*A mon épouse Agathe.
A mes fils Abraham et Kévin.
A mes parents.*

*«Vous connaîtrez la vérité, et la vérité vous affranchira»
Jean 8:32*

Remerciements

Le moment est idoine pour exprimer ma profonde gratitude à mes deux encadreurs, le Professeur Louis-Max AYINA OHANDJA, directeur de thèse et le Professeur Pierre MORLIER, codirecteur de thèse. Leurs connaissances scientifiques m'ont beaucoup apportées tout au long de ce parcours. Je leur garde une inoxydable reconnaissance.

Je remercie tout particulièrement le Professeur Timoléon Crépin KOFANE d'avoir accepté de présider ce jury ainsi que les Professeurs Alexis BEAKOU et Amos FOUJNET qui se sont acquittés de la délicate tâche de rapporteurs sur ce travail.

En acceptant d'évaluer cette thèse comme membre du Jury, le Docteur d'Etat Jean Pierre NGUENANG a contribué à enrichir la qualité des débats en y apportant une contribution scientifique remarquable. Qu'il trouve ici nos remerciements, témoins du bon souvenir que nous gardons de lui.

Je remercie très chaleureusement Joseph MORLIER m'a initié sur l'essai vibratoire et doté du matériel nécessaire pour les campagnes d'essais.

J'ai trouvé au *Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux* (LRBB) un environnement scientifique et un cadre de travail de haute qualité en terme d'équipements et de personnel. Je tiens à remercier son Directeur, Patrick CASTERA de m'y avoir accueilli et d'avoir fait un long voyage pour évaluer cette thèse en qualité de membre du jury. Que Myriam CHAPLAIN, Françoise RODRIGUEZ, Pierrette WYSS, Bernard SOLBES, Michel CHASSAGNE, Christophe LAVERGNE et Jérôme MALVESTIO, tous membres dudit laboratoire soient remerciés pour les nombreux services rendus.

Je remercie sincèrement Régis POMMIER pour les multiples services rendus.

Je souhaite faire part de ma reconnaissance à tous les membres du *Laboratoire de Mécanique des Matériaux et de Constructions* (LMMC) de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, l'Université de Yaoundé 1, pour leur contribution à la réussite de cette thèse.

Je remercie de tout cœur l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) pour la bourse de formation à la recherche qu'elle m'a octroyée et qui a rendu possible mes déplacements entre le laboratoire à l'origine (LMMC) et le laboratoire d'accueil (LRBB).

Qu'il me soit enfin permis de remercier ma famille pour leur amour et leur soutien constant. Je leur dédie cette thèse.

Title: Mechanical grouping of species of structural timber in the Congo basin through vibratory method.

Abstract

This Ph.D. work deals with a non-destructive experimental approach organizing the species of the Congo basin in four groups according to the likeness of their main mechanical properties, and to guarantee for each group the 5th percentile characteristic value of mechanical properties such as the modulus of elasticity (MOE). For the sustainable management of forest and conservation of exotic biodiversity of the Congo basin, it is necessary to promote the exploitation of less-consumed species with equivalent mechanical characteristics. The aim of the present work is to propose a scheme for grouping species with similar values of modulus of elasticity (MOE) obtained through vibratory method. Only small clear specimens are tested. The assignment of a given specie to one of the four groups takes place in return for a homogeneity test of comparison of the random variables of species to the random variable of the group. Results of the present grading show that some species can be interchangeably consumed in the construction industry and that the procedure must include more species of the Congo basin. This property grouping will facilitate substitution of underutilized species for ones that are being more exploited. Thus, wood designers and constructors might have a wide variety of choices in their decision-making while promoting less-consumed species and reducing the demand of traditionally most wanted extinguishable species. The MOE obtained by intrinsic vibration of wood versus is not influenced by moisture content. So, the non destructive method bases on longitudinal vibrations can be used in industrial production of timber to certify the modulus of rupture (MOR) at 12% moisture content of green wood by direct correlation. Finally, we propose a grading system of tropical wood.

Keywords: Characteristic value, characterization, sampling, group of species, percentile, test of homogeneity, tropical wood.

Résumé.

L'objet de ce travail de thèse est le regroupement des essences bois du bassin du Congo en quatre groupes en fonction de la similitude de leurs propriétés mécaniques essentielles. Le module d'élasticité (MOE), propriété indicatrice, est estimé par une méthode non destructive : l'essai vibratoire. Pour chaque classe, le fractile à 5% d'exclusion supérieur d'une propriété mécanique est calculé à partir d'une théorie clairement exposée. Le bassin du Congo est un patrimoine en danger à cause des pressions anthropiques au premier rang desquelles figure la coupe hyper sélective des essences bois. Le résultat de ce regroupement permet de proposer comme substitut aux essences menacées d'extinction des essences aux propriétés mécaniques similaires plus disponibles en terme de ressources sur pied. D'où la contribution à la gestion durable et au maintien de la biodiversité du bassin du Congo. On montre que le MOE vibratoire est quasi-invariant avec la teneur en eau et qu'il est bien corrélé au MOE statique, à la masse volumique et à la contrainte à la rupture. C'est donc un bon prédicteur du module de rupture (MOR) à 12% du taux d'humidité du bois vert. Ceci valide l'organisation en groupe d'essences réalisée dans ce travail. Les valeurs caractéristiques des propriétés mesurées sont calculées pour chaque classe. Parce que l'Eurocode 5 exige que les bois utilisés en structure soient classés, nous proposons, *in fine*, un système de classement en structure des bois du bassin du Congo voué à une meilleure utilisation des forêts pour la conservation des écosystèmes forestiers et la satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme.

Mots clés : Bois tropicaux, caractérisation, classement, valeur caractéristique, groupe d'essences, test d'homogénéité, échantillonnage.

Sommaire

Dédicace	2
Remerciements	3
Abstract	4
Résumé	4
Liste des notations et symboles	8
Introduction générale	10
Chapitre 1: Contexte général et présentation bibliographique	16
Introduction	17
1.1 Contexte général du bassin du Congo	17
1.1.1 Contexte géographique.....	17
1.1.2 Contexte écologique	20
1.1.3 Contexte économique et socioculturel	20
1.1.4 La coupe hyper sélective des essences bois :une grande menace pour l'intégrité du bassin du Congo	21
1.1.5 Le développement durable	25
1.1.6 Quelques directives et organismes	28
1.1.6.1 <i>Quelques directives</i>	28
1.1.6.2 <i>Quelques institutions et organismes</i>	30
1.2 Présentation bibliographique	33
1.2.1 Rhéologie du bois : caractéristiques mécaniques	33
1.2.1.1 <i>Modélisation de la grume idéale</i>	34
1.2.1.2 <i>Grandeurs techniques</i>	34
1.2.2 Caractérisation des bois tropicaux.....	37
1.2.3 Le classement des bois	38
1.2.4 Méthodes d'évaluation non destructive.....	41
1.2.5 Considérations théoriques des méthodes vibratoires	44
1.2.5.1 <i>Définition géométrique et hypothèses des modèles classiques</i>	45
1.2.5.2 <i>Description et équation du mouvement</i>	47
1.2.5.3 <i>Module d'élasticité en vibrations longitudinales</i>	49
1.2.5.4 <i>Module d'élasticité en vibrations transversales</i>	51
Conclusion.....	55
Chapitre 2 : Méthodologie	56
Introduction	57
2.1 Essais vibratoires	57
2.1.1 Principe de la mesure du module d'élasticité dynamique	57
2.1.2 Appareillage	58
2.1.3 Mode opératoire	59
2.1.4 Obtention d'une valeur numérique du module d'élasticité	61

2.2 Essais statiques (court terme)	62
2.2.1 Principe de la mesure du module d'élasticité statique	62
2.2.2 Appareillage	65
2.2.3 Mode opératoire	65
2.2.4 Obtention des valeurs numériques du module d'élasticité.....	66
2.3 Taux d'humidité	67
2.4 Méthodologie du regroupement mécanique des essences	69
2.4.1 Paramètres des échantillons.....	69
2.4.2 Affectation d'une essence dans un groupe	70
2.5 Estimation statistique de la valeur caractéristique	74
2.5.1 Estimation de la valeur caractéristique pour une variable aléatoire distribuée suivant une loi normale	76
2.5.1.1 Estimation simple de la valeur caractéristique et calcul de $P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]$	78
2.5.1.2 Estimation par intervalle.....	81
2.5.1.3 Estimation sans biais.....	84
2.5.2 Estimation de la valeur caractéristique pour une variable aléatoire distribuée suivant une loi lognormale	85
2.5.2.1 Estimation simple de la valeur caractéristique.....	87
2.5.2.2 Estimation par intervalle.....	87
2.5.2.3 Estimation sans biais.....	88
2.6 Echantillonnage	89
2.6.1 Aperçu bibliographique.....	89
2.6.2 Technique d'échantillonnage des essences du bassin du Congo.....	91
2.7 Choix de la propriété indicatrice du regroupement des essences	92
2.8 Analyses statistiques	93
Conclusion.....	94
Chapitre 3: Résultats et discussions	95
Introduction	96
3.1 Le matériel végétal	96
3.2 Quasi-invariabilité du module d'élasticité vibratoire en fonction	97
3.2.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais	99
3.2.2 Analyse des résultats et discussions	105
3.3 Comparaison entre module élastique vibratoire	113
3.3.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais	113
3.3.2 Analyse des résultats et discussions	117
3.3.2.1 Comparaison avec d'autres sources	117
3.3.2.2 Commentaires.....	118
3.4 Corrélation entre module élastique vibratoire et contrainte de rupture	119
3.4.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais	119
3.4.2 Analyse des résultats et discussions	123
3.4.2.1 Validation de la méthode par comparaison	123
3.4.2.2 Commentaires.....	127
3.5 Corrélation entre module élastique vibratoire et masse volumique	128
3.5.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais	128
3.5.2 Analyse des résultats et discussions	132
3.6 Regroupement des essences	132
3.6.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais	132

3.6.2 Affectation des essences dans les groupes	135
3.6.3 Valeurs caractéristiques au fractile 5% d'exclusion inférieure	136
3.6.4 Analyse des résultats et discussions	139
3.6.4.1 Commentaires.....	139
3.6.4.2 Valeurs caractéristiques de la résistance.....	140
3.6.4.3 Proposition d'un système de classes de résistance	141
3.6.4.4 Classement individuel des sciages	142
3.6.4.5 Comparaison avec le système de classes de la norme EN 338	144
Conclusion.....	147
Conclusion générale et perspectives	148
Conclusion générale	149
Perspectives.....	153
Liste des figures et tableaux	154
Bibliographie.....	159

Notations et symboles

Les variables aléatoires sont représentées par des lettres majuscules et les réalisations de ces variables aléatoires par des lettres minuscules.

1- Majuscules latines

E : module d'élasticité (MPa)

$E_{0,moyen}$: moyenne du module d'élasticité

G : module de cisaillement (MPa)

$G_{0,moyen}$: module moyen de cisaillement

H : teneur en humidité (%)

I : moment d'inertie (m^4)

L : longueur de la poutre (mm) ou direction longitudinale.

\mathcal{M} : moment de flexion (N m)

P : charge (N)

R : direction radiale

T : direction tangentielle

2- Minuscules latines

b : largeur de la poutre (mm)

h : épaisseur de la poutre (mm)

$f_{m,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en flexion

$f_{t,0,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en traction axiale

$f_{t,90,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en traction transversale

$f_{c,0,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en compression axiale

$f_{c,90,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en flexion compression transversale

$f_{v,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture au cisaillement

t : temps (min.)

u : déplacement (mm)

w : déflexion ou flèche (mm)

x, y, z : coordonnées cartésiennes

3- Minuscules grecques

β : coefficient de retrait libre (%)

γ : déformation angulaire (%)

ε : déformation axiale (mm/mm)

η : coefficient de viscosité (MPa h)

θ : angle de rotation de l'axe neutre de la poutre ($^{\circ}$ deg.)

ν : coefficient de Poisson

ρ_k : fractile 5% inférieure de la masse volumique

σ : contrainte axiale (MPa)

τ : contrainte de cisaillement (MPa) ou temps de relaxation (h)

4- Abréviations

FAO : Food and Agriculture Organisation

LMMC : Laboratoire de Mécanique des Matériaux et Constructions

LRBB : Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux

MOE : Module d'élasticité

MOR : Module de rupture

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PSF (fsp) : Point de Saturation des Fibres

RDM : Résistance Des Matériaux

WWF : World Wildlife Fund

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Le bassin du Congo abrite une biodiversité exceptionnelle tant pour les arbres que pour la flore ou la faune en général. Son massif forestier contribue, de manière importante, à la lutte contre l'effet de serre en absorbant le carbone dans l'air. Aussi, le considère-t-on comme le poumon gauche de notre planète, puisqu'il constitue après l'Amazonie, la seconde forêt tropicale au monde, en terme de surface. Les forêts à très grande valeur écologique du bassin du Congo ont des menaces qui pèsent sur elles au premier rang desquelles figure la coupe sélective des essences inhérente à l'exploitation commerciale du bois.

Les bois exotiques du bassin du Congo sont solides, résistants et esthétiques et font objet d'importants échanges commerciaux internationaux. Les impressionnantes qualités industrielles et les couleurs chatoyantes de ces bois, appréciés dans le monde entier tant pour des utilisations traditionnelles que novatrices, font office de dogme. Utilisés à différentes fins (charpente, parquet, panneaux isolants, ameublement, ébénisterie, traverses de chemin de fer, manches d'outils, construction navale, escaliers, cuves à produits chimiques, placage, travaux hydrauliques, ponts, carrosserie, menuiserie, tonnellerie, papeterie, crosses de fusils, talons de chaussures, etc.), ces bois restent en général mal valorisés, toutes les exportations se concentrant autour d'un petit nombre d'essences. Quoique le bois soit certes un matériau naturel renouvelable, la régénération naturelle est supplantée à une vitesse vertigineuse par la pression du rythme de coupe hyper sélective qui est la chronique d'une inexorable extinction de certaines essences traditionnellement très commercialisées. Au Cameroun, exemple représentatif de l'écosystème que constitue le bassin du Congo, plus de trois cents espèces commercialisables ont été inventoriées et une soixantaine d'essences pouvant servir comme bois de structure y est exploitée actuellement. Mais les rythmes d'exploitation sont très inégalement répartis entre les différentes essences. Six d'elles (ayous, iroko, sapelli, tali, fraké et azobé) représentent environ 84% de volume d'abattage chaque année (*Tableau 1.3*). Cette coupe sélective implique une pression trop lourde sur certaines essences spécifiques. Certaines d'entre elles se régénèrent très lentement. Il faut donner une priorité absolue à la préservation de ces grandes forêts vierges.

Par ailleurs, les bois tropicaux sont très souvent mis en œuvre de façon empirique, et en recourant, lorsque des problèmes de sécurité se posent comme par exemple pour les ponts et les charpentes lourdes, à des surdimensionnements extrêmement importants.

Face aux exigences de compétitivité, il est nécessaire d'optimiser le choix du matériau et le dimensionnement de la structure. De plus, les contraintes de fiabilité et de sécurité sont actuellement pressantes dans le «village planétaire» et exigent une maîtrise des caractéristiques physiques et surtout mécaniques des structures. Il est nécessaire de concilier deux objectifs apparemment contradictoires: assurer la fiabilité et la sécurité des structures en bois et dimensionner rationnellement afin de ne pas trop alourdir les structures. Ces bois ont besoin d'un système de classement afin d'apporter une connaissance plus fine de leur comportement en terme de résistance en vue d'une utilisation rationnelle qui tienne compte des solutions technico-économiques appropriées. Ceci vise à sélectionner les meilleurs matériaux possibles et à évaluer le prix de chaque planche à sa juste valeur. En effet, le bois coûte cher et les préjudices d'une utilisation ne tenant pas compte des exigences de sécurité et de fiabilité du bois peuvent être dramatiques. Vaut mieux classer les sciages.

Depuis le Sommet de la Terre de Rio en 1992, la gestion forestière durable est érigée en directive pour le commerce international des bois, et donc des bois tropicaux. La promotion des essences secondaires est le levier qu'on peut actionner de manière raisonnable pour la gestion durable du patrimoine forestier, pour éviter de tuer la «poule aux œufs verts» qu'est le

massif forestier du bassin du Congo. Or, la promotion d'une essence isolée est difficile. D'où la nécessité de regrouper toutes les essences du bassin du Congo susceptibles de donner du bois de structure autour de certaines essences traditionnelles en fonction de la similitude de leurs propriétés mécaniques essentielles dans le dessein manifeste d'encourager l'usage en structure des essences secondaires ou, en général, des essences disponibles en terme de ressources sur pied. Car, il est évident que la ruée vers quelques essences traditionnelles est avant tout un problème de communication, dû à un effet pervers de la promotion de ces essences au détriment des essences plus disponibles en terme de ressources sur pied.

La forêt dense du Cameroun est un écosystème représentatif du bassin du Congo. C'est la raison pour laquelle l'étude est menée sur les essences du Cameroun, la méthode étant facilement extrapolable à tout le bassin congolais.

Dans cette thèse, nous proposons d'élaborer une méthodologie d'organisation des essences du bassin du Congo en quatre groupes d'essences autour des essences les plus exploitées, et un processus d'affectation exclusive de n'importe quelle essence de l'écosystème susmentionné, et donc des essences secondaires, dans l'un des groupes. A cause de la variabilité inter essences et intra essence, une estimation statistique est nécessaire (Joyet et al., 2002).

Au sein d'un groupe, une approche théorique du calcul de la valeur caractéristique au fractile à 5% d'exclusion inférieure pour une propriété mécanique essentielle donnée est proposée.

Une application est faite en prenant comme propriété indicatrice le module d'élasticité longitudinal obtenu par une méthode vibratoire, évaluation non destructive basée sur l'analyse spectrale des vibrations naturelles d'une poutre en bois. C'est une méthode simple à mettre en œuvre, largement connue et qui présente une reproductibilité extraordinaire des résultats.

La pertinence de ce regroupement repose sur les arguments en faveur du nombre de groupes, l'affectation exclusive d'une essence donnée dans un groupe, la rigueur d'une technique d'échantillonnage à moindre coût et l'exactitude de l'exploitation statistique des résultats. A la lumière de ces groupes d'essences, nous proposerons un système de classement des performances mécaniques des bois tropicaux du bassin du Congo.

Les essais vibratoires sont effectués sur une vingtaine d'essences avec une moyenne de cent éprouvettes par essence. Plusieurs autres essais sont entrepris de manière collatérale pour apprécier l'influence éventuelle de l'humidité sur le module vibratoire et les corrélations de ce dernier avec les principales propriétés physiques et mécaniques du bois. Tout ceci dans le dessein de ressortir la pertinence de la prédiction de la contrainte à la rupture en flexion statique par le module d'élasticité vibratoire.

En général, l'utilisation d'une essence ne se limite pas seulement aux considérations purement mécaniques. En effet, le commerce d'une essence est conditionné par plusieurs facteurs dont les plus courants sont :

- l'aspect et la couleur ;
- les principales propriétés physiques et mécaniques (masse volumique à 12% du taux d'humidité, dureté Monnin, Point de Saturation des Fibres (PSF), retrait volumique total, retrait tangentiel total, retrait radial total, contrainte de rupture, en compression parallèle, contrainte de rupture en flexion statique, module d'élasticité longitudinal, etc.) ;
- la durabilité (résistance naturelle aux champignons, résistance naturelle aux lyctus, résistance naturelle aux termites) et l'imprégnabilité ;

- les caractéristiques de mise en œuvre (sciage, tranchage, déroulage, séchage, assemblage, finition).

Toutefois, le module d'élasticité longitudinal reste une propriété de première nécessité technologique pour les emplois en structure, principal usage des bois exotiques, où les pièces de bois sont fréquemment sollicitées en flexion statique suivant leur plus grande direction, parallèlement aux fibres. Estimé à 12% du taux d'humidité, il constitue une caractéristique mécanique de référence. Cette propriété caractérise la proportionnalité entre la charge et la déformation et est un indicateur de la rigidité du bois.

Nous limiterons nos investigations au regroupement mécanique, et donc à l'usage en structure des bois du bassin du Congo, en prenant le module d'élasticité longitudinal vibratoire comme propriété indicatrice.

La qualité du bois (et donc ses propriétés mécaniques essentielles) change en fonction de nombreux paramètres : climatiques, écologiques, sylvicoles et même génétiques. D'où la variabilité des propriétés mécaniques du bois, le rapport entre la plus faible et la plus résistante pouvant aller de 1 à 10. Pour une essence donnée, on note une variabilité inter-arbres et une variabilité intra-arbres. Le processus de transformation ajoute à cette variabilité. En effet, les variations des propriétés mécaniques du bois équarri sont plus importantes que celles du bois rond. D'où la nécessité d'une analyse statistique des mesures expérimentales. La valorisation en structure des bois tropicaux passe par une meilleure connaissance de leurs caractéristiques technologiques et mécaniques. Cette nécessité s'applique, non seulement aux essences traditionnelles, mais aussi aux essences considérées comme secondaires pour garantir le succès de leur emploi en structure.

Les objectifs de la caractérisation mécanique couplée au regroupement des bois du bassin du Congo sont multiples. Il s'agit à la fois:

- de renseigner les concepteurs d'ouvrages sur les performances du matériau;
- de promouvoir les essences secondaires comme substituts valables aux essences traditionnelles;
- de proposer un système de classement structure des bois concernés;
- de faciliter le commerce en proposant un nombre simple d'option à interface clients / fournisseurs;
- d'assurer la valorisation optimale du potentiel forestier dans le cadre du développement durable;
- de conseiller utilement les politiques de boisement et les sylvicultures à développer;
- de mieux cerner les paramètres qui conditionnent la méthode d'évaluation non destructive. En effet, la mesure des caractéristiques technologiques par la flexion statique (norme NF B 52 – 002, projet de norme pr EN 408, etc.) montre que ces propriétés sont fortement influencées par plusieurs paramètres au premier rang desquels figure le taux d'humidité. Dans l'élaboration future des protocoles d'essais reposant sur l'analyse vibratoire, une recherche méthodologique s'impose pour comprendre les paramètres importants. Rappelons qu'à notre connaissance, il n'existe encore aucune norme pour la méthode vibratoire.

Ce travail est réparti en trois chapitres précédés chacun d'un résumé.

Dans le **chapitre 1**, on s'attache davantage, dans un premier temps, à présenter sommairement le bassin du Congo sur les plans géographique, écologique et socio-économique et d'évoquer la coupe sélective comme une menace qui pèse sur ce patrimoine et quelques directives actuelles sur le développement durable. Ici, «quelques arbres masquent la forêt». Au Cameroun par exemple, six essences (ayous, iroko, sapelli, tali, fraké et azobé) représentent environ 84% de volume d'abattage chaque année. Malgré les efforts considérables des organismes internationaux et des pays concernés, la déforestation se poursuit dans le bassin du Congo. Dès lors, le regroupement des essences apparaît comme une contribution à la gestion durable de cet exceptionnel massif forestier par la promotion des essences disponibles en terme de ressources sur pied. Dans un deuxième temps, on procède à une présentation bibliographique sur l'état actuel de la recherche ainsi qu'une présentation succincte des caractéristiques mécaniques élastiques du bois et de la théorie vibratoire sur laquelle on s'appuie pour calculer le module d'élasticité longitudinal. La méthode vibratoire est rapide, sensible, fidèle, fiable et pratique. Parce qu'elle exige un appareillage léger, on peut mener les essais de façon itinérante. C'est une méthode simple à mettre en œuvre, largement connue et qui présente une reproductibilité extraordinaire des résultats.

Dans le **chapitre 2**, on présente d'abord les méthodes et matériel pour les essais vibratoires et de flexion quatre points qui sont effectués dans cette thèse. Ceci permet d'envisager la mesure d'une propriété physique (masse volumique) et de trois propriétés mécaniques (module d'élasticité longitudinal vibratoire, module d'élasticité longitudinal en flexion et contrainte de rupture en flexion parallèle) à humidité contrôlée. Pour chaque essai, nous exposons le principe de la mesure, l'appareillage, le mode opératoire, les formules et les calculs nécessaires à l'obtention des valeurs numériques escomptées. Ensuite, une présentation théorique de la méthodologie de regroupement des essences et du calcul des valeurs caractéristiques est proposée. Les techniques d'échantillonnage classique sont onéreuses. Nous proposons une méthode d'échantillonnage simplifiée et adaptée au contexte des pays en développement qui ne disposent pas suffisamment de moyens en termes d'infrastructures et économique. Le ravitaillement en pièces d'essences escomptées se fera auprès de plusieurs points de vente pour tenir statistiquement compte de la variabilité du bois. Dans le cadre des présentes investigations, l'une des sources d'approvisionnement est le marché local de Yaoundé où parvient, dans sa variabilité, la plupart d'essences de la forêt dense du Cameroun.

C'est l'objet du **chapitre 3** de présenter le matériel végétal d'étude (essences retenues pour la campagne d'essais) et d'analyser dans le détail les résultats de chaque campagne. Plus de 2000 éprouvettes de dimensions moyennes $20 \times 20 \times 400 \text{ mm}^3$ constituées de dix-neuf essences ont été testées à humidité contrôlée. Ce nombre élevé d'échantillons de très grande taille permet d'escompter des résultats représentatifs qui tiennent compte de la variabilité du matériau bois. On montrera que l'influence de l'humidité sur les mesures vibratoires est non significative ; un modèle rhéologique permettra d'apporter une tentative d'explication sur ce phénomène encore mal connu sur le plan bibliographique. Des corrélations entre le module d'élasticité vibratoire d'une part et le module d'élasticité statique, la contrainte de rupture et la masse volumique d'autre part, sont effectuées. Il ressort que le module élastique vibratoire est un bon prédicteur de la contrainte à la rupture. Compte tenu du fait que nos mesures montrent que ce module élastique vibratoire est quasi-invariant avec la teneur en eau, l'essai vibratoire apparaîtrait comme un moyen efficace de classement des bois quelque soit le taux d'humidité. Ceci valide l'organisation en groupe d'essences réalisée dans ce travail. Les valeurs caractéristiques des propriétés mesurées sont calculées pour chaque classe. Parce que

l'Eurocode 5 exige que les bois utilisés en structure soient classés, quelle que soit la méthode, pour connaître leurs performances mécaniques, nous proposons, *in fine*, un système de classement des performances en structure des bois du bassin du Congo voué à une meilleure utilisation des forêts pour la conservation des écosystèmes forestiers et la satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme.

CHAPITRE I: CONTEXTE GÉNÉRAL ET PRÉSENTATION BIBLIOGRAPHIQUE

Résumé.

Dans ce chapitre, on s'attache davantage, dans un premier temps, à présenter sommairement le bassin du Congo sur les plans géographique, écologique et socio-économique et d'évoquer la coupe sélective comme une menace qui pèse sur ce patrimoine et quelques directives actuelles sur le développement durable. Ici, « quelques arbres masquent la forêt ». Au Cameroun par exemple, six essences (ayous, iroko, sapelli, tali, fraké et azobé) représentent environ 84% de volume d'abattage chaque année. Malgré les efforts considérables des organismes internationaux et des pays concernés, la déforestation se poursuit dans le bassin du Congo. Dès lors, le regroupement des essences apparaît comme une contribution à la gestion durable de cet exceptionnel massif forestier par la promotion des essences disponibles en terme de ressources sur pied. Dans un deuxième temps, on procède à une présentation bibliographique sur l'état actuel de la recherche ainsi qu'une présentation succincte des caractéristiques mécaniques élastiques du bois et de la théorie vibratoire sur laquelle on s'appuie pour calculer le module d'élasticité longitudinal. La méthode vibratoire est rapide, sensible, fidèle, fiable et pratique. Parce qu'elle exige un appareillage léger et peu onéreux, on peut mener les essais de façon itinérante. C'est une méthode simple à mettre en œuvre, largement connue et qui présente une reproductibilité extraordinaire des résultats.

Introduction

Les investigations du présent travail ont pour cadre le bassin du fleuve Congo. Pour mieux appréhender le regroupement mécanique des essences comme une contribution à la gestion durable de cet exceptionnel massif forestier par la promotion des essences disponibles en terme de ressources sur pied, il est nécessaire, dans un premier volet, de présenter sommairement le bassin du Congo sur les plans géographique, écologique et socio-économique, d'évoquer la coupe sélective comme une menace qui pèse sur ce patrimoine et quelques directives actuelles sur le développement durable. Dans un deuxième temps, on procède à une présentation bibliographique sur l'état actuel de la recherche ainsi qu'une présentation succincte des caractéristiques mécaniques élastiques du bois et de la théorie vibratoire sur laquelle on s'appuie pour calculer le module d'élasticité longitudinal.

1.1 Contexte général du bassin du Congo.

1.1.1 Contexte géographique.

Le bassin du Congo représente une vaste étendue forestière d'une superficie de 227,61 millions d'hectares (FAO, 2005), soit 6% de la surface forestière mondiale et 70% du couvert forestier dense et humide d'Afrique. Ses forêts sont à cheval entre sept pays d'Afrique centrale : Cameroun, République Centrafricaine, Congo Brazzaville, République Démocratique du Congo (ex-Zaire. Plus de 50 % de toutes les forêts équatoriales du bassin du Congo s'y trouvent), Guinée Equatoriale, Gabon et Tchad et s'étendent jusqu'à l'enclave anglaise du Cabinda (*Figure 1.1*)

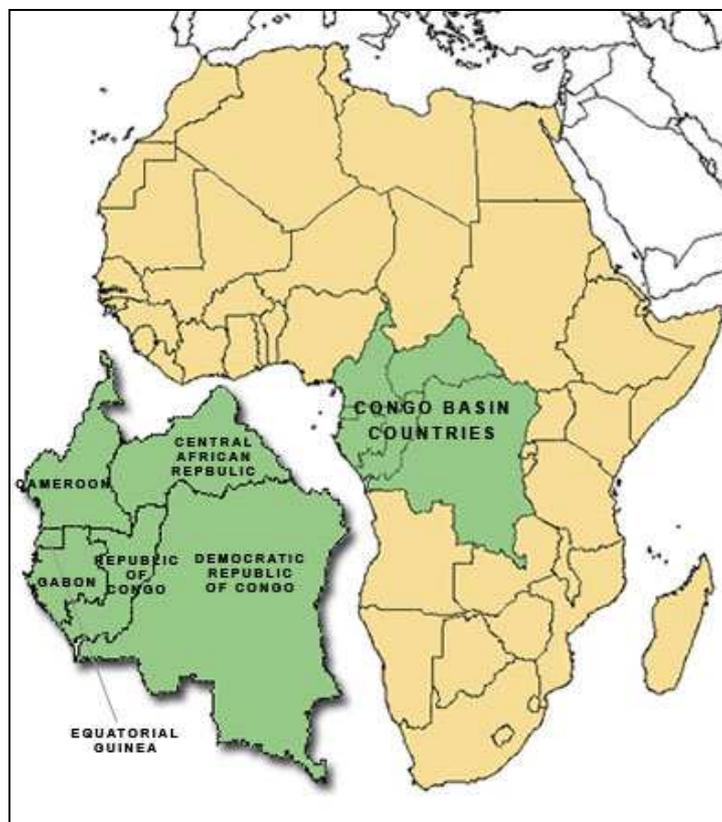


Figure 1.1: Situation géographique des pays du bassin du Congo.

La zone des forêts denses tropicales humides ne couvre pas totalement les pays susmentionnés (Figure 1.2).

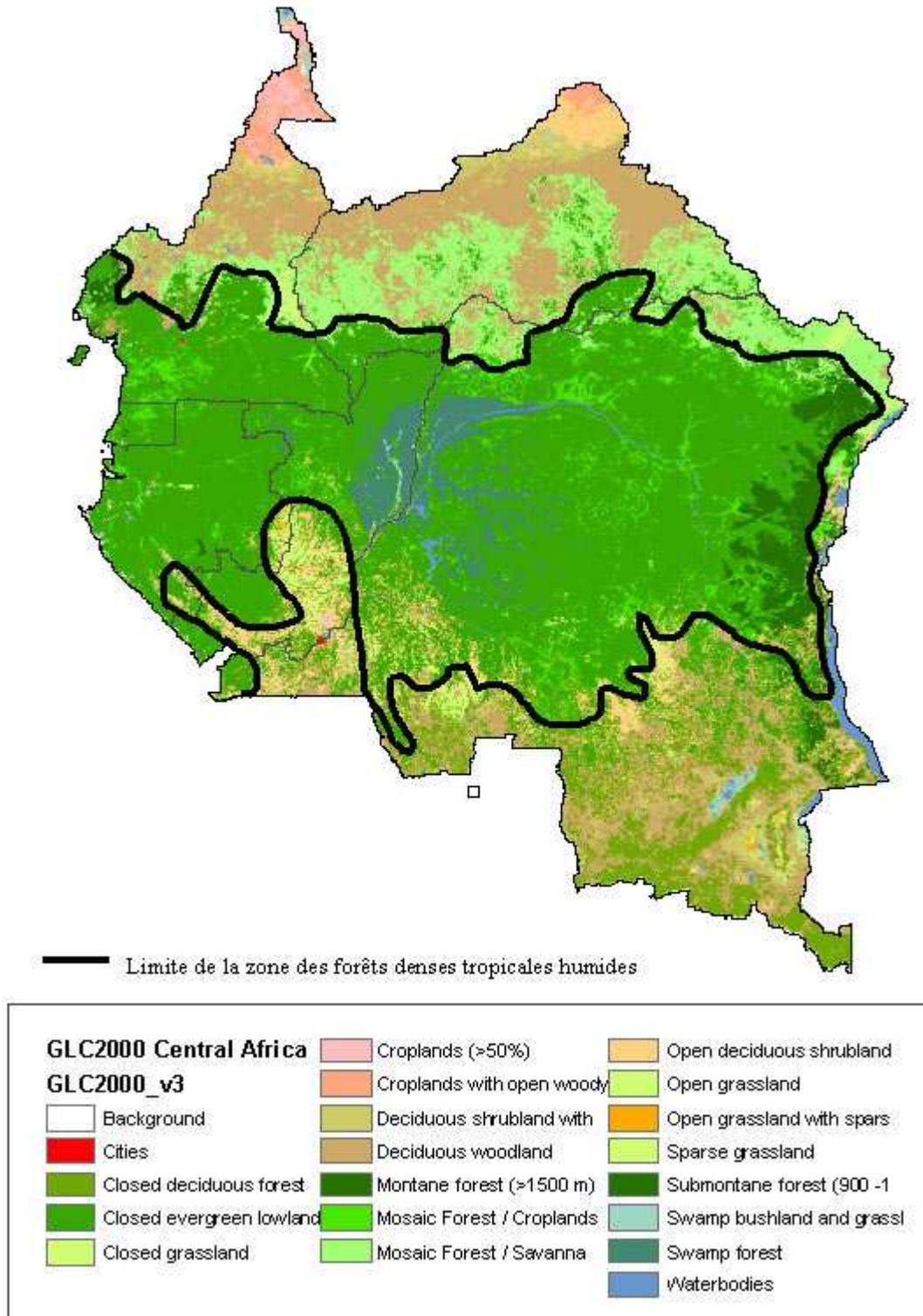


Figure 1.2: Situation des forêts du bassin du Congo (France diplomatie, 2005).

Les surfaces forestières mondiales représentent 3500 millions d'hectares dont plus de la moitié sont localisées dans des pays en voie de développement (Figure 1.3). Les surfaces tropicales représentent 90% de ces forêts réparties entre les trois pôles que sont l'Amérique

latine (environ 50% des surfaces tropicales), l'Afrique (environ 30%) et l'Asie Pacifique (environ 20%).



Figure 1.3: Répartition des forêts dans le monde (FAO, 2000).

Le bassin du Congo est situé dans la zone intertropicale ; il est donc soumis à un climat équatorial. Ce climat a pour principales caractéristiques une humidité ambiante et une chaleur permanentes ainsi qu'une égalité plus ou moins prononcée de la durée du jour et de la nuit durant toute l'année. Il est de type chaud. La température est comprise entre 25°C et 30°C toute l'année, avec une amplitude thermique relativement faible, de l'ordre de 5°C.

Les précipitations sont fortes dans les zones intertropicales : supérieures à 1500 mm/an avec toujours plus de 100 mm mensuels (en moyenne 200 mm), mais le caractère marqué du climat est plutôt le fait de précipitations constantes (il pleut pendant les trois quarts de l'année) et donc d'une humidité permanente (80% au sol en moyenne). Les forêts de montagnes, située entre 1000 et 2000 mètres d'altitude, bénéficient de précipitations largement supérieures aux forêts de plaines : 2000 mm à 8000 mm selon l'altitude. L'alizé, vent de direction nord-est dans l'hémisphère nord et sud-est dans l'hémisphère sud, est une composante importante de ce climat par son apport de précipitations, il exerce son influence depuis le niveau de la mer jusqu'à 2000 m d'altitude. Dans les zones proches de l'équateur, les alizés influents sont les alizés océaniques. Ce sont ces vents doux et lents (20km/h) qui amènent la pluie, par évaporation océanique, dans les régions équatoriales, *a contrario* des régions arides où les alizés continentaux qui y sont actifs n'amènent qu'aridité.

1.1.2 Contexte écologique.

La diversité biologique du bassin du Congo fait office de dogme. Elle est spécifique tant pour les arbres que pour la flore ou la faune en général (jusqu'à plusieurs milliers d'espèces d'arbres par hectare, contre une dizaine d'espèces en milieu tempéré), ses arbres de grandes tailles (souvent dotés de racines contreforts), ses genres ou familles endémiques en font sa grande richesse, un capital unique de biodiversité avec près de la moitié des espèces terrestres connues : la République Démocratique du Congo (RDC) possède, à elle seule, 60% des espèces végétales et animales répertoriées. Plus riches écosystèmes terrestres d'Afrique, les forêts du bassin du Congo abritent plus de la moitié de la faune sauvage du continent, dont la plupart des derniers éléphants de forêts africains et l'unique population mondiale de gorilles des plaines. Ce cadre abrite une biodiversité exceptionnelle : plus de 11000 espèces de plantes, 400 espèces de mammifères, 1100 espèces d'oiseaux, 150 espèces de serpents et 1050 espèces de poissons, etc. (Greenpeace, 2003). Ces forêts revêtent une importance cruciale pour la préservation de la diversité biologique terrestre. Leur destruction implique la disparition de la principale réserve de vie végétale et animale sur terre. Au-delà de cette diversité biologique exceptionnelle, les forêts du bassin du Congo contribuent, de manière importante, à la lutte contre l'effet de serre en absorbant le carbone dans l'air. En effet, le CO₂ qui joue un rôle majeur dans le réchauffement climatique est absorbé par les arbres durant leur croissance. Aussi, considère-t-on le bassin du Congo comme le poumon gauche de notre planète, puisqu'il constitue après l'Amazonie, la seconde forêt tropicale au monde, en terme de surface. Pendant leur période de croissance, les arbres utilisent la photosynthèse pour fixer le carbone atmosphérique et le transformer en matière organique. En bref, ces forêts du bassin du Congo, jouent un rôle important dans l'équilibre climatique et la préservation de la biodiversité planétaire. Cependant, même si ce biome est le plus riche et le plus complexe de la planète, le sol de la forêt tropicale n'en reste pas moins fragile, mince et pauvre en humus. Tout élément décomposé est réutilisé rapidement et remis en circulation ou entraîné dans les eaux souterraines. Aux fonctions environnementales essentielles de ces forêts à l'échelle planétaire (maintien de la biodiversité, effet de serre, cycle de l'eau) s'ajoutent, pour les pays du bassin du Congo, des enjeux économiques et socioculturels considérables.

1.1.3 Contexte économique et socioculturel.

Les espèces de bois du bassin du Congo sont utilisées pour un grand nombre d'applications (charpente, parquet, panneaux isolants, ameublement, ébénisterie, traverses de chemin de fer, manches d'outils, construction navale, escaliers, cuves à produits chimiques, placage, travaux hydrauliques, ponts, carrosserie, menuiserie, tonnellerie, papeterie, crosses de fusils, talons de chaussures, etc.). Environ 29 millions d'humains comprenant plus de 150 groupes ethniques principalement d'origine bantoue et pygmée vivaient actuellement dans cette zone. Ces forêts abritent donc des populations de diverses cultures qui en dépendent plus ou moins directement pour leurs ressources alimentaires, les matériaux de construction, les produits médicinaux, etc.. Environ trois millions dépendent de l'écosystème forestier pour leur survie (FAO, 1999). Les forêts sont une réserve stratégique vitale pour les populations qui y habitent car elles constituent non seulement le refuge mais aussi une réserve de nourriture, de matériaux, de produits divers particulièrement importants. La subsistance de plusieurs familles autochtones est basée sur l'utilisation de la biodiversité forestière. Les produits forestiers non ligneux et l'agriculture de subsistance constituent la base traditionnelle des moyens d'existence et des réseaux d'échanges entre ces différents groupes humains vivant dans ces espaces. Les

pygmées vivent principalement de la chasse et de la cueillette. Ce qui veut dire que grâce à la forêt, les pygmées peuvent se nourrir. La forêt est leur mère nourricière. Elle est pour eux, une source de vie. Certaines essences d'arbres, comme le moabi, sont très utiles pour la population locale. En effet, les moabis produisent une huile de très grande qualité, la seule huile alimentaire produite par cette région forestière. Son écorce sert à la fabrication de nombreux médicaments pour soigner les hernies, le mal de dos et les hémorroïdes. Il faut craindre qu'avec l'appauvrissement progressif de l'écosystème forestier dû davantage à l'accélération de l'exploitation forestière industrielle, le système alimentaire des pygmées ne tombe dans une récession et que la sécurité alimentaire connue jusqu'ici connaisse des perturbations préjudiciables à leur vie. En outre, dans toutes les sociétés, des valeurs culturelles et spirituelles sont rattachées aux forêts. Les pays en voie de développement considèrent légitimement leurs forêts comme une ressource économique. En République centrafricaine le secteur forestier représentait 9,7% du PIB en 1995. Au Gabon, la filière bois emploie 28% de la population active. Dans ces pays, la forêt constitue l'habitat des millions de personnes qui en dépendent totalement pour leur survie. Au Cameroun, 80% de la population tire son énergie de la biomasse qui représente 64% de l'énergie. Au plan sous-régional et national, elles sont tout à la fois facteur d'intégration, sources de devises étrangères et pièce maîtresse du dispositif de lutte contre la pauvreté mis en place par des Etats. En général, les Etats allèguent des raisons économiques pour justifier l'exploitation forestière industrielle et estiment qu'elle contribue au recul de la pauvreté. Ainsi, certains promoteurs de l'exploitation industrielle des forêts la présentent comme la meilleure option de développement en mettant l'accent sur les bénéfices directs apportés par les emplois et par la construction d'infrastructures. Les pouvoirs publics justifient l'expansion de l'exploitation forestière industrielle par les impératifs de développement économique et social. Les forêts et les terres boisées sont indispensables à la vie de l'homme qui en tire de nombreux biens et services. Elles contribuent fortement à équilibrer l'environnement et renferment une grande partie de la diversité génétique essentielle à l'amélioration future des espèces végétales et animales. La survie des forêts est primordiale pour la durabilité d'autres ressources aussi précieuses que l'eau et les sols, desquelles dépend le développement.

1.1.4 La coupe hyper sélective des essences bois : une grande menace pour l'intégrité du bassin du Congo.

Les forêts à très grande valeur écologique du bassin du Congo ont des menaces qui pèsent sur elles (*Tableau 1.1*). La biodiversité, patrimoine naturel et ressource vitale pour toute l'humanité, est en cours d'érosion irréversible due aux activités humaines. L'augmentation des pressions anthropiques conduit à l'épuisement des ressources. Bien que les facteurs soient nombreux et souvent associés, l'exploitation commerciale du bois constitue la plus grande menace pour l'intégrité écologique de ces forêts.

Tableau 1.1: Perte de couvert forestier en Afrique Centrale entre 1990 et 2000 (FAO, 2005).

Perte de couvert forestier en Afrique Centrale 1990 – 2000 (FAO) (x 1000 ha)

Pays	Superficie totale	Couvert forestier en 1990	Couvert forestier en 2000	Perte annuelle 1990-2000	Pourcentage
Cameroun	46 540	26 076	23 858	-222	-0.9 %
Congo	34 150	22 235	22 060	-17	-0.1 %
Gabon	25 767	21 927	21 826	-10	n.s.%
Guinée Equato.	2 805	1 858	1 752	-11	-0.6 %
RCA	62 298	23 207	22 907	-30	-0.1 %
RDC	226 705	140 531	135 207	-532	-0.4 %

La coupe sélective implique une pression trop lourde sur quelques essences spécifiques. Certaines d'entre elles se régénèrent très lentement. Il faut donner une priorité absolue à la préservation de ces grandes forêts vierges. Cependant, leurs superficies diminuent en moyenne de 0,6% par an avec des pertes énormes dues au prélèvement sélectif qui augmente la pression de coupe des essences traditionnelles. L'exploitation anarchique de la forêt s'accroît à un rythme inquiétant, voire alarmant selon les ONG (dont les plus alarmistes parlent de « massacre à la tronçonneuse »), accélérant la dégradation et la destruction des écosystèmes. Ainsi, la Rainforest Foundation UK, soutenue par d'autres ONG, a lancé une campagne intitulée « Stoppons le massacre des forêts congolaises ». En effet, La destruction des écosystèmes forestiers s'accélère sous l'effet conjugué de la pression démographique, de l'aggravation de la pauvreté et de l'action prédatrice de puissants groupes industriels qui contournent les réglementations et bénéficient de la complaisance des autorités. Selon la FAO, au Cameroun, près de 2 millions d'hectares de forêts furent perdus entre 1980 et 1995, près d'un dixième de la forêt existant en 1980. Les taux de déboisement au cours de cette période étaient en moyenne de 0,6%, ce qui représente le deuxième taux le plus élevé de déboisement annuel dans le bassin du Congo ! (Global Forest Watch).

Les forêts équatoriales du Cameroun font partie du bassin du Congo et le Cameroun est le plus grand exportateur de bois tropical d'Afrique. Le Cameroun est pour l'instant l'un des principaux producteurs de bois tropical au monde. La production forestière du Cameroun a triplé en 22 ans, passant de 1,2 millions de mètres cube en 1975 à 3,0 millions de mètres cube en 1997 ; 60% des espèces arbres sont menacées de disparition ; plusieurs espèces d'animaux dont le rhinocéros noir et le chimpanzé sont menacées d'extinction .

Au Cameroun, on compte plus de 300 essences forestières (souvent, une même essence porte plusieurs noms) dont une soixantaine pouvant servir comme bois de structure y est exploitée actuellement (Tableau 1.2). Mais les rythmes d'exploitation sont très inégalement répartis entre les différentes essences. Six d'elles (ayous, iroko, sapelli, tali, fraké et azobé) représentent environ 84% de volume d'abattage chaque année (Tableau 1.3 et Figure 1.4).

Tableau 1.2: Liste des essences couramment commercialisées au Cameroun.

Numéro d'identification	Nom botanique de l'essence		Famille des	Appellation commerciale
	Genre	Espèce		
1	<i>Azelia</i>	<i>bidinensis; pachyloba</i>	CESALPINIACEES	DOUSSIE
2	<i>Albizia</i>	<i>adanthifolia</i>	MIMOSACEES	ESSAK
3	<i>Albizia</i>	<i>frruginea</i>	MIMOSACEES	IATANDZA
4	<i>Amphimas</i>	<i>pterocarpoides</i>	CESALPINIACEES	LATI
5	<i>Aningeria</i>	<i>robusta; altissima</i>	SAPOTACEES	ANIEGRE
6	<i>Anopyxis</i>	<i>klaineana</i>	RHIZOPHORACEES	BODIOA
7	<i>Antiaris</i>	<i>aficana</i>	MORACEES	AKO
8	<i>Anthothona</i>	<i>fragrans</i>	CESALPINIACEES	KIBAKOKO
9	<i>Antrocaryon</i>	<i>klaineum</i>	ANACARDIACEES	ONZABILI
10	<i>Autrenella</i>	<i>congolensis</i>	SAPOTACEES	MUKULUNGU
11	<i>Baillonella</i>	<i>toxisperma</i>	SAPOTACEES	MOABI
12	<i>Berlinia</i>	<i>bracteosa</i>	CESALPINIACEES	EBIARA
13	<i>Brachystegia</i>	<i>cynometroides</i>	CESALPINIACEES	NAGA
14	<i>Celtis</i>	<i>tessmannii</i>	ULMACEES	DIANIA
15	<i>Chlorophora (Milicia)</i>	<i>excelsa</i>	MORACEES	IROKO
16	<i>Cordia</i>	<i>platyrysa</i>	BORAGINACEES	MUKUMARI
17	<i>Cylicodiscus</i>	<i>gabunensis</i>	MIMOSACEES	OKAN
18	<i>Cynometra</i>	<i>hankei</i>	CESALPINIACEES	NGANGA
19	<i>Dacryodes</i>	<i>buetneri</i>	BURSERACEES	IGAGANGA
20	<i>Desbordesia</i>	<i>glaucescens</i>	IRVINGIACEES	ALEP
21	<i>Deterium</i>	<i>macrocarpum</i>	CESALPINIACEES	AMOUK
22	<i>Distemonanthus</i>	<i>benthamianus</i>	CESALPINIACEES	MOVINGUI
23	<i>Entandrophragma</i>	<i>cylindricum</i>	MELIACEES	SAPELLI
24	<i>Entandrophragma</i>	<i>utile</i>	MELIACEES	SIPO
25	<i>Eribroma</i>	<i>oblonga</i>	STERCULIACEES	EYONG
26	<i>Erythrophleum</i>	<i>ivorense ;suaveolens</i>	CESALPINIACEES	TALI
27	<i>Erythroxylum</i>	<i>mannie</i>	ERYTHROXYLACEES	LANDA
28	<i>Fagara</i>	<i>Heitzii</i>	RUTACEES	OLON
29	<i>Gosswailerodendron</i>	<i>balsamiferum</i>	CESALPINIACEES	AGBA
30	<i>Guarea</i>	<i>cedrata</i>	MELIACEES	BOSSE CLAIR
31	<i>Guibourtia</i>	<i>tessmannii; demousei</i>	CESALPINIACEES	BUBINGA
32	<i>Khaya</i>	<i>ivorensis</i>	MELIACEES	ACAJOU/ NGOLLON
33	<i>Klainedoxa</i>	<i>gabonensis</i>	IRVINGIACEES	EVEUSS
34	<i>Lophira</i>	<i>alata</i>	OCHNACEES	AZOBE
35	<i>Lovoa</i>	<i>trichilioides</i>	MELIACEES	BIBOLO/ DIBETOU
36	<i>Mammea</i>	<i>africana</i>	GUTTIFERES	OBOTO
37	<i>Mansonia</i>	<i>altissima</i>	STERCULIACEES	BETE
38	<i>Maranthes</i>	<i>glabra</i>	CHRYSOBALANACEES	ASILA OMANG
39	<i>Microberlinia</i>	<i>bisulcata</i>	CESALPINIACEES	ZINGANA
40	<i>Milletia</i>	<i>laurentii</i>	PAPILIONACEES	WENGE
41	<i>Morus</i>	<i>mesozygia</i>	MORACEES	DIFOU
42	<i>Nauclea</i>	<i>diderrichii</i>	RUBIACEES	BILINGA
43	<i>Nesogordonia</i>	<i>papaverifera</i>	STERCULIACEES	KOTIBE
44	<i>Ongokea</i>	<i>gore</i>	OLACACEES	ANGUEUK
45	<i>Pericopsis</i>	<i>elata</i>	PAPILIONACEES	AFRORMOSIA
46	<i>Petersianthus</i>	<i>macrocarpus</i>	LECYTHIDACEES	ABALE
47	<i>Piptadeniastrum</i>	<i>africanum</i>	MIMOSACEES	DABEMA
48	<i>Poga</i>	<i>oleosa</i>	RHIZOPHORACEES	OVOGA
49	<i>Pterocarpus</i>	<i>soyauxii; mildbraedii</i>	PAPILIONACEES	PADOUK D'AFRIQUE
50	<i>Pterygota</i>	<i>bequaertii</i>	STERCULIACEES	KOTO
51	<i>Pycnanthus</i>	<i>angolensis</i>	MYRISTICACEES	ILOMBA
52	<i>Staudtia</i>	<i>kamerunensis</i>	MYRISTICACEES	NIOVE
53	<i>Sterculia</i>	<i>rhinopetala</i>	STERCULIACEES	NKANANG
54	<i>Terminalia</i>	<i>ivorensis</i>	COMBRETACEES	FRAMIRE
55	<i>Terminalia</i>	<i>superba</i>	COMBRETACEES	FRAKE
56	<i>Tetraberlinia</i>	<i>bifoliolate</i>	CESALPINIACEES	EKABA
57	<i>Tieghemella</i>	<i>africana</i>	SAPOTACEES	DOUKA/ MAKORE
58	<i>Triplochiton</i>	<i>scleroxylon</i>	STERCULIACEES	AYOUS

Tableau 1.3: Statistiques des volumes d'exportation des essences bois au port de Douala (Cameroun) entre juillet 2001 et juin 2002 par ordre d'importance (D'après ATIBT, 2003).

NOM DE L'ESSENCE	VOLUME EXPORTÉ (m ³)	POURCENTAGE	POURCENTAGES CUMULES
AYOUS	440618	40,53%	40,53%
TALI	161280	14,83%	55,36%
SAPELLI	123791	11,39%	66,75%
IROKO	73215	6,73%	73,49%
FRAKE	69125	6,36%	79,84%
AZOBE	44520	4,10%	83,94%
PACHYLOBA	23609	2,17%	86,11%
MOVINGUI	17092	1,57%	87,68%
SIPO	12568	1,16%	88,84%
KOSIPO	12232	1,13%	89,96%
MOABI	11198	1,03%	90,99%
ILOMBA	10027	0,92%	91,92%
DOUSSIE	9493	0,87%	92,79%
ACAJOU	8601	0,79%	93,58%
EKOP	8318	0,77%	94,35%
EYONG	8181	0,75%	95,10%
BIBOLO	6817	0,63%	95,73%
BILINGA	6040	0,56%	96,28%
ASSAMELA	5209	0,48%	96,76%
LOTOFA	3756	0,35%	97,11%
OKAN	3301	0,30%	97,41%
BOSSE	3084	0,28%	97,69%
PADOUK	2895	0,27%	97,96%
BUBINGA	2589	0,24%	98,20%
KOTO	2482	0,23%	98,43%
FROMAGER	2317	0,21%	98,64%
TIAMA	1669	0,15%	98,79%
TOLA	1404	0,13%	98,92%
BETE	1113	0,10%	99,02%
KOTIBE	788	0,07%	99,10%
DIANA	525	0,05%	99,14%
EKOUK	464	0,04%	99,19%
MUKULUNGU	368	0,03%	99,22%
NIOVE	361	0,03%	99,25%
WENGE	280	0,03%	99,28%
IATANZA	228	0,02%	99,30%
BAHIA	151	0,01%	99,31%
LATI	127	0,01%	99,33%
EBIARA	126	0,01%	99,34%
ANGONGUI	89	0,01%	99,35%
AMOUK	39	0,00%	99,35%
AUTRE	7071	0,65%	100,00%
TOTAL	1087161	100,00%	

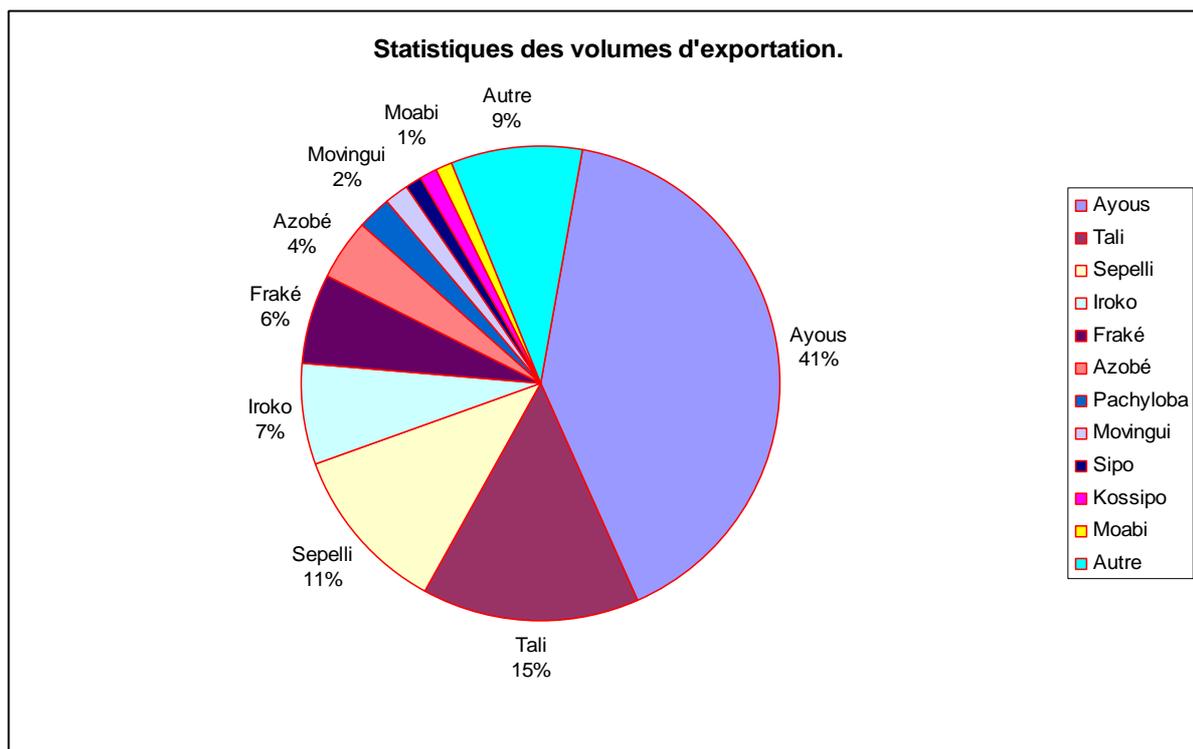


Figure 1.4: Statistiques des volumes d'exportation des essences bois au port de Douala (Cameroun) entre juillet 2001 et juin 2002 (d'après ATIBT, 2003).

Les essences de bois les plus exploitées au Cameroun sont : l'ayous, le tali, le sapelli, l'iroko, le fraké, l'azobé, le pachyloba, le movingui, le sipo, le kossipo et le moabi. Mais la production de bois ne pourra pas se poursuivre au rythme actuel. Les premiers signes d'épuisement sont déjà visibles au Cameroun.

Certains arbres camerounais largement commercialisés sont catalogués comme des espèces « *menacées* ». Il s'agit de l'afroformosa (assamela), l'ébène, le makoré (douka), le mansonnia et le wengé. On attribue ce statut aux essences qui encourent un très grand risque de disparaître sous forme sauvage à court terme. L'acajou, le doussié, l'azobé, le bilinga, le bibolo, le kossipo, le moabi, le niangon, le sapelli et le sipo sont catalogués comme « *vulnérables* », un qualificatif qui désigne une essence courant un risque élevé d'extinction sous forme sauvage à moyen terme (WWF, 1998).

À la veille du second Sommet des Chefs d'État d'Afrique Centrale de Brazzaville en République du Congo (2005), le WWF a rappelé que les deux tiers des forêts du bassin du Congo risquent de disparaître d'ici cinquante ans si l'abattage illégal d'arbres, l'exploitation non durable des forêts et les défrichages pour l'agriculture continuent au rythme actuel.

A n'en pas douter, le bassin du Congo est un patrimoine en danger. Cette triste réalité oblige les mouvements écologiques, par le biais de multiples institutions et organismes, à prôner le « développement durable ».

1.1.5 Le développement durable.

La prise de conscience des enjeux des forêts tropicales du bassin du Congo s'est nettement accélérée avec le Sommet de la Terre de Rio en 1992. Sous la pression des groupes écologistes, la gestion forestière durable est érigée en directive pour le commerce international des bois, et donc des bois tropicaux. En effet, pour concilier le souci légitime de bien-être économique et social, d'amélioration concrète des conditions de vie des populations locales caractérisées par une pression démographique et le maintien de forêts primaires aux cycles économiques longs, le «*développement durable*» est actuellement le *leit motiv* qui préside aux décisions. Il se définit, selon la Commission Brundtland ou Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED, 1987), comme «*le développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs*». Autrement dit, il faut respecter l'équité intragénérationnelle et intergénérationnelle. Le débat sur la gestion forestière durable est relativement jeune en Afrique centrale. Diverses instances développent en ce moment des critères et des indicateurs. Au regard des enjeux multiples et du rôle des forêts tropicales dans la préservation de l'environnement mondial, la communauté internationale demande que leurs mécanismes d'exploitation soient fondés sur le développement durable. Certains concessionnaires tentent de développer une vision à long terme et oeuvrent en faveur de la «*Sustained Yield*» ou récolte durable pour préserver «la poule aux œufs verts». La pression exercée par les ONG et les bailleurs de fonds internationaux a conduit les gouvernements à refondre leurs cadres juridiques et institutionnels, à se doter de cadres d'actions cohérents (programmes nationaux de gestion environnementale, plans d'action forestiers nationaux, etc.) et à adopter progressivement des instruments de planification, de gestion et de surveillance modernes. «Comment utiliser les arbres et les forêts pour améliorer les conditions économiques, environnementales, sociales et culturelles des populations, tout en veillant à la conservation de la ressource afin de satisfaire les besoins des générations à venir?». Telle est l'une des questions les plus importantes, complexes et controversées des temps modernes. S'il a été facile aux pays développés de se lancer dans la gestion durable de leurs massifs forestiers, il n'en est pas de même pour les pays tropicaux pour la plupart en développement. Réduire la déforestation dans les pays du bassin du Congo reste une tâche complexe. Pour l'industrie du bois, une exploitation est durable quand la production de bois peut être contrôlée dans une zone forestière déterminée. Les organisations écologistes interprètent la notion de gestion durable dans un sens plus large : la gestion forestière n'est pas seulement axée sur une récolte durable du bois, mais elle accorde aussi de l'importance aux critères sociaux (conditions de travail, respect des populations indigènes) et écologiques (influence de l'exploitation sur la diversité biologique de la région forestière). Globalement, les différents acteurs du secteur bois, à bon ou à contre cœur, semblent s'aligner sur les exigences de la gestion durable. Des pays producteurs de bois de plus en plus nombreux font donc de gros efforts pour améliorer la gestion forestière. Les engagements substantiels pris lors du premier Sommet, en mars 1999 à Yaoundé, au Cameroun, ont certes permis de générer une importante coopération transfrontalière pour sauvegarder les espèces menacées et de créer des millions d'hectares de nouvelles aires forestières protégées (*Figure 1.5*).

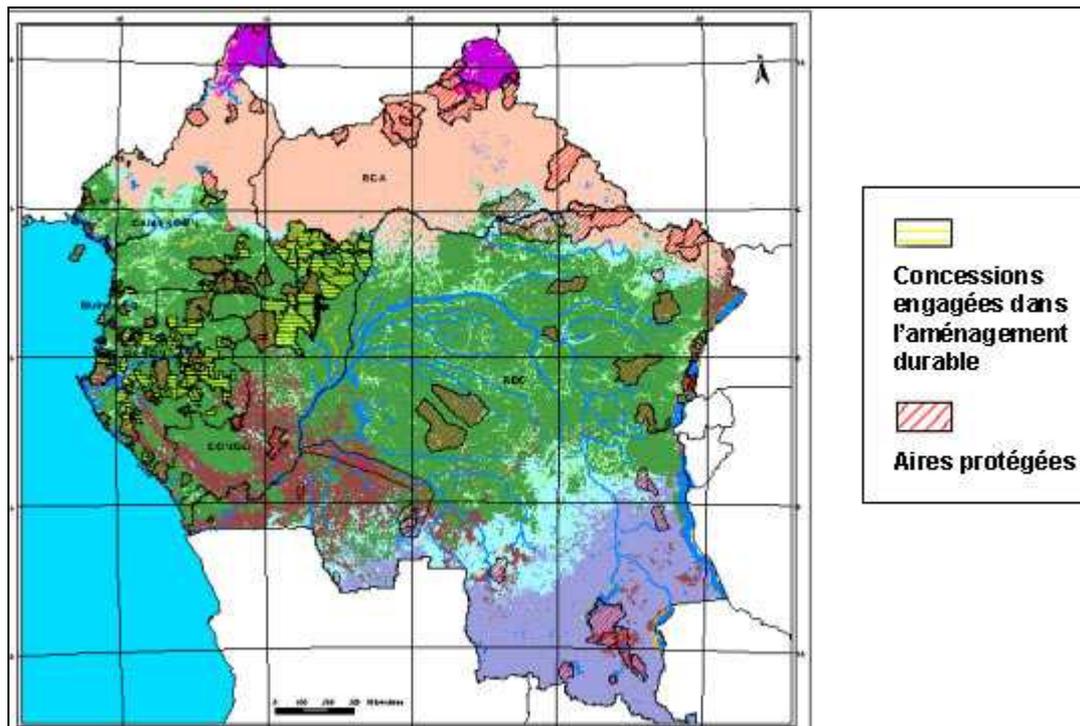


Figure 1.5: Carte de répartition des aires protégées et des concessions forestières en cours d'aménagement dans le bassin du Congo (source ATIBT, 2003).

Mais le WWF estime que les sept pays impliqués, Cameroun, Gabon, République Centrafricaine, République du Congo (Brazzaville), Guinée Équatoriale, Tchad et République Démocratique du Congo, ont encore du pain sur la planche. Pour sauver les forêts du bassin du Congo, la deuxième plus vaste étendue de forêt tropicale du globe après l'Amazonie, le WWF estime qu'il est impératif de prendre de nouvelles mesures courageuses, notamment la mise en place de contrôles frontaliers efficaces, l'adoption d'une bonne gestion des aires protégées, l'amélioration des principes de gouvernance, l'implication plus active de la société civile et des communautés locales, ainsi que la promotion d'une exploitation forestière responsable. Certaines sociétés forestières ont adopté une démarche progressiste en s'engageant à améliorer leurs standards de gestion et à obtenir une certification crédible, telle que le Forest Stewardship Council (FSC) ou Conseil de bonne gestion forestière, certification qui garantit l'équilibre entre les fonctions économiques, écologiques et sociales. Le FSC a été créé pour stimuler une exploitation forestière justifiée sur le plan écologique, social et économique. La certification forestière est un instrument de marché qui vise à promouvoir l'aménagement forestier durable en fonction de facteurs environnementaux, économiques et sociaux. Elle prévoit l'évaluation indépendante de méthodes d'aménagement forestier selon des normes reconnues internationalement (ou nationales), ainsi que la surveillance de la vente de produits forestiers. Si la forêt est aménagée conformément à un ensemble de normes précises et que ses produits ligneux sont surveillés et expliqués à toutes les étapes de la production, elle peut obtenir une certification reconnue sur le marché. Celle-ci a été mise en œuvre pour offrir au consommateur la garantie que le bois qu'il achète provient de forêts bien gérées. Dans le cadre de cette certification, la gestion forestière est contrôlée par une instance indépendante qui se base sur des critères écologiques et sociaux pour certifier que le bois vient d'une forêt gérée durablement. Les exploitations forestières certifiées sous contrôle du FSC réalisent un inventaire détaillé de la forêt, un planning précis et une concertation avec toutes les parties concernées. La coupe du bois s'effectue de manière soignée et la forêt fait l'objet d'une grande attention même après que les arbres aient été abattus. Cette approche

contribue à minimaliser les dommages occasionnés à la forêt et à éviter les conflits sociaux. A terme, elle permet une récolte de bois durable. Le bois produit de cette manière reçoit ensuite le label FSC.

La pléthore d'organismes internationaux qui oeuvrent pour la sauvegarde du bassin du Congo témoigne de l'urgence des actions à poser et de l'intérêt que l'humanité attache à la conservation (c'est-à-dire aux mesures de gestion permettant une utilisation durable des ressources et écosystèmes forestiers, y compris leur protection, entretien, restauration et amélioration) de ce patrimoine. Plusieurs directives à caractère contraignant sont sans cesse signées.

1.1.6 Quelques directives et organismes.

Plus de 20 accords internationaux et 40 organismes intergouvernementaux s'occupent des forêts, selon le constat fait au cours de la session thématique sur la mise en oeuvre des engagements internationaux au XIIe Congrès forestier mondial.

1.1.6.1 Quelques directives.

Déclaration de Yaoundé (1999).

Au niveau sous-régional, les Chefs d'Etat ont tenu un premier Sommet sur les forêts à Yaoundé en 1999, au cours duquel, ils ont adopté une importante Déclaration (Déclaration de Yaoundé) exprimant leur engagement pour la conservation et la gestion durable de leurs écosystèmes forestiers. Il convient de souligner que cette Déclaration a reçu le soutien des Nations Unies, à travers la résolution 54/214 de l'Assemblée générale invitant la Communauté internationale à appuyer la mise en oeuvre des résolutions contenues dans cette Déclaration. Sous l'impulsion de la dynamique générée par la déclaration de Yaoundé, on peut évoquer :

- la révision et l'adoption de nouvelles lois ou codes forestiers par certains Etats (Gabon, Congo, RDC) qui concilient les objectifs de conservation et d'utilisation durable des ressources forestières ;
- l'implication des populations à la gestion des ressources forestières et au partage des bénéfices issus de son exploitation ;
- la création de nouvelles aires protégées dans les pays ;
- la création des aires protégées transfrontalières entre plusieurs Etats de la sous-région ;
- la mise sous aménagement des concessions forestières attribuées aux opérateurs privés.

Traité de Brazzaville (2005).

Au cours de leur deuxième Sommet sur les forêts, à Brazzaville en février 2005, les chefs d'Etat d'Afrique Centrale ont signé un traité régional sur la conservation des forêts dont les programmes seront coordonnés et supervisés par la COMIFAC (Commission des Forêts d'Afrique Centrale). La communauté internationale contribue de manière significative aux efforts des pays d'Afrique Centrale dans le cadre du Partenariat pour les Forêts du Bassin du

Congo, actuellement présidé par la France et la COMIFAC. Ce texte à valeur juridique et contraignante, engage les Etats de la sous-région à inscrire dans leurs priorités nationales, la conservation et la gestion durable des forêts ainsi que la protection de l'environnement. Il met en exergue un certain nombre d'obligations pour les acteurs et les états concernés. A savoir :

- adopter des politiques nationales harmonisées en matière des forêts et accélérer la mise en place des instruments d'aménagement, notamment les systèmes de certification reconnus internationalement, agréés par les Etats d'Afrique centrale et développer les ressources humaines pour leur mise en œuvre. La certification est une mesure coercitive et transparente, s'appuyant sur les engagements existants susceptibles de maîtriser le rythme de déforestation en limitant par exemple les volumes d'exploitation ;
- mettre en place des mesures destinées à concilier les actions en faveur de la conservation et de la gestion durable des écosystèmes forestiers avec les politiques de développement dans d'autres secteurs, notamment le reboisement, les transports et l'agriculture;
- mettre en place dans chaque Etat, des mécanismes durables de financement du développement du secteur forestier à partir des revenus générés par l'activité forestière et la coopération internationale;
- inciter les gouvernements à mettre en oeuvre les actions prioritaires du plan de convergence, à savoir : l'identification des zones prioritaires de conservation, la création de nouvelles aires protégées, l'élaboration et la mise en oeuvre des plans de gestion des aires protégées, l'appropriation par les Etats des processus engagés dans les programmes pilotes;
- développer une fiscalité forestière adéquate et les mesures d'accompagnement nécessaires à sa mise en oeuvre pour soutenir de manière pérenne les efforts de conservation, d'aménagement durable et de recherche sur les écosystèmes forestiers;
- accélérer le processus de création des aires protégées transfrontalières entre les pays d'Afrique centrale et inviter les pays voisins à s'intégrer dans le processus, tout en renforçant la gestion des aires protégées existantes;
- renforcer les actions visant à accroître la consultation et la participation des populations rurales dans la planification et la gestion durable des écosystèmes et réserver des espaces suffisants pour leur développement socio-économique;
- veiller à un plus grand engagement des opérateurs économiques dans le processus de gestion durable et de conservation des écosystèmes forestiers;
- mettre en place des actions concertées en vue d'éradiquer le braconnage et toute autre exploitation non durable dans la sous-région en y associant toutes les parties prenantes, notamment les opérateurs économiques et les populations;
- promouvoir et accélérer le processus d'industrialisation du secteur forestier, et développer des mécanismes adéquats de financement du secteur privé national, en vue de maximiser la valeur ajoutée et de créer des emplois nouveaux et valorisants, tout en veillant à l'utilisation durable des ressources forestières en harmonie avec la possibilité forestière;

- oeuvrer pour l'harmonisation standardisée des documents accompagnant la circulation des produits forestiers et fauniques;
- promouvoir l'organisation des forums nationaux et sous-régionaux d'échanges d'expériences;
- favoriser la mise en place des réseaux liant les institutions pertinentes de recherche et de développement forestier;
- renforcer la coordination ainsi que la coopération entre toutes les organisations nationales et internationales engagées dans les actions et la réflexion sur l'utilisation durable et la conservation des ressources biologiques et des écosystèmes forestiers.

Au chapitre des engagements d'appui financier et technique annoncés à Brazzaville, on peut souligner la décision de l'Italie d'annuler les dettes de onze pays de l'Afrique centrale, d'un montant de 843,615 millions de dollars US environ au profit de l'environnement. Plusieurs organes et processus sous-régionaux ont été mis en place : la Commission des forêts d'Afrique Centrale (COMIFAC) instituée par le Traité de Brazzaville, la Conférence sur les écosystèmes des forêts denses et humides d'Afrique Centrale (CEFDHAC), la Conférence ministérielle sur l'application des lois forestières et la gouvernance en Afrique (AFLEG), etc.

Le Sommet de Johannesburg (2002).

Lors de la deuxième session du Forum des Nations unies sur les Forêts (FNUF), l'Afrique du Sud a lancé l'idée d'une initiative en faveur de la gestion durable des forêts du bassin du Congo. Le 4 septembre 2002 à Johannesburg, les Etats-Unis et l'Afrique du Sud ont officiellement lancé le partenariat pour les forêts du bassin du Congo.

Ce partenariat a pour but d'appuyer un réseau de près de 10 millions d'hectares de parcs nationaux et d'aires protégées efficacement gérées et de près de 20 millions d'hectares de concessions forestières sous aménagement forestier.

Conférence des Parties de la CBD (2002)

La 6ème Conférence des Parties à la Convention sur la Diversité Biologique (CBD) a adopté un programme de travail pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique des forêts.

CIBT (2002)

La 32ème session du Conseil de l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (CIBT, du 13 au 17 mai 2002) a adopté une décision intitulée « Promotion de la gestion durable des forêts du Bassin du Congo ».

1.1.6.2 Quelques institutions et organismes.

Pour l'effectivité de toutes ces directives visant à la gestion durable des forêts du bassin du Congo, plusieurs institutions et organismes sont mis en place. En dresser une liste exhaustive est une ambition démesurée, tant leur nombre s'accroît au fil des temps. Parmi les plus connus, on peut citer certains noms:

- Conférence des Ministres des Forêts de l’Afrique Centrale (COMIFAC) : Instituée par un Traité des Chefs d'Etat (Traité de Brazzaville, février 2005), la COMIFAC est l'institution sous-régionale chargée de coordonner les efforts des acteurs en faveur de la conservation et gestion durable des forêts d'Afrique centrale. Son siège est fixé à Yaoundé (Cameroun) ;
- Conférence sur les Ecosystèmes de Forêts Denses et Humides d’Afrique Centrale (CEFDHAC). Créée en mai 1996, la Conférence sur les Ecosystèmes de Forêts Denses et Humides d’Afrique Centrale (CEFDHAC) ou Processus de Brazzaville est un cadre de concertation et d’échange d’expériences dans le domaine des écosystèmes forestiers, à travers l'articulation de tous les groupes d'acteurs intervenant dans le Bassin du Congo. Son objectif est d'encourager les acteurs de la gestion des forêts dans les pays d'Afrique centrale à conserver leurs écosystèmes forestiers et à veiller à une utilisation durable et équitable des ressources qu'ils recèlent ;
- American Forest & Paper Association ;
- Association Technique Internationale des Bois Tropicaux (ATIBT) ;
- Center for International Forestry Research ;
- CIRAD – forêts ;
- Conservation International ;
- Fonds Français pour l’Environnement Mondial (FFEM) ;
- Forest Trends ;
- Interafrican Forests Industries Association (IFIA) ;
- Jane Goodall Institute ;
- Organisation Africaine des Bois (OAB) ;
- Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT) ;
- Society of American Foresters ;
- Wildlife Conservation Society (WCS) ;
- World Resources Institute ;
- World Wildlife Fund (WWF) ;
- Conservation et utilisation rationnelle des écosystèmes forestiers d'Afrique Centrale (ECOFAC) ;
- Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) ;
- Global Forest Watch ;

- Partenariat pour les Forêts du Bassin du Congo (PFBC) ;
 - Conseil de l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (CIBT);
 - Greenpeace ;
 - Réseau des Aires Protégées d'Afrique Centrale (RAPAC) ;
 - Central African Regional Program for Environment (CARPE) ;
 - Agence Internationale pour le Développement de l'Information Environnementale (ADIE) ;
 - Centre pour l'environnement et le développement (CED) ;
 - Convention sur la Diversité Biologique (CBD);
 - Agence Française de Développement (AFD) ;
 - Food and Agriculture Organisation (FAO) ;
 - Banque Mondiale ;
 - Commission Européenne ;
- etc..

Tous ces organismes travaillent de façon complémentaire pour un seul but : la promotion de la conservation et de la gestion rationnelle des ressources naturelles en général, et du massif forestier en particulier en Afrique centrale. En somme, l'effort de développement forestier des pays du bassin du Congo est considérable. Malgré ces efforts, la déforestation se poursuit. En effet, la FAO continue de relever que : *« alors que dans les pays développés la superficie des forêts s'est stabilisée et serait plutôt en augmentation, la déforestation se poursuit dans les pays en développement, notamment ceux détenteurs des forêts tropicales. Le changement annuel net des superficies forestières en zone tropicale reste le plus élevé du monde »*. Les forêts primaires (c'est-à-dire les forêts sans signes visibles d'activités humaines passées ou présentes) disparaissent à cause de la déforestation. Face au rythme sans précédent de la destruction actuelle de la biodiversité et à la recherche des solutions appropriées, la communauté scientifique a un défi urgent à relever pour sa contribution en faveur de la préservation de la biodiversité du bassin du Congo. Un effort majeur est nécessaire pour découvrir, comprendre, conserver et utiliser durablement la biodiversité. C'est dans cette perspective que ce travail de thèse est mené dans l'espoir d'apporter une humble contribution à la réflexion sur la gestion durable de l'extraordinaire biomasse qu'est le bassin du Congo. En effet, le taux de pertes des forêts lié à la coupe sélective des essences ralentirait considérablement si l'on subordonnait la récolte à la productivité des écosystèmes.

Une bibliographie importante a permis l'élaboration de cette recherche.

1.2 Présentation bibliographique.

1.2.1 Rhéologie du bois : caractéristiques mécaniques.

La description du matériau bois (Tsoumis, 1991) à différentes échelles de structure constitue une base fondamentale permettant de comprendre son comportement mécanique:

- au niveau macroscopique, le bois se présente comme une structure cellulaire orientée où l'on distingue trois directions privilégiées : Longitudinale, Radiale, Tangentielle ;
- au niveau microscopique, la paroi cellulaire se présente selon différentes couches dont chacune joue un rôle différent pour les propriétés mécaniques de la cellule (*Figure 1.6*);
- les principales composantes chimiques de la paroi sont la cellulose (thermodurcissable), l'hémicellulose et la lignine (thermoplastique) inégalement réparties dans les couches de la paroi.

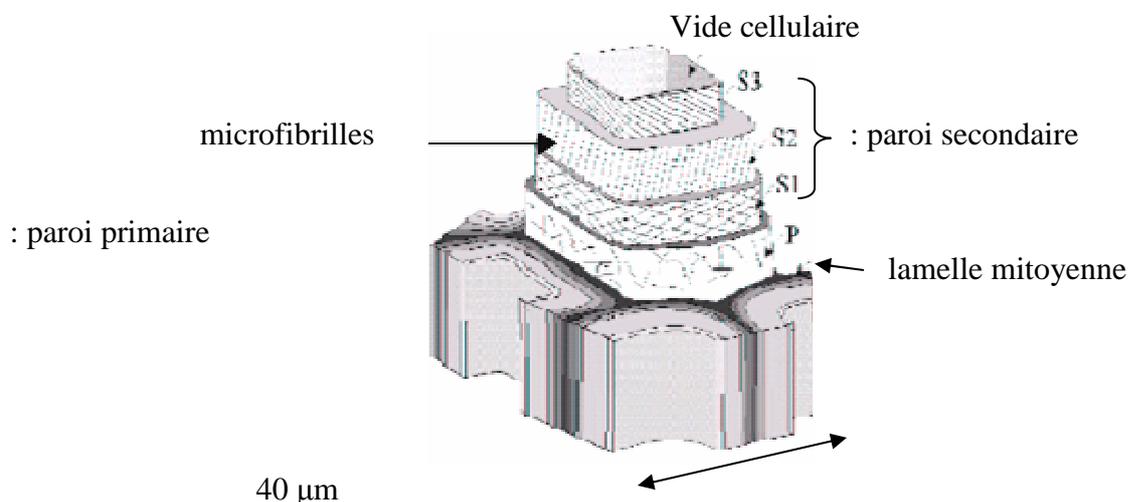


Figure 1.6: Paroi cellulaire schématisée par Tsoumis (1991).

La cellulose et l'hémicellulose sont les éléments prépondérants de la paroi cellulaire. Ces deux éléments sont très hydrophiles. L'eau existe dans le bois sous trois formes : l'eau de constitution faisant partie de la composition moléculaire du matériau, l'eau liée adsorbée par les chaînes celluloses de la paroi cellulaire, l'eau libre retenue dans les cavités cellulaires par les forces capillaires.

Les caractéristiques mécaniques intrinsèques du matériau bois permettent de relier l'état de déformation à l'état de contrainte. Ces propriétés sont fortement tributaires de multiples facteurs externes au premier rang desquels figure l'humidité. Des hypothèses restrictives sont nécessaires pour modéliser le comportement mécanique de ce matériau composite naturel, anisotrope et dont les conditions d'orthotropie ne sont remplies qu'approximativement, comportant des fissures et des noeuds, des défauts de concentricité, une hétérogénéité prononcée entre le cœur et l'aubier, etc.

1.2.1.1 Modélisation de la grume idéale.

La grume idéale est assimilée à un milieu continu, homogène et orthotrope cylindrique. Tout point matériel M est repéré dans le tronc idéal par des coordonnées cylindriques $((r; \theta; z))$ auxquelles sont associées les vecteurs de la base naturelle locale orthonormée $(\vec{R}; \vec{T}; \vec{L})$ suivant les directions radiale, tangentielle et longitudinale respectivement (Figure 1.7).

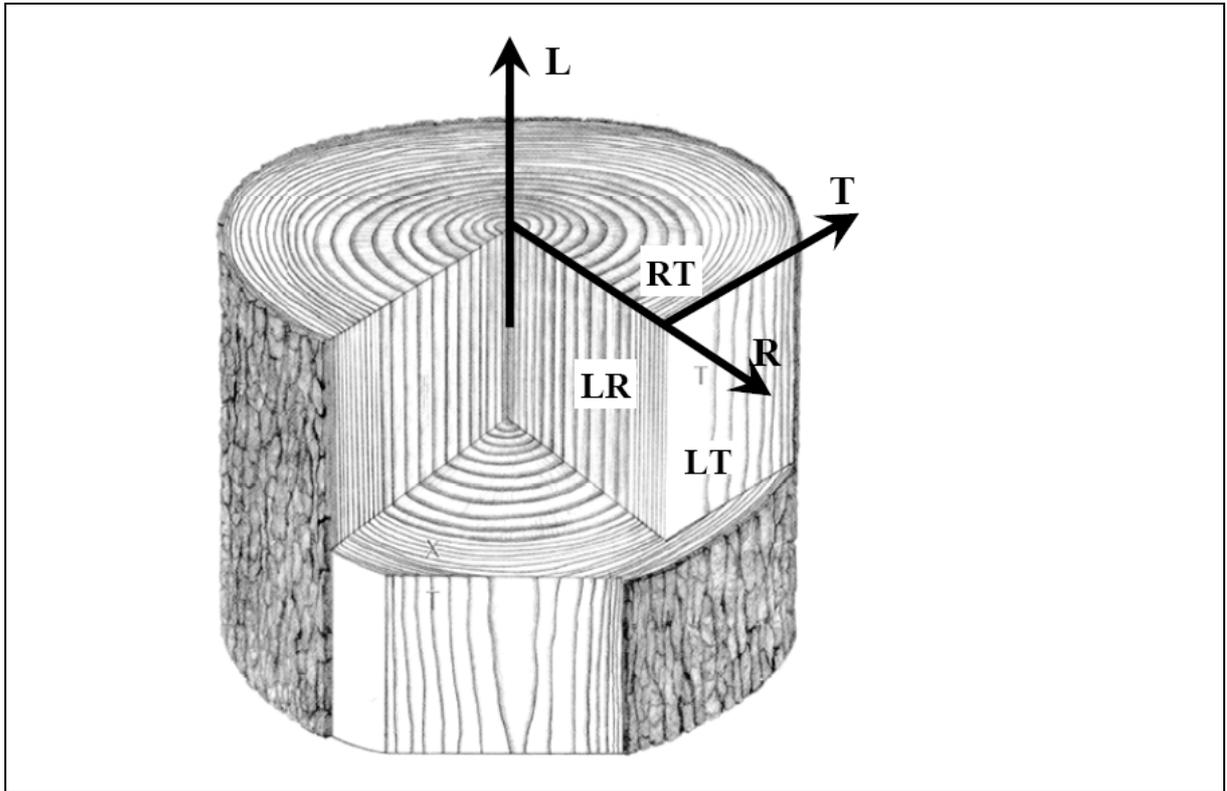


Figure 1.7: La grume idéale.

1.2.1.2 Grandeurs techniques.

On a établi que l'allongement de l'éprouvette est proportionnel à l'effort de traction à l'intérieur de certaines limites. On rend traditionnellement compte de ce genre d'essais par un rhéogramme qui est un graphique contrainte-déformation. La contrainte $\sigma = \frac{F}{S_0}$ est portée en

fonction de la déformation $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$.

On dit que l'essai est parallèle au fil du bois (grain) si l'on suppose que l'éprouvette a été prélevée de telle sorte que son grand axe soit dirigé suivant \vec{L} . Le rhéogramme laisse voir une zone de comportement élastique linéaire qu'on décrit analytiquement par :

$$\sigma = E_L \varepsilon \quad \text{ou} \quad \varepsilon = s_{33} \sigma \quad (1.1)$$

avec $s_{33} = \frac{1}{E_L}$. E_L est le module d'élasticité (MOE) ou module d'Young parallèle au fil du bois et s_{33} est la complaisance élastique parallèle au fil du bois.

Cette simple relation linéaire entre contrainte et déformation fut formulée en 1678 par le savant anglais Robert Hooke et porte son nom à juste titre.

La ruine de l'échantillon intervient pour une contrainte σ_R appelée module de rupture (MOR) ou contrainte de rupture. Lorsque le grand axe de l'éprouvette est dirigé suivant \vec{R} ou suivant \vec{T} , on obtient des valeurs de E_R ou E_T très différentes de E_L et très sensiblement plus faible. Ceci témoigne du caractère fortement anisotrope du matériau bois.

En général, le comportement élastique linéaire d'un matériau quelconque est caractérisé par le tenseur matériel s des complaisances élastiques qui relie l'état des déformations à l'état des contraintes, tenseur du quatrième ordre dont les composantes sont notées s_{ijkl} .

En désignant par ε_{ij} les composantes du tenseur des déformations linéarisé ε et par σ_{kl} les composantes du tenseur des contraintes σ , la notation tensorielle de la loi de comportement élastique s'écrit :

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1.2)$$

avec $i, j, k \in \{1;2;3\}$.

Les $3^4 = 81$ composantes du tenseur des complaisances élastiques ne sont pas linéairement indépendantes.

La symétrie du tenseur des déformations ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$) se traduit par $s_{ijkl} = s_{jikl}$. Ce qui réduit de 81 à 54 le nombre de complaisances indépendantes.

La symétrie du tenseur des contraintes ($\sigma_{kl} = \sigma_{lk}$) se traduit par $s_{ijkl} = s_{ijlk}$. Ce qui réduit de 54 à 36 le nombre de complaisances indépendantes.

L'existence d'un potentiel élastique Φ décrit comme une forme quadratique définie positive des composantes du tenseur des contraintes, ou du tenseur des déformations implique :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \sigma_{ij} \partial \sigma_{kl}} = \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial \sigma_{kl}} = \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1.3)$$

Il en résulte que $s_{ijkl} = s_{klij}$. Ceci réduit de 36 à 21 le nombre des complaisances élastiques nécessaires pour caractériser un matériau anisotrope élastique.

On montre que (Guitard, 1987), dans le cas de l'orthotropie cylindrique, à cause des symétries par rapport aux plans $(\vec{L}; \vec{R})$ et $(\vec{R}; \vec{T})$, le nombre des complaisances linéairement indépendantes est réduit de 21 à 9.

En substituant à la notation tensorielle (4 indices) une notation matricielle (2 indices) au moyen d'une contraction d'indices, la loi de comportement peut s'écrire sous la forme matricielle comme :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

avec la symétrie : $s_{12} = s_{21}$; $s_{13} = s_{31}$ et $s_{23} = s_{32}$.

Cette loi de comportement est transposée directement en terme de grandeurs techniques de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

avec la symétrie, $\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}$; $\frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L}$; $\frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}$.

Les modules d'élasticité ou module d'Young sont :

$$E_R = \frac{1}{s_{11}} ; \quad E_T = \frac{1}{s_{22}} ; \quad E_L = \frac{1}{s_{33}} \quad (1.6)$$

Les modules de cisaillement ou de rigidité sont :

$$G_{TL} = \frac{1}{s_{44}} ; \quad G_{LR} = \frac{1}{s_{55}} ; \quad G_{RT} = \frac{1}{s_{66}} \quad (1.7)$$

Les coefficients de Poisson sont :

$$\nu_{RT} = -\frac{s_{21}}{s_{11}} ; \quad \nu_{TL} = -\frac{s_{32}}{s_{22}} ; \quad \nu_{LR} = -\frac{s_{13}}{s_{33}} ; \quad \nu_{TR} = -\frac{s_{12}}{s_{22}} ; \quad \nu_{LT} = -\frac{s_{23}}{s_{33}} ; \quad \nu_{RL} = -\frac{s_{31}}{s_{11}} \quad (1.8)$$

Il ressort que $\nu_{TR} = \frac{E_T}{E_R} \nu_{RT}$; $\nu_{LT} = \frac{E_L}{E_T} \nu_{TL}$; $\nu_{RL} = \frac{E_R}{E_L} \nu_{LR}$.

Il est souvent utile d'exprimer les contraintes en fonction des déformations ; on utilise alors le tenseur des rigidités élastiques r de composantes r_{ijkl} qui est le tenseur inverse des complaisances élastiques s . Le tenseur des rigidités r possède évidemment les mêmes propriétés de symétrie et l'écriture matricielle de la loi de comportement est :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 & 0 & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 & 0 & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Le matériau bois peut être modélisé comme un matériau idéal, continu, élastique et possédant une orthotropie cylindrique. La loi de comportement fait alors apparaître les 9 complaisances élastiques indépendantes nécessaires pour décrire son comportement. On aboutit ainsi à un ensemble de grandeurs techniques, modules d'Young, modules de cisaillement et coefficient de Poisson, généralement utilisées par l'ingénieur.

Le bois est un assemblage organisé de cellules essentiellement orientées dans la direction longitudinale (axe du tronc de l'arbre). La direction longitudinale est la plus sollicitée dans l'arbre, aussi bien en compression qu'en flexion. Ces contraintes expliquent pourquoi cette direction est beaucoup plus résistante que les deux autres (radiale et tangentielle). Cette préférence se retrouve en analysant les caractéristiques mécaniques dans les trois directions du bois orthotrope. Afin d'illustrer le caractère fortement anisotrope du matériau bois, GUITARD (1987) évoque les ordres de grandeurs respectifs des modules d'Young suivant les trois directions à une humidité de 12% :

- MOE_R = 1800 MPa
- MOE_T = 1000 MPa
- MOE_L = 14000 MPa.

1.2.2 Caractérisation des bois tropicaux.

En 1955, Sallenave publie ses travaux sur les propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'Union française. Plusieurs équipes vont se ruier sur ce domaine pour compléter une base de données alors très insuffisante, les mesures ayant été réalisées avec la technologie de l'époque.

En 1986, l'ATIBT, dans la recherche des voies et moyens d'une meilleure valorisation des bois tropicaux a publié un manuel intitulé « *Atlas des bois tropicaux. Tome 1 – Afrique* ». Dans ce manuel, les investigations s'orientent à peaufiner une nomenclature internationale afin d'éviter toute confusion possible sur le marché international. Cette nomenclature est complétée par les descriptions techniques sur les caractéristiques et les utilisations possibles pour diverses essences. Ici, les valeurs numériques des caractéristiques technologiques « correspondent à des moyennes calculées à partir de plusieurs arbres et de plusieurs éprouvettes par arbre » (ATIBT, 1986). La contrainte de rupture en flexion statique et le module d'élasticité sont obtenus sur des éprouvettes de 4 cm² de section reposant sur deux appuis distants de 28 cm. La charge est appliquée au milieu d'une éprouvette à 12 % d'humidité jusqu'à la rupture pour l'obtention du module de rupture (MOR), le module d'élasticité (MOE) étant calculé pour la phase élastique de flexion caractérisée par la proportionnalité entre la charge et la déformation.

Dans des conditions analogues, une base de données technologiques sur les bois tropicaux intitulée «*Tropical Timbers Database*» a été élaborée en 2001 sous forme de cédérom conçu par International Tropical Timber Organisation (ITTO) appelé aussi Organisation Internationale des Bois Tropicaux sous la forme d'un CD-ROM une base de données.

Les recherches les plus récentes sont celles du département forestier du CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). Cet organisme a conçu, en 2004, un cédérom intitulé «*Tropix 5.0*» à partir de sa base de données qui regroupe l'ensemble des résultats d'essais de caractérisation menés par ses laboratoires et son centre d'usinage. On y trouve, pour chaque essence répertoriée, la description macroscopique et l'aspect du bois, les principales propriétés physiques et mécaniques, le comportement durant les opérations de transformation et de mise en œuvre, les utilisations effectives ou potentielles. Les valeurs numériques des propriétés mécaniques sont obtenues sur des éprouvettes de dimensions 34 x 2 x 2 cm³ suivant la norme française NF B 51 – 002.

L'état actuel de la recherche sur les bois tropicaux en général, et sur ceux du Bassin congolais est très éloquent. Les valeurs bibliographiques correspondent à des moyennes par essence obtenues à partir d'un nombre variable de séries d'essais statiques en flexion quatre points. On peut évoquer quelques insuffisances dont voici les plus pertinentes :

- les propriétés mécaniques des bois sont éminemment variables et les valeurs moyennes bibliographiques ne constituent qu'un premier niveau d'information qui doit être complété par d'autres paramètres (écart-type, quantiles particuliers) lors du calcul des structures notamment ;
- les descriptifs ne sont en aucun cas exhaustifs. Aucune base de données n'est à ce jour complète ;
- les valeurs numériques des caractéristiques technologiques sont tributaires des techniques d'échantillonnage et du protocole expérimental ;
- la qualité du bois (et donc ses propriétés mécaniques essentielles) change en fonction de nombreux paramètres : climatiques, écologiques, sylvicoles et même génétiques. D'où la variabilité des propriétés mécaniques du bois, le rapport entre la plus faible et la plus résistante peut aller de 1 à 10. Pour une essence donnée, on note une variabilité inter-arbres et une variabilité intra-arbres. La caractérisation reste donc une activité continue ;
- l'évolution des matériels et des besoins nécessite une recherche méthodologique permanente sur les protocoles d'essais à mettre au point ou à améliorer.

Nous utiliserons, dans ce travail, une caractérisation basée sur une évaluation non destructive où le module d'élasticité longitudinal est déterminé par l'analyse du spectre des fréquences des vibrations naturelles transverses de l'éprouvette maintenue par des appuis souples.

1.2.3 Le classement des bois.

Plusieurs pays avancés dans la technologie du bois ont développé des règles de classement de leurs essences. La procédure générale de classement est illustrée à la *Figure 1.8*.

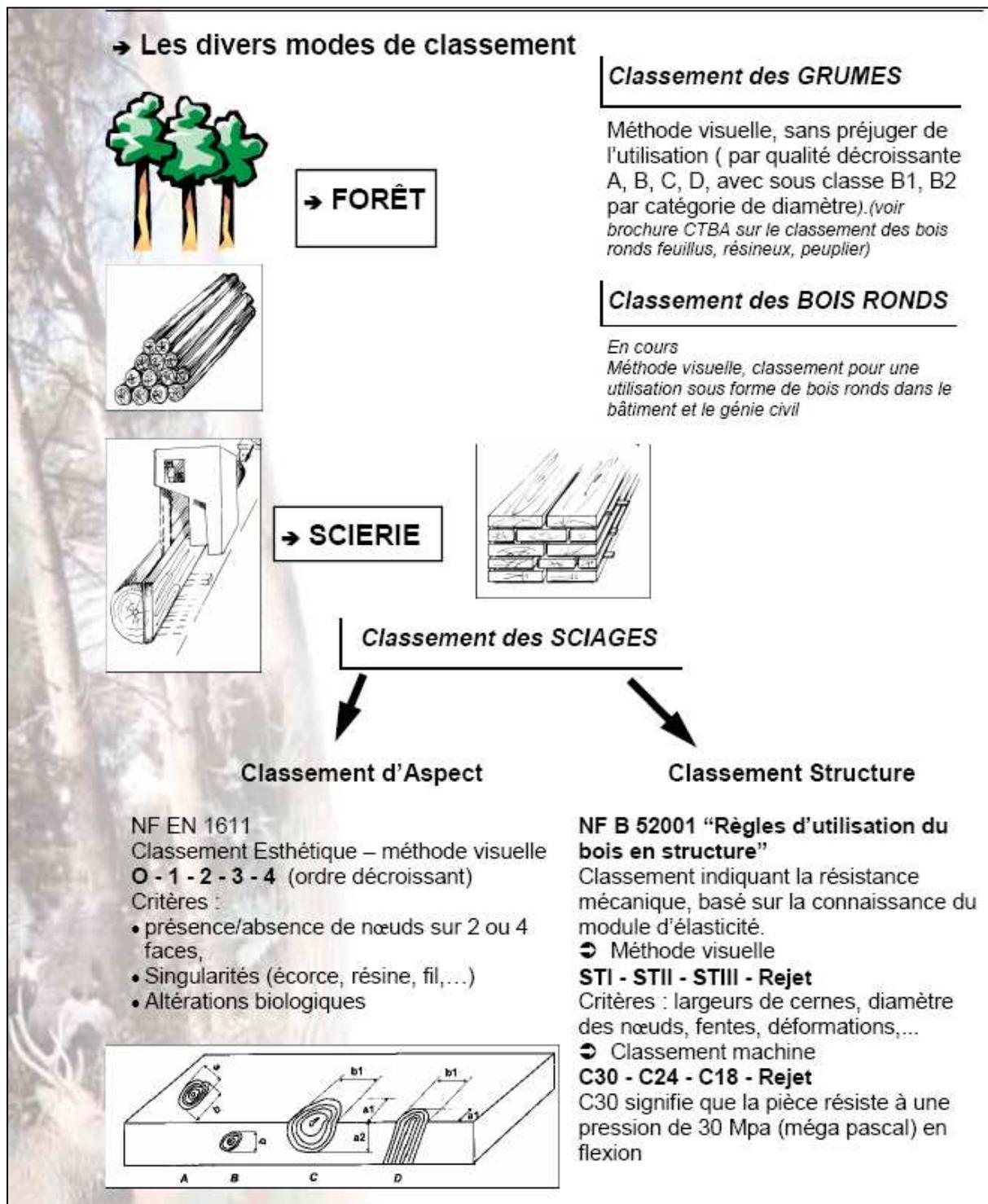


Figure 1.8: Procédure générale de classement des bois.

En France par exemple, on distingue :

- le classement catégoriel : c'est une première approche fondée sur les caractéristiques moyennes des essences. Deux grandes catégories de bois sont distinguées : les bois de France ou indigènes, ou encore bois de pays ; les bois étrangers ou d'importation dans lesquels se distinguent les bois du nord (d'origine russe ou scandinave) et les bois tropicaux. Au sein de chacune de ces catégories, on distingue les bois feuillus et les bois résineux. La densité des bois intervient aussi dans ce classement.

- le classement d'aspect : il répond à des exigences esthétiques et repose sur des critères visuels relatifs à l'aspect des faces et des rives. Ce classement se fait selon les singularités du bois liées à sa structure (noeuds, fils tors. Le noeud étant la singularité principale des bois tempérés, et il est apprécié à la fois en diamètre et en nombre), au débit (flaches), au retrait dû au séchage (gerces, fentes), aux imperfections ou aux altérations (poches de résines, bleuissement, échauffure, pourriture, etc.). Le CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement) définit 6 choix selon les usages, pour les bois résineux (Sapin, Épicéa, Pin maritime, Pin sylvestre, Pin noir, Pin laricio et Douglas).

- le classement mécanique ou structurel : ce classement a pour objectif d'apporter une connaissance plus fine des comportements des bois en terme de résistance. Deux méthodes de classement sont employées : le classement par machine (selon la résistance) qui fait appel à des mesures physiques et mécaniques (chaque pièce subit un essai mécanique non destructif en flexion, associé à une mesure complémentaire des caractéristiques physiques. Les classes de résistance sont différentes suivant les essences. Elles sont désignées par une lettre, C pour les résineux et le peuplier, D pour les feuillus et GL pour le bois lamellé-collé suivie d'un nombre qui correspond à la contrainte de rupture en flexion. Plus le nombre est élevé, meilleure est la résistance du bois) et le classement visuel qui est un classement empirique fondé sur les aspects du bois mais est destiné à définir ses caractéristiques mécaniques (il s'attache aux dimensions maximales de chaque noeud relativement à la section des pièces, à leur position dans cette section et aux déviations de la direction des fibres. Les critères sont liés et dépendent de la structure du bois (cernes d'accroissement, noeuds, fentes, etc.); des altérations biologiques (bleuissement, échauffure, etc.); du débit (taille des flaches); des déformations géométriques (flèches, gauchissement). Le classement visuel distingue les résineux et feuillus. Pour les essences résineuses (Sapin, Épicéa, Pins, peuplier), la norme définit trois catégories de bois de structure : ST-I, ST-II, ST-III, qui correspondent aux classes de résistance C30, C24, C18. Pour les essences feuillues, deux catégories 1 et 2, correspondant respectivement aux classes de résistance D35 et D30.

- Lien avec le classement d'aspect : bien que le classement de structure et le classement d'aspect soient indépendants, il est possible d'établir des correspondances entre les différents classements. Par exemple, les pièces correspondant aux classes C18 et C24 peuvent être issues du choix 2 du classement d'aspect. Pour la classe C30, on peut prendre des pièces dans le choix 0 et éventuellement dans le choix 1.

En Europe notamment, des méthodes visuelles existent pour classer les bois pour leurs usages décoratifs (Norme NF EN 1611) et pour des usages en structure (NF B 52 001). La méthode permet ensuite une correspondance entre ces classes visuelles et les classes de résistances (Norme EN 338) proposés par l'Eurocode 5.

Une démarche pourrait être de voir comment les bois tropicaux s'insèrent dans ces normes. Mais leur spécificité cadre difficilement avec le protocole de ces normes. Pour preuve, un système de classes de résistance intitulé « *Bois de structure – Classes de résistance* » est établi dans la norme EN 338 pour les essences résineuses plus le peuplier (classes référencées par le préfixe C) et pour les feuillus (classes référencées par le préfixe D). Ces classes vont de la plus faible des résineux (C14 ; le fractile 5% de la contrainte à la rupture vaut 14 MPa) à la plus élevée pour les feuillus (D70 ; le fractile 5% de la contrainte à la rupture vaut 70 MPa). Ce classement pénaliserait gravement les bois du bassin du Congo qui sont connus pour leur résistance et leur robustesse.

1.2.4 Méthodes d'évaluation non destructive.

Les techniques de contrôle non destructif permettent l'évaluation du module de rupture des pièces de bois sans altérer celles-ci par un chargement excessif. Les plus connues actuellement, des plus traditionnelles aux modernes sont :

- le contrôle visuel : il est réalisé sur les quatre faces d'une pièce de bois. Il est basé sur une connaissance empirique du matériau bois dont on répertorie les paramètres pénalisant le comportement mécanique. Pour les bois résineux d'Europe particulièrement, les singularités, les pentes de fils, les fentes, la largeur des cernes (qui traduit la vitesse de croissance) et l'état global du bois (attaques éventuelles des champignons et des insectes) sont pris en compte pour estimer la qualité du bois (*Figures 1.9*) c'est le classement structure des bois par la méthode visuelle d'après la norme NF B 52 – 001 de décembre 1998 ;

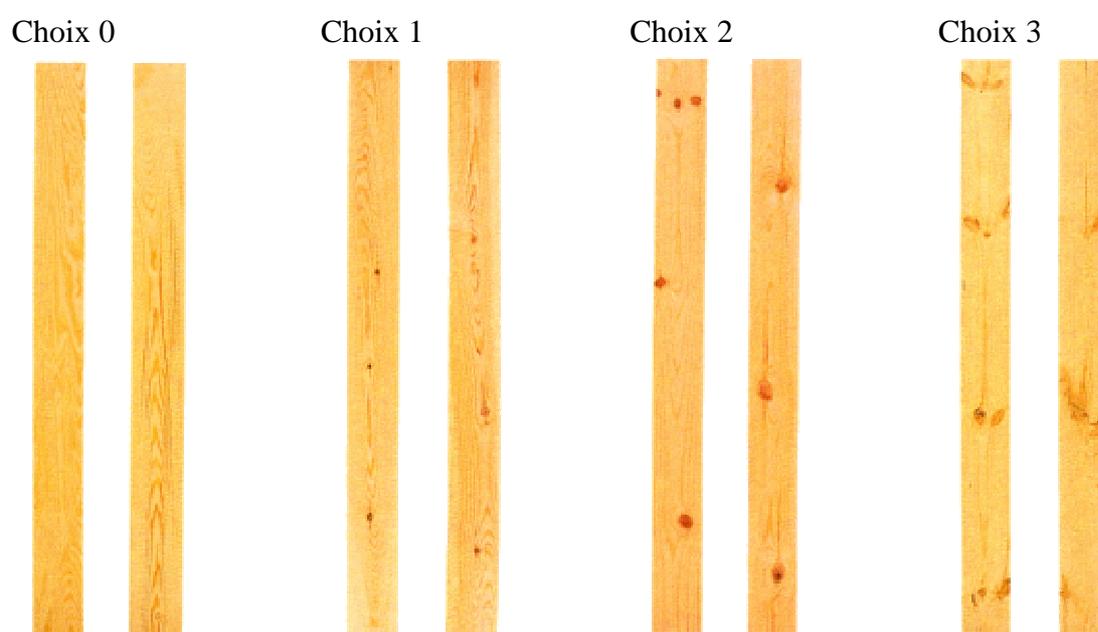


Figure 1.9a : Choix qualitatifs d'aspect du Pin Maritime (Norme NF EN 1611-1)

CLASSES		ST-I	ST-II	ST-III
Essences	Critères			
		Largeur des cernes d'accroissement (mm)		
Sapin-Epicéa-pins		≤ 6	≤ 8	≤ 10
Douglas		≤ 8	≤ 10	≤ 12
		Diamètre de noeuds		
Sapin-Epicéa-Douglas	sur la face ⁽²⁾	$\varnothing \leq 1/6$ de l et ≤ 30 mm	$\varnothing \leq 1/2$ de l et ≤ 50 mm	$\varnothing \leq 3/4$ de l et ≤ 100 mm
	sur la rive	$\varnothing \leq 2/3$ de l' épaisseur de la rive $\varnothing \leq 40$ mm		
pins	sur la face ⁽²⁾	$\varnothing \leq 1/10$ de l et $\varnothing \leq 15$ mm	$\varnothing \leq 1/3$ de l et $\varnothing \leq 50$ mm	$\varnothing \leq 2/3$ de l et $\varnothing \leq 100$ mm
	sur la rive ⁽³⁾	$\varnothing \leq 1/3$ de e et $\varnothing \leq 15$ mm	$\varnothing \leq 1/3$ de e et $\varnothing \leq 30$ mm	$\varnothing \leq 1/2$ de e et $\varnothing \leq 30$ mm

Figure 1.9b : Méthode de classement visuel des bois sciés pour la structure.

Correspondance des classements

Classe de résistance mécanique (EN 338)	Classe visuelle
C 30	ST-I
C 24	ST-II
C 18	ST-III

Figure 1.9c : Correspondance entre classe visuelle et classe de résistance.

- le contrôle par épreuve : les éléments sont soumis à une charge, par exemple $1,2MOR_k$ et sont acceptés s'ils ne sont pas endommagés sous l'effet de celle-ci. Ici, le coefficient 1,2 représente le facteur de sécurité prédéterminé. Si le bois résiste à cette charge d'épreuve sans rupture, sans déformation excessive ou « tout autre signe d'endommagement », il est affecté à la classe spécifiée. La faiblesse de cette méthode est qu'elle ne permet pas un usage rationnel du point de vue technico-économique de la ressource. En effet, si les charges d'épreuve sont faibles, le bois n'est pas utilisé de façon optimale alors que, si elles sont élevées, un fort pourcentage de bois sera endommagé et éliminé ;

- le contrôle par machine : le principe de ces machines consiste à estimer le module d'élasticité par exemple en flexion trois points, qui sera ensuite corrélé au module à la rupture du bois par des modèles de régressions établis pour l'essence étudiée. On mesure la force nécessaire pour une flèche imposée en flexion, on peut contrôler le MOE, et donc estimer le MOR de chaque pièce ; c'est le classement structure des bois par la méthode par machine d'après la norme EN 519 de mars 1998. Dans les machines Cook-Bolinder (Figure 1.10), le module d'élasticité d'un sciage est calculé à partir de la mesure d'une charge pour une flèche imposée. Chaque pièce est passée dans la machine ou dans deux machines afin de compenser la flèche naturelle des sciages (Joyet et al., 2002).

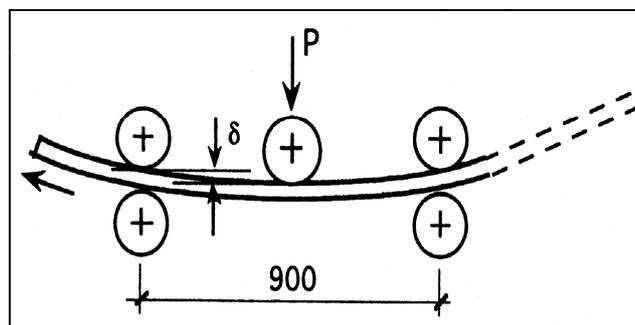


Figure 1.10: Configuration de chargement pour la machine de classement Cook Bolinder.

Les deux appuis sont distants de 500 mm à 1200 mm. On impose une flèche δ de 3 mm dans la partie centrale de l'échantillon et on relève la force requise pour cela. On obtient alors le module élastique local E_{cook} par :

$$E_{cook} = \frac{PL^3}{48I\delta} \quad (1.10)$$

où P est la charge au milieu, L la distance entre les appuis extérieurs, I le moment d'inertie à plat et δ la flèche (Projet de norme prEN 408 de novembre 2000) ;

- le contrôle par ultrasons : on mesure le MOE par propagation d'ondes ;
- le contrôle par méthodes vibratoires.

Les méthodes vibratoires sont des essais d'évaluation non destructive basées sur l'analyse spectrale des vibrations naturelles d'un matériau donné après un impact.

Le module d'élasticité (MOE) longitudinal peut être déterminé par l'analyse du spectre des fréquences des vibrations naturelles de flexion ou de compression d'une poutre « flottante » (vibrations « libre-libre »). Partant de ce dernier, un modèle mathématique classique permet, par une corrélation, de remonter au module de rupture (MOR). Le but est de rechercher un prédicteur, une estimation de la résistance par rapport à la valeur caractéristique effective, pour pouvoir garantir un niveau de qualité minimum. En effet, dans le cas des matériaux élastiques ou viscoélastiques linéaires dont le mouvement peut être décrit par une équation différentielle à coefficients constants, toute vibration naturelle peut se décomposer en une combinaison linéaire de mouvements harmoniques, caractérisés par leur fréquence propre.

Pour un matériau donné, l'analyse spectrale d'un mouvement naturel permet d'en déterminer simultanément plusieurs fréquences propres.

La transformée de Fourier du signal temporel dans le domaine fréquentiel montre des pics du spectre correspondant aux modes propres de vibration du matériau.

Le $k^{ième}$ mode de vibration est caractérisé par :

- sa fréquence propre f_k ,
- son allure caractéristique,
- son amplitude et
- son coefficient d'amortissement.

Les méthodes vibratoires ont été utilisées avec succès par de nombreux auteurs (Atherton (1976) ; Bodig (1982) et Morris, 1994) pour déterminer les caractéristiques élastiques du bois massif. L'emploi de cette technique permet l'évaluation des modules élastiques des poutres de structure, sans altérer celles-ci par un chargement qui pourrait leur causer un dommage. Larsson et al. (1997) ont montré que la méthode vibratoire est un outil de mesure du MOE intéressant pour les poutres de dimensions structurales. En effet, une comparaison des mesures obtenues sur 530 échantillons d'*épicea* a montré un coefficient de régression R^2 supérieur à 0,8 (Figure 1.11)

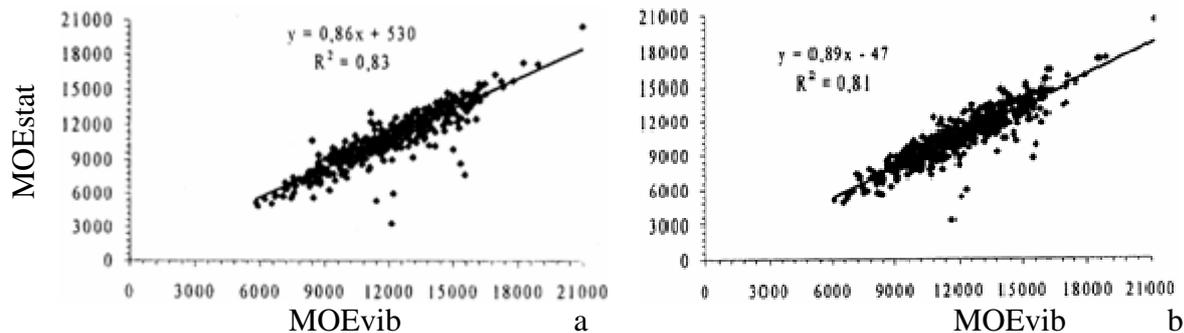


Figure 1.11: Module statique MOE_{stat} en fonction de la même grandeur déterminée par la méthode vibratoire. (Larsson et al., 1997)

a : vibrations de flexion sur chant,

b : vibrations longitudinales

La méthode vibratoire a été étudiée récemment au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (LRBB) notamment dans les travaux de thèse par Casagrande (1998) et Pommier (2006). La vraisemblance des résultats estimés par la méthode vibratoire et ceux obtenus à partir des tests normalisés a été démontrée avec succès (Casagrande, 1998). La méthode vibratoire est simple à mettre en œuvre et présente une reproductibilité des résultats.

1.2.5 Considérations théoriques des méthodes vibratoires.

Dans le cas des matériaux élastiques ou viscoélastiques linéaires dont le mouvement peut être décrit par une équation différentielle à coefficients constants, toute vibration naturelle peut se décomposer en une combinaison linéaire de mouvements harmoniques, caractérisés par leur fréquence propre.

Les modèles mécaniques unidimensionnels classiques de vibrations longitudinales ou transversales des poutres considèrent le matériau en vibration comme étant élastique et homogène (Bernoulli, 1748 ; Timoshenko, 1921). Ils se sont largement développés sur la base des travaux de Bordonné (1989).

Ces techniques d'analyse dynamique des matériaux sont basées sur une approche théorique unidimensionnelle d'une poutre en vibration.

1.2.5.1 Définition géométrique et hypothèses des modèles classiques en dynamique des poutres.

La mise en équation des mouvements de vibrations transversales est le plus souvent développée à partir de la théorie classique de la Résistance Des Matériaux (RDM).

Chaque mode de vibration (Figure 1.12) est caractérisé par sa fréquence propre f_k , son allure caractéristique, ses amplitudes et son coefficient d'amortissement.

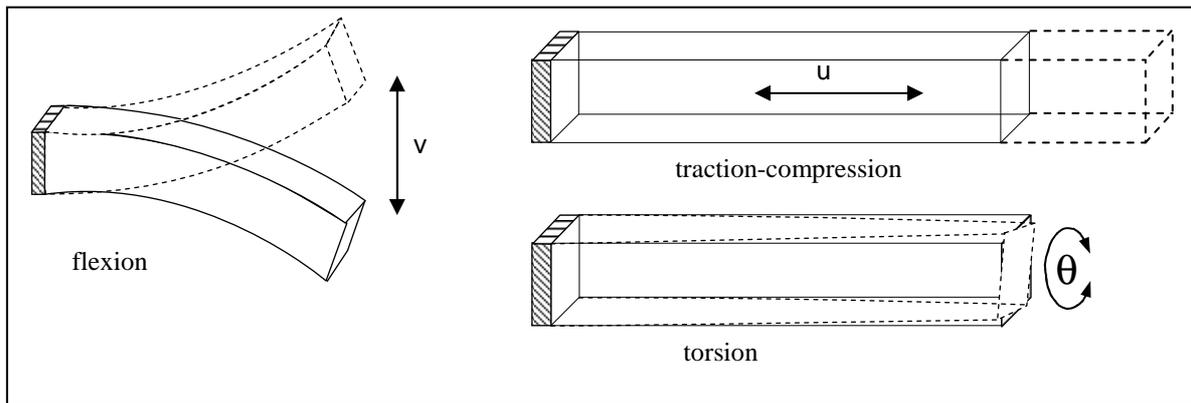


Figure 1.12: Allure des différents types de vibrations (Casagrande, 1998).

L'analyse vibratoire permet de mesurer un grand nombre de paramètres (fréquences de vibration, amortissement, énergie) pour différentes sollicitations (vibrations de flexion à plat, sur chant, de torsion, axiales).

Considérons une poutre prismatique pleine, limitée par les sections extrêmes S_0 et S_L et rapportée au repère principal orthonormé $(G_0, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ de S_0 où \vec{i} est un vecteur directeur de l'axe (G_0X) , \vec{j} un vecteur directeur de l'axe (G_0Y) et \vec{k} un vecteur directeur de l'axe (G_0Z) . On note S_x la section droite d'abscisse x et de centre de gravité G_x . La ligne neutre (G_0G_L) , trace de la surface dans laquelle les fibres ne subissent aucune déformation pendant la flexion, est confondue avec l'axe (G_0X) . La longueur totale de la poutre est notée L , la hauteur h et l'épaisseur des sections droites e (Figure 1.13)

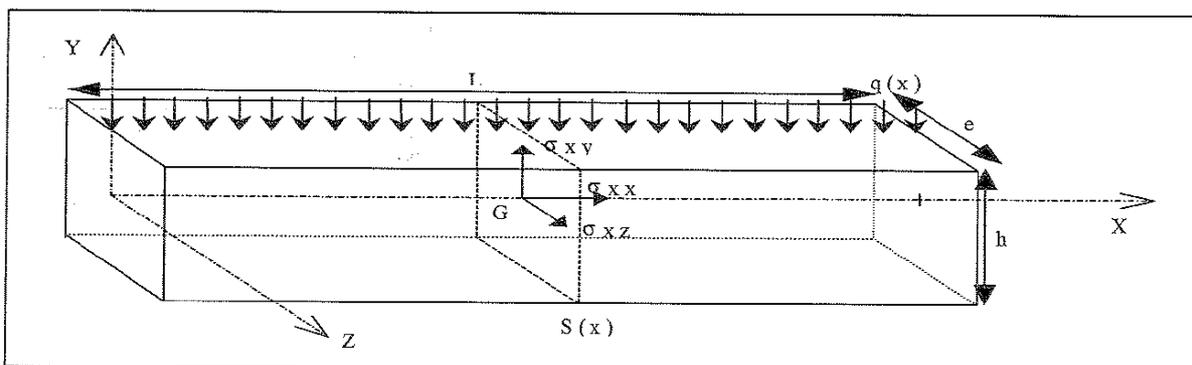


Figure 1.13: Schéma d'une éprouvette, définition géométrique.

Cinq hypothèses de base président à la théorie de la dynamique des poutres (Kerguignas et Caignaert, 1977).

Hypothèse 1 : Hypothèse de Bernoulli.

On admet que toute section transversale de la poutre, initialement plane, reste plane et normale aux fibres longitudinales de la poutre à tout instant pendant la flexion ou la compression.

Il s'en suit que durant la flexion, deux sections voisines tournent l'une par rapport à l'autre autour d'axes perpendiculaires au plan de flexion. Ainsi, les fibres longitudinales sur la face convexe subissent une tension tandis que celles de la face concave sont en compression.

Hypothèse 2 : Homogénéité du matériau.

Cette hypothèse est très restrictive. A la vérité, le matériau bois est hétérogène au double point de vue macroscopique et microscopique, fortement anisotrope et dont les conditions d'orthotropie généralement admises sont souvent assez mal remplies. Tenir compte de ce comportement réel conduirait à des équations aux dérivées partielles extrêmement déconcertantes. D'où l'intérêt de cette hypothèse simplificatrice dont la justification se trouve dans le mode de sollicitation.

Hypothèse 3 : Elasticité linéaire.

Le matériau est utilisé dans le domaine élastique linéaire ; ce qui se traduit par la loi de Hooke pour la relation contrainte-déformation.

Hypothèse 4 : Géométrie des poutres.

Le rayon de courbure de la fibre moyenne R_c est très grand par rapport aux dimensions des sections droites. On admet que R_c est plus grand que 20 fois la plus grande dimension entre l'épaisseur e et la hauteur h ($R_c > 20*e$ et $R_c > 20*h$).

La longueur L de la fibre moyenne est très grande devant les dimensions des sections droites. On admet que L est plus grande que 20 fois la plus grande dimension entre l'épaisseur e et la hauteur h ($L > 20*e$ et $L > 20*h$).

Hypothèse 5 : Hypothèse de Barré de Saint-Venant.

Les résultats fournis ne s'appliquent valablement qu'à une distance d suffisamment éloignée de la région d'application des efforts intenses. En pratique, on admet que $d > 3*e$.

Dans le cas d'un corps parfaitement élastique, l'énergie de vibration que la poutre possède à un instant donné, n'est supposée se dissiper qu'au travers de ses frontières :

- par transfert d'énergie à l'atmosphère, au voisinage de la poutre (émission sonore) ; transfert qui peut permettre l'utilisation d'un microphone pour la détermination des fréquences propres.

- par interaction avec les appuis (frottements), inévitable même si on fait tout pour justifier l'appellation de poutre flottante. Pour minimiser ces interactions, il est recommandé de faire coïncider les appuis avec les nœuds de vibration.

Dans les corps réels, il y a une troisième cause de dissipation que l'on désigne par frottements intérieurs. Dans les polymères, ces frottements sont les causes prépondérantes de

l'amortissement des vibrations. Dans le cas de matériaux à comportement viscoélastique linéaire, l'amplitude de la vibration est exponentiellement amortie.

1.2.5.2 Description et équation du mouvement.

La vibration est produite par une percussion latérale (vibration en flexion) ou longitudinale (vibration en compression) à une des extrémités d'une poutre « flottante ». La poutre vibre ensuite librement. Les amplitudes des mouvements de vibration sont maximums pour la vibration en flexion (Sobué, 1986).

Les sollicitations auxquelles la poutre est soumise sont symétriques par rapport au plan (G_0XY) ; le mouvement s'inscrit donc dans ce plan. Dans cette situation, les paramètres cinématiques nécessaires et suffisants pour décrire le mouvement sont les deux coordonnées du vecteur déplacement du centre de gravité d'une section droite S_x et la rotation par rapport à l'axe (G_0Z) de cette section.

$$\text{Vecteur déplacement } \vec{d}_G \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \end{bmatrix}; \text{ Vecteur rotation } r_{S_x} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta \end{bmatrix}.$$

Pour les équations du mouvement, on considère une tranche de poutre de longueur infinitésimale dx (Figure 1.14), compte tenu de la symétrie du problème.

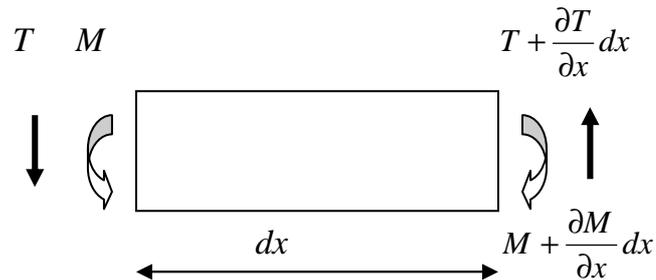


Figure 1.14: Equilibre transverse d'un élément de poutre

Forces extérieures : $d\vec{f}$ et $d\vec{P}$.

La force élastique $d\vec{f} = kvdx \vec{j}$.

Le poids propre $d\vec{P} = -\rho Sgdx \vec{j}$. En valeur algébrique, $dP = -\rho Sgdx$.

En situation de flottation, $d\vec{f} + d\vec{P} = \vec{0}$.

Forces de cohésion : Effort normal \vec{N} dans la direction \vec{i} ; Effort tranchant \vec{T} dans la direction \vec{j} ; Moment de flexion \vec{M}_Z autour de l'axe (G_0Z) .

Equilibre de translation :

D'après le théorème du centre d'inertie appliqué à la tranche de poutre,

$$\sum \vec{F}_{ext}(G) = dm \vec{a}_G \quad (1.11)$$

où $dm = \rho S dx$ est la masse du tronçon infinitésimal de poutre et $\vec{a}_G = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ 0 \end{bmatrix}$ le vecteur

accélération du centre de gravité G dudit tronçon.

Les projections de la relation (1) sur les axes $(G_0 X)$ et $(G_0 Y)$ respectivement, donne :

$$N(x+dx) - N(x) = \rho S dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Rightarrow \frac{\partial N}{\partial x} = \rho S \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.12)$$

$$T(x+dx) - T(x) - \rho S g dx + kv dx = \rho S dx \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = \rho S \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (1.13)$$

puisque $-\rho S g dx + kv dx = 0$.

Equilibre de rotation :

Le théorème du moment cinétique appliqué en $G_{(x+dx)}$ donne :

$$\sum \vec{M}_{G(x+dx)} = J_{G(x+dx)} \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} \text{ avec } J_{G(x+dx)} = \iint y^2 dm \quad (1.14)$$

D'où,

$$M(x+dx) - M(x) + T(x) dx + \frac{1}{2} \rho S g dx^2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} \iint y^2 \rho dx dy dz \quad (1.15)$$

Car, les autres forces ont leur droite d'action qui rencontre l'axe de rotation et le moment qu'elles développent est par conséquent nul.

Par ailleurs, le moment d'inertie I_{GZ} de la section $S_{x+\frac{dx}{2}}$ est donné par :

$$I_{GZ} = \iint y^2 dy dz \quad (1.16)$$

Des équations (1.15) et (1.16), il vient :

$$M(x+dx) - M(x) + T(x) dx + \frac{1}{2} \rho S g dx^2 - \frac{1}{2} kv dx^2 = \rho I_{GZ} \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} dx \Rightarrow \frac{\partial M}{\partial x} + T = \rho I_{GZ} \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} \quad (1.17)$$

En effet, le terme infinitésimal d'ordre 2 dx^2 est négligeable.

En bref, l'équilibre des efforts et des moments appliqués à la tranche de poutre susmentionnée conduit aux équations aux dérivées partielles (1.12), (1.13) et (1.17) où N est l'effort normal, T l'effort tranchant, M le moment fléchissant, β la rotation due au moment fléchissant, I_{GZ} le

moment d'inertie de la section $S_{x+\frac{dx}{2}}$, S l'aire de ladite section, ρ la masse volumique d'une tranche de poutre.

Par ailleurs, l'effort normal se déduit de la loi de Hooke par (Kerguignas et Caignaert, 1977) :

$$\frac{N}{S} = E_x \frac{\partial u}{\partial x} \quad \Rightarrow \quad N = E_x S \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.18)$$

L'expression de l'effort tranchant découle de l'étude de l'énergie de déformation (Timoshenko, 1953; Laroze, 1988) en utilisant la distribution parabolique classique de la contrainte de cisaillement G_{xy} dans la section $S_{x+\frac{dx}{2}}$ (Kerguignas et Caignaert, 1977).

$$T = KSG_{xy} \gamma \quad (1.19)$$

où K est un coefficient qui dépend de la géométrie de la section (pour une section rectangulaire par exemple, $K = \frac{5}{6}$) et γ l'angle de déformation dû au cisaillement.

La relation entre les angles β et γ est donnée par l'équation suivante (Timoshenko, 1921) :

$$\beta = \theta - \gamma \quad (1.20)$$

avec $\theta = \frac{\partial v}{\partial x}$: déviation de la fibre neutre ;

γ : déviation de cisaillement ;

β : déviation de la section droite.

L'étude de la déformation de la fibre neutre en flexion donne (Kerguignas et Caignaert, 1977),

$$M = E_x I_{GZ} \frac{\partial \beta}{\partial x} \quad (1.21)$$

1.2.5.3 Module d'élasticité en vibrations longitudinales (ou vibrations en compression).

En faisant l'hypothèse que E_x , I_{GZ} , et S sont constants le long de la poutre, par élimination de N dans l'équation aux dérivées partielles (1.12) au moyen de la relation (1.18), il vient :

$$E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1.22)$$

C'est l'équation différentielle de vibrations longitudinales (ou vibrations en compression) d'une poutre flottante (c'est-à-dire en négligeant l'influence des supports élastiques).

Les solutions de cette équation sont des fonctions u à deux variables définies par :

$$u(x;t) = F(x) \cos(2\pi f_k t + \varphi) \quad (1.23)$$

où $u(x;t)$ est la somme des solutions $u_k(x;t)$.

La vitesse de propagation V_x d'une onde sinusoïdale se propageant dans la direction $(G_0 X)$ (Kolsky, 1953) est la racine carrée du module spécifique.

$$V_x = \sqrt{\frac{E_x}{\rho}} \quad (1.24)$$

On montre que (Brancheriau, 2002) :

$$F(x) = C_1 \cos\left(\frac{2\pi f_k}{V_x} x\right) + C_2 \sin\left(\frac{2\pi f_k}{V_x} x\right) \quad (1.25)$$

A chaque extrémité de la poutre, l'effort normal est nul à chaque instant.

$$N(0 ; t) = N(L ; t) = 0 \quad (1.26)$$

Ces conditions aux limites imposent que $C_2 = 0$ et permettent de conjecturer les fréquences propres de vibration.

$$\frac{\partial u}{\partial x}(L; t) = 0 \Rightarrow \sin\left(\frac{2\pi f_k}{V_x} L\right) = 0 \Rightarrow f_k = \frac{k}{2L} V_x \quad ; \quad k \in N^* \quad (1.27)$$

En élevant cette expression au carré, on obtient :

$$f_k^2 = \frac{k^2}{4L^2} \frac{E_x}{\rho} \quad (1.28)$$

Par conséquent, connaissant la fréquence propre de vibration f_k et son rang associé k , il est possible d'évaluer la valeur du module d'élasticité E_x .

$$E_x = 4\rho L^2 \frac{f_k^2}{k} \quad (1.29)$$

1.2.5.4 Module d'élasticité en vibrations transversales (ou vibrations en flexion).

En faisant l'hypothèse que E_x , I_{GZ} , G_{XY} et S sont constants le long de la poutre, et par élimination de T et M dans les équations aux dérivées partielles (1.13) et (1.17) au moyen des relations (1.19) et (1.21), il vient :

$$E_x I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \left[1 + \left(\frac{E_x}{K G_{XY}} \right) \right] \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \left(\frac{\rho^2 I_{GZ}}{K G_{XY}} \right) \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + \rho S \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (1.30)$$

C'est l'équation différentielle de vibrations transversales (ou vibrations en flexion) d'une poutre flottante (c'est-à-dire en négligeant l'influence des supports élastiques).

Les différentes modélisations (dont certaines sont d'une complexité qui rend leur application laborieuse) se particularisent par la prise en compte ou non, d'effets qui sont secondaires dans le cas d'éprouvettes à très grand élancement ($\frac{L}{h} \gg 1$) mais deviennent non négligeables lorsque l'élancement diminue ou lorsque des modules de rang élevé sont à prendre en compte.

1.2.5.4.1 *Modèle et solution de Bernoulli.*

Le modèle de Bernoulli et la solution qui en découle sont basés sur trois hypothèses simplificatrices :

- L'élancement de la poutre est très grand ($\frac{L}{h} \gg 1$) et celle-ci est alors considérée comme un fil mince.
- Les déformations de cisaillement sont négligées ($\gamma \cong 0$).
- L'influence des appuis est négligée.

La prise en compte de ces hypothèses simplifie considérablement l'équation du mouvement qui s'écrit alors :

$$E_x I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (1.31)$$

La solution générale de cette équation différentielle est de la forme :

$$v(x;t) = G(x) \cos(2\pi f_k t + \varphi) \quad (1.32)$$

avec $G(x) = C_1 \cos(a_k x) + C_2 \cosh(a_k x) + C_3 \sin(a_k x) + C_4 \sinh(a_k x)$

où $a_k^4 = 4\pi^2 \frac{\rho S}{E_x I_{GZ}} f_k^2$

A chaque extrémité de la poutre, l'effort tranchant et le moment fléchissant sont nuls à chaque instant.

$$T(0;t) = T(L;t) = 0 \quad ; \quad M(0;t) = M(L;t) = 0 \quad (1.33)$$

Ces conditions aux limites permettent de conjecturer les fréquences propres de vibration. Elles conduisent (valeurs approchées) à :

$$4\pi^2 f_k^2 = X_k \frac{E_x I_{GZ}}{\rho S L^4} \quad \text{avec} \quad X_k = \left[(2k+1) \frac{\pi}{2} \right]^4 \quad (1.34)$$

Donc, pour une poutre flottante, si l'on peut identifier la fréquence f_k d'un des modes propres et son rang k , on peut en déduire la valeur du module d'élasticité du matériau dans la direction ($G_0 X$) par :

$$E_X = 4\pi^2 \frac{\rho S L^4}{I_{GZ}} \frac{f_k^2}{X_k} \quad (1.35)$$

1.2.5.4.2 Modèle et solution de Rayleigh.

Cette formulation introduit un troisième terme par rapport au modèle de Bernoulli visant à tenir compte de l'énergie cinétique de rotation des sections droites au cours du mouvement.

$$E_X I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \rho S \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (1.36)$$

Rayleigh déduit des valeurs approchées X_{Rk} , tenant en compte l'effet de l'inertie de rotation, peu différentes des valeurs des coefficients X_k :

$$X_{Rk} = X_k \left[1 + \frac{h}{12L^2} (6\theta(m_k) + \theta^2(m_k)) \right] \quad (1.37)$$

où $m_k^4 = X_k$ et $\theta(m_k) = m_k \frac{tg(m_k) * th(m_k)}{tg(m_k) - th(m_k)}$.

D'où une nouvelle expression du module d'élasticité :

$$E_X = 4\pi^2 \frac{\rho S L^4}{I_{GZ}} \frac{f_k^2}{X_{Rk}} \quad (1.38)$$

1.2.5.4.3 Modèle de Timoshenko et solution de Bordonné.

Le modèle de Timoshenko fait intervenir conjointement l'inertie de rotation et une déformation de cisaillement dans le plan du mouvement.

Cette formulation repose sur quelques hypothèses :

- L'élanement est relativement faible.
- Le cisaillement n'est pas négligé.
- L'influence des appuis est négligée.

On obtient alors l'équation du mouvement suivante identique à l'équation (1.30):

$$E_X I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \left[1 + \left(\frac{E_X}{K G_{XY}} \right) \right] \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \left(\frac{\rho^2 I_{GZ}}{K G_{XY}} \right) \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + \rho S \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (1.39)$$

Cette formulation va conduire, après recherche des modes propres, à déterminer simultanément le module d'élasticité E_X et le module de cisaillement ou de rigidité G_{XY} .

$$E_x = 4\pi^2 \frac{\rho S L^4}{I_{GZ}} \frac{f_k^2}{X_k} \left[1 + \alpha [\theta^2(m_k) + 6\theta(m_k)] + \frac{\alpha E_x}{K G_{XY}} [\theta^2(m_k) - 2\theta(m_k)] \right] \quad (1.40)$$

où $\alpha = \frac{h^2}{12L}$;

m_k est la $k^{i\text{ème}}$ racine positive de l'équation $\cos(m) * ch(m) = 1$;

$$X_k = m_k^4 \quad (\text{Une valeur approchée est } X_k = \left[(2k + 1) \frac{\pi}{2} \right]^4) ;$$

$$\theta(m_k) = m_k \frac{tg(m_k) * th(m_k)}{tg(m_k) - th(m_k)} ;$$

f_k est la $k^{i\text{ème}}$ fréquence propre de la poutre.

En posant :

$$F_1(m_k) = \theta^2(m_k) + 6\theta(m_k) \quad \text{et} \quad F_2(m_k) = \theta^2(m_k) - 2\theta(m_k)$$

on a :

$$E_x = 4\pi^2 \frac{\rho S L^4}{I_{GZ}} \frac{f_k^2}{X_k} \left[1 + \alpha F_1(m_k) + \frac{\alpha E_x}{K G_{XY}} F_2(m_k) \right] \quad (1.41)$$

Il suffit alors de deux fréquences propres pour déterminer E_x et G_{XY} . En effet, on doit résoudre un système de deux équations à deux inconnues (E_x et G_{XY}).

Les paramètres fixes entrant dans les approximations linéaires sont donnés par le tableau suivant (Tableau 1.4)

Tableau 1.4: Paramètres fixes entrant dans les approximations linéaires des modèles de Bernoulli et Timoshenko.

Rang k	m_k	X_k	$F_1(m_k)$	$F_2(m_k)$
1	4,73	500,56	49,481	12,303
2	7,8532	3803,5	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

Une étude réalisée par Bordonné (1989) montre que le module d'Young est quasiment indépendant de la fréquence alors que le rapport E/KG varie lorsque l'élanement diminue (Figure 1.15)

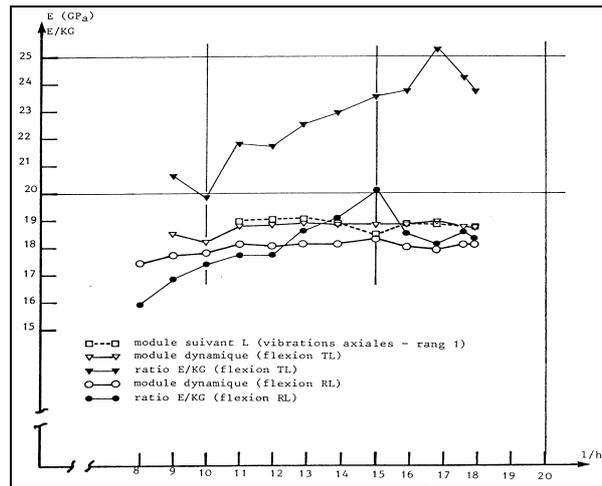


Figure 1.15: Relations entre modules dynamiques et élancement l/h
Relations entre E/KG et élancement, (Bordonné, 1989).

Dans ce travail, le calcul des modules dynamiques n'utilise que les deux premières fréquences propres des vibrations de flexion. Tous les modules (obtenus à partir du modèle de Timoshenko) ont été calculés sur la même éprouvette dont l'élancement a été progressivement réduit.

La Figure 1.16 (Bordonné, 1989) illustre l'effet de l'élancement sur les modules apparents (Bernoulli) pour les quatre premiers modes (rangs) de vibration en flexion d'une poutre, on constate que l'effet de l'élancement est presque linéaire pour les modes de rang 1 et 2 mais que la pente moyenne des courbes est fortement dépendante du rapport des modules d'élasticité et de cisaillement.

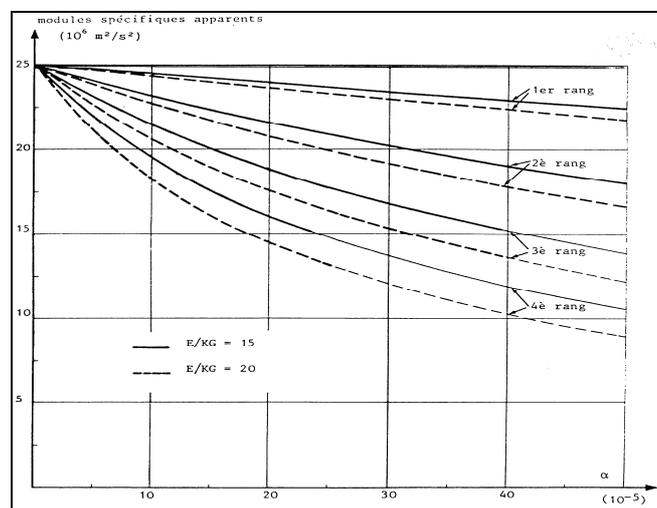


Figure 1.16: Relation entre modules apparents et facteur $\alpha = h^2/12I^2$, (Bordonné, 1989).

Ainsi la détermination des modules pourra s'appliquer sans trop de restriction lorsque l'élancement α est supérieur à 25 et E/KG sont petits ou lorsqu'on se limite aux deux premiers modes. Ceci revient à interdire l'utilisation de fréquences trop élevées pour la détermination du module. Dans nos investigations nous ne prendrons en compte que la première fréquence propre en appliquant la formule de Bernoulli. En effet, l'utilisation du modèle de Bernoulli est limitée aux premiers harmoniques. Et, si l'on prend des harmoniques

de rang élevés, (par exemple de rang 5 ou 6), pour lesquels le cisaillement devient non négligeable, il convient d'utiliser le modèle de Timoshenko pour estimer le module vibratoire.

La théorie classique de la Résistance Des Matériaux (RDM) permet la mise en équation des mouvements de vibrations transversales dans une poutre donnée. Pour une poutre flottante, on peut identifier une fréquence d'un des modes propres dont on connaît le rang associé et calculer le module d'élasticité en vibrations longitudinales (ou en vibrations en compression). Quelques modèles de complexité croissante (Bernoulli, Rayleigh, Timoshenko) permettent, après avoir identifié un ou deux modes propres et leur rang, de calculer le module d'élasticité en vibrations transversales (ou vibrations en flexion).

Ces modèles ne prennent pas en compte l'influence du facteur de forme de la section droite sur les fréquences de résonance, mise en évidence expérimentalement (Guitard, Liot, Foudjet, 1996). En effet, la fréquence correspondant à une résonance de rang quelconque est une fonction significativement croissante du facteur de forme $\frac{b}{h}$.

Conclusion

La coupe sélective des essences forestière compromet grandement la sauvegarde de l'extraordinaire patrimoine qu'est le bassin du Congo.

Face à cette menace anthropique et sous la pression des ONG internationales, tous les acteurs impliqués dans l'exploitation du massif forestier s'engagent de plus en plus incités à œuvrer pour le développement durable. La demande de bois produit de manière plus écologique augmente.

Force est de reconnaître qu'il reste de nombreux défis à relever. La sauvegarde des forêts du bassin du Congo passera obligatoirement par des recherches scientifiques appropriées et des décisions politiques claires.

L'exploitation hyper sélective des essences du bassin du Congo entraîne la disparition locale des essences escomptées la détérioration rapide des écosystèmes. D'où la nécessité d'une promotion d'essences disponibles en terme de ressources sur pied.

Nous utiliserons la méthode vibratoire (non destructive) pour estimer le module d'élasticité longitudinal du bois comme un prédicteur de la résistance. La théorie vibratoire permet de comprendre et respecter les exigences qu'il faut intégrer dans le mode opératoire. Le matériel végétal sera constitué en conséquence d'éprouvettes sans défaut, prismatiques à section carrée constante et respectant les conditions d'élançement dans le dessein d'appliquer la formule de Bernoulli aux poutres en vibrations transversales.

CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE

Résumé.

Dans ce chapitre, on présente d'abord les méthodes et matériel pour les essais vibratoires et de flexion quatre points qui sont effectués dans cette thèse. Ceci permet d'envisager la mesure d'une propriété physique (masse volumique) et de trois propriétés mécaniques (module d'élasticité longitudinal vibratoire, module d'élasticité longitudinal en flexion et contrainte de rupture en flexion parallèle) à humidité contrôlée. Pour chaque essai, nous exposons le principe de la mesure, l'appareillage, le mode opératoire, les formules et les calculs nécessaires à l'obtention des valeurs numériques escomptées. Ensuite, une présentation théorique de la méthodologie de regroupement des essences et du calcul des valeurs caractéristiques est proposée. Les techniques d'échantillonnage classique sont onéreuses. Nous proposons une méthode d'échantillonnage simplifiée et adaptée au contexte des pays en développement qui ne dispose pas suffisamment de moyens en termes d'infrastructures et économique. Le ravitaillement en pièces d'essences escomptées se fera auprès de plusieurs points de vente pour tenir statistiquement compte de la variabilité du bois. Dans le cadre des présentes investigations, l'une des sources d'approvisionnement est le marché local de Yaoundé où parvient, dans sa variabilité, la plupart d'essences de la forêt dense du Cameroun.

Introduction

La mesure du module élastique longitudinal s'effectue par analyse du spectre de vibration d'une poutre soumise à un choc mécanique. Ce module d'élasticité est estimé selon le modèle de Bernoulli. Il est aussi effectué des essais statiques en flexion quatre points pour estimer le module d'élasticité et la contrainte de rupture.

On présente ici les méthodes et matériel pour les essais vibratoires et de flexion quatre points qui sont effectués dans cette thèse. Ensuite, une présentation théorique de la méthodologie de regroupement des essences et du calcul des valeurs caractéristiques est exposée.

2.1 Essais vibratoires.

2.1.1 Principe de la mesure du module d'élasticité dynamique.

Le module d'élasticité longitudinal est déterminé par l'analyse du spectre des fréquences des vibrations naturelles transverses de l'éprouvette maintenue par des appuis souples. Le schéma suivant (Figure 2.1) montre les différents modes de sollicitations possibles.

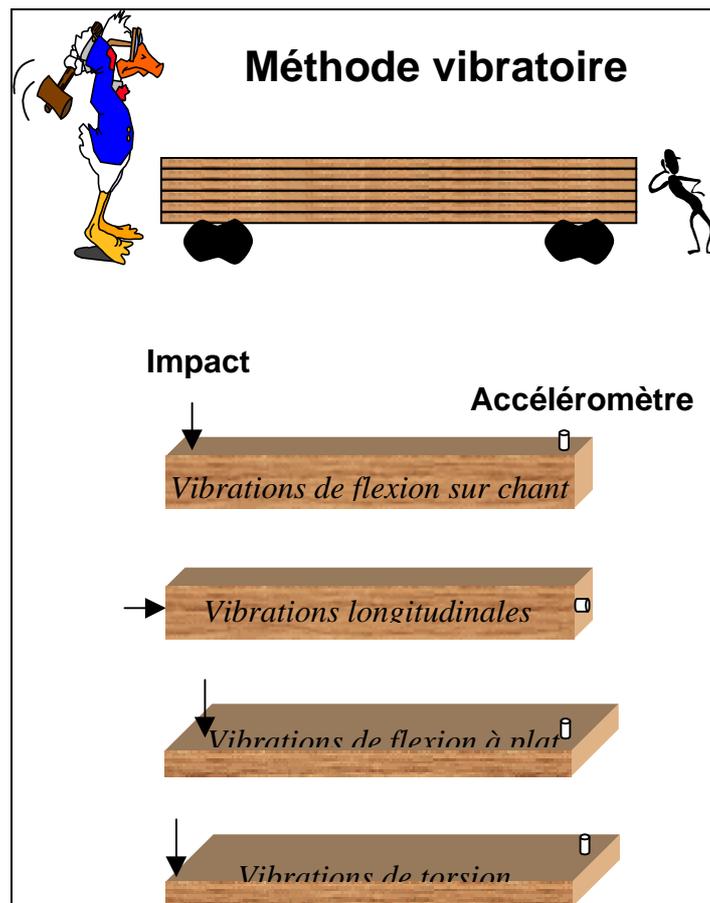


Figure 2.1: Méthodes de mesure, modes de vibration.

On y distingue quatre modes de vibration. A savoir :

- vibrations de flexion sur chant ;
- vibrations longitudinales ;
- vibrations de flexion à plat ;
- vibrations de torsion.

Les résultats expérimentaux sont obtenus à partir d'un modèle d'essais non destructifs basé sur l'analyse spectrale des vibrations naturelles d'une poutre sollicitée en flexion dynamique (Brancheriau, 2002). Des modes fondamentaux de vibrations peuvent facilement être générés à l'extrémité de la poutre, laquelle est placée sur appuis souples, et détectés par un accéléromètre collé à l'autre extrémité.

En flexion, le modèle de Bernoulli où la déformation due à l'effort tranchant (cisaillement) n'est pas prise en compte ($\frac{L}{h} \geq 20$) montre que le MOE (MPa) est donné par :

$$E = \rho S \frac{(2\pi L^2 f_k)^2}{I X_k} \quad (2.1)$$

où ρ est la masse volumique ou densité (kg/m^3),

S l'aire de la section transversale (mm^2),

L la longueur de la poutre (mm),

f_k la fréquence du $k^{\text{ième}}$ mode de vibration longitudinale (Hz),

I le moment d'inertie de la section transversale (mm^4),

X_k étant donné par :

$$X_k = \left[(2k+1) \frac{\pi}{2} \right]^4$$

Donc, connaissant la fréquence f_k de rang k d'une poutre « flottante » vibrant en flexion, et certaines caractéristiques physiques et géométriques du matériau, on peut obtenir le module élastique du matériau.

2.1.2 Appareillage.

Les essais vibratoires nécessitent un matériel spécifique (Figure 2.2) dont les composantes de base sont :

- Micro-ordinateur portable DELL Latitude C840 Pentium 4 de 40Go de numéro de série DELL LBL P/N : 6J044A02 ;

- une carte d'acquisition analogique-numérique (pour filtrage et numérisation) dans un boîtier à deux voies de marque Pico Technology Limited ADC-216 Virtual Instrument de numéro de série EJY80/074 ;
- accéléromètre Brüel & Kjaer type 4344 243291 unidimensionnel;
- marteau d'impact Brüel & Kjaer type 8202 ayant un capteur de force incorporé ;
- balance au milligramme ;
- pied à coulisse à affichage direct ;
- cire d'abeille ;
- supports élastiques.

Le logiciel d'exploitation est le « *Vibratoire LRBB-XYLOMECA* » dont l'indice de performance est plus grand que ceux des machines Stress Grader, ultrasons, rayon X, etc.,



Figure 2.2: Matériel (a) et quelques éprouvettes (b) pour l'essai vibratoire.

2.1.3 Mode opératoire.

L'éprouvette de dimensions moyennes $20 \times 20 \times 400 \text{ mm}^3$ repose sur des supports élastiques et la sollicitation est provoquée par percussion dans la direction longitudinale du bois sur une des extrémités. Le signal temporel est capté par un accéléromètre puis traité par

décomposition en série de Fourier. Le module d'élasticité longitudinal est déterminé par l'analyse du spectre des fréquences des vibrations naturelles en flexion de l'éprouvette.

Le mode opératoire se décompose suivant les étapes ci après :

- l'éprouvette est pesée et mesurée. Une moyenne sur trois positions équidistantes est effectuée pour les mesures de la hauteur et de la largeur ;
- l'éprouvette est mise en place sur les deux supports élastiques en respectant l'orientation longitudinale et la symétrie des appuis;
- l'accéléromètre est ensuite placé à l'une des extrémités au moyen de la cire d'abeille ;
- une percussion est donnée sur l'extrémité libre de l'éprouvette ;
- on vérifie à l'écran la qualité du spectre temporel obtenu (*Figure2.3*) ;
- on vérifie la qualité des pics de fréquences obtenus (*Figure2.4*).

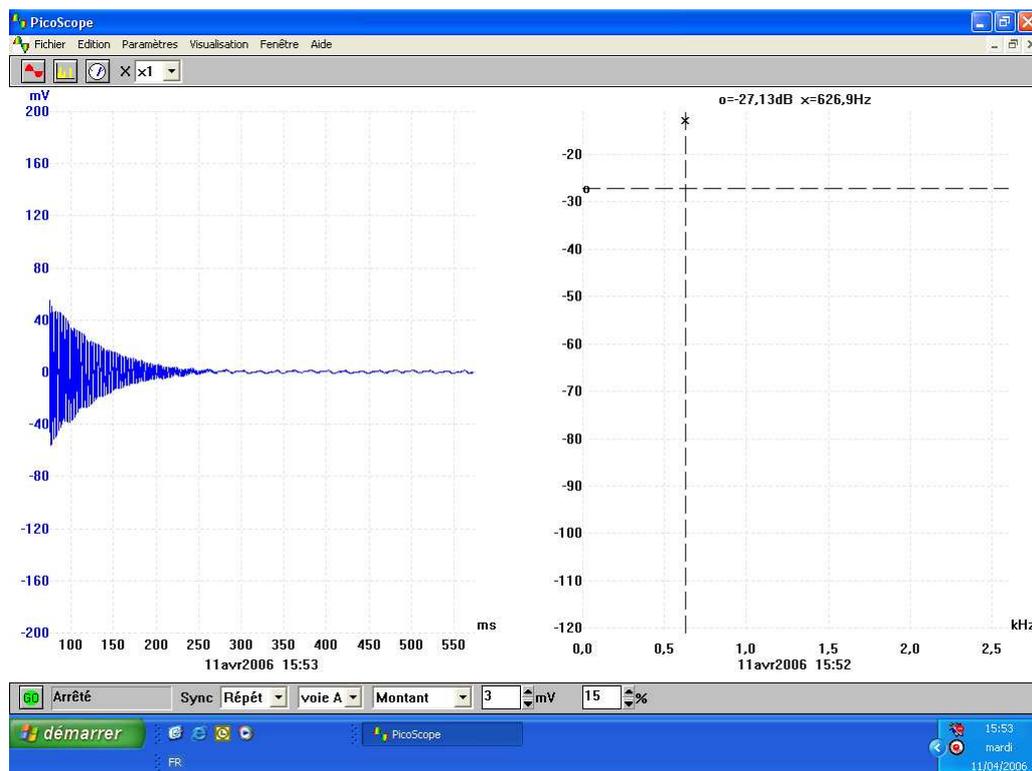


Figure2.3: Exemple de spectre temporel traduisant un réglage approprié.

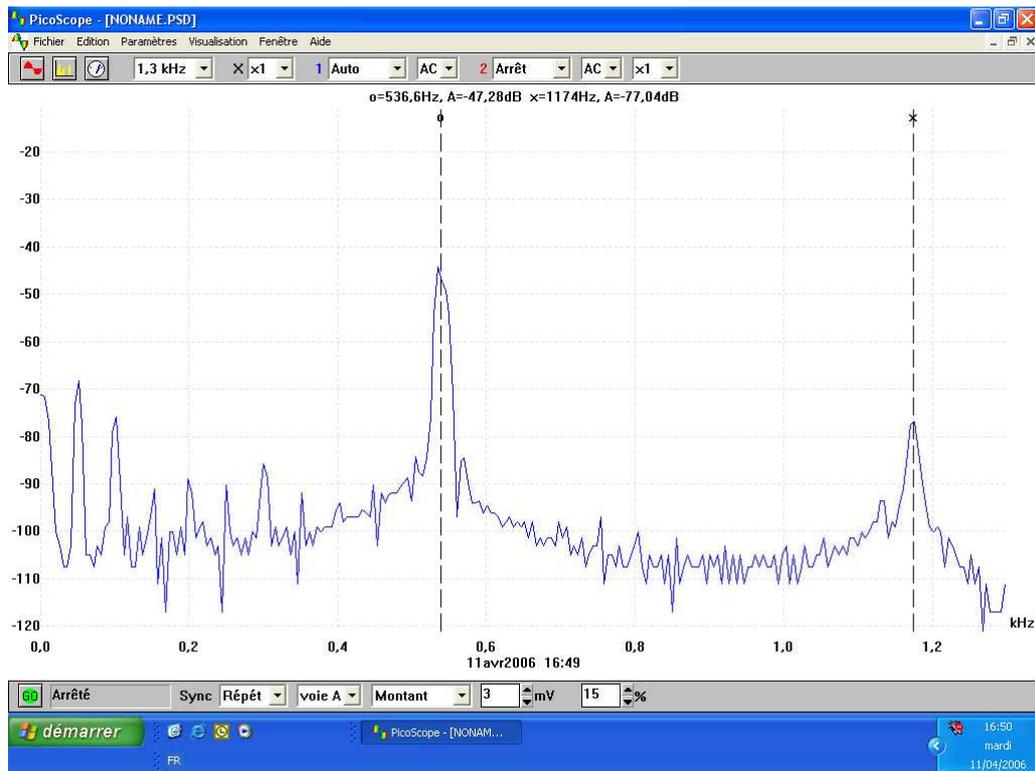


Figure 2.4: Exemple de modes propres (signature) obtenus par analyse spectrale des vibrations naturelles d'une poutre.

2.1.4 Obtention d'une valeur numérique du module d'élasticité.

La poutre est supposée obéir au modèle de Bernoulli. On sélectionne donc la première fréquence propre. Le module d'élasticité dynamique est ensuite calculé par la formule (2.1) de Bernoulli.

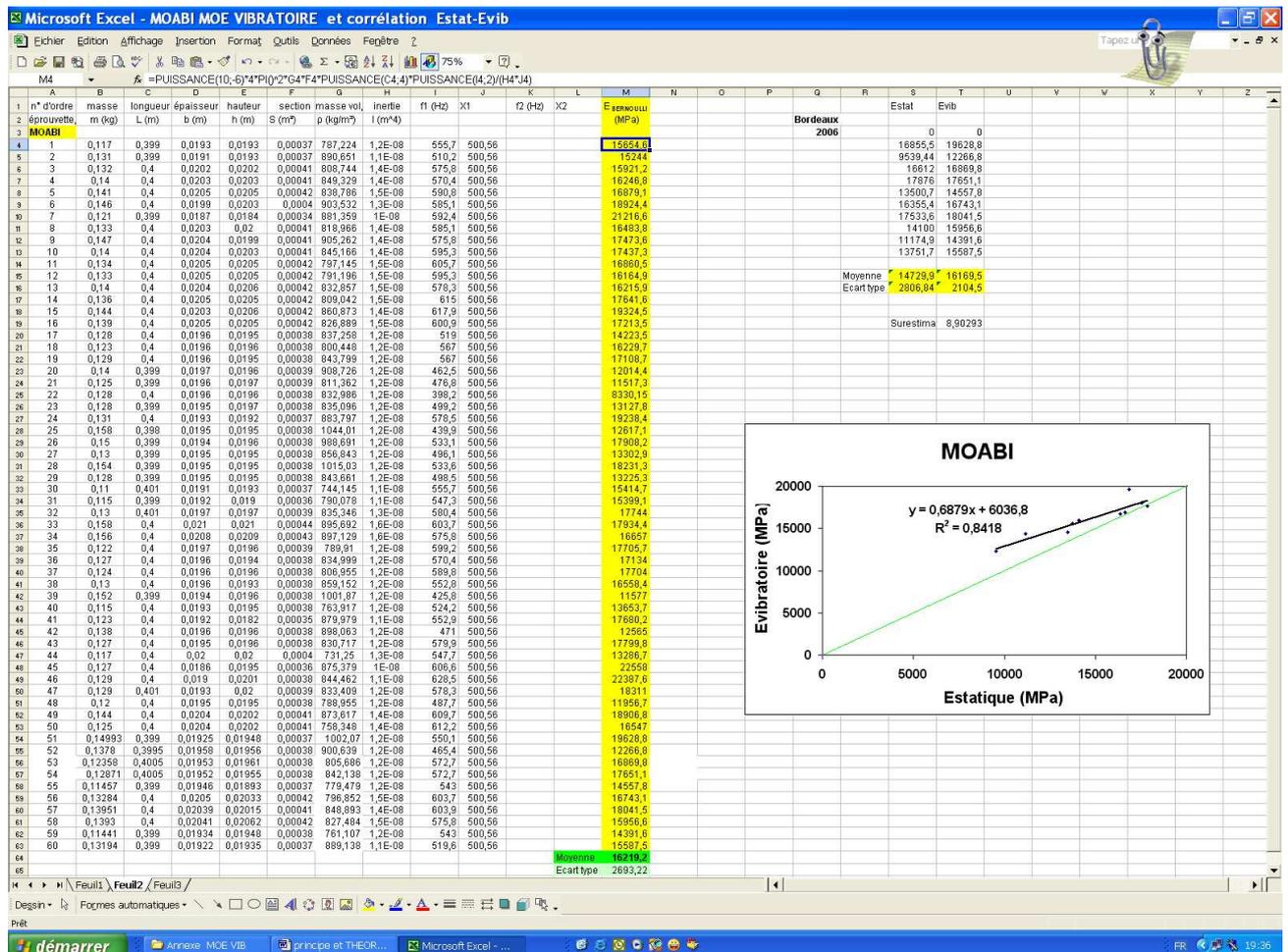


Figure 2.5: Exemple de feuille de calcul Excel pour estimer la valeur du module d'élasticité vibratoire.

2.2 Essais statiques (court terme).

2.2.1 Principe de la mesure du module d'élasticité statique et de la contrainte de rupture.

Le module d'élasticité longitudinal statique et la contrainte de rupture sont déterminés par des essais statiques selon le projet de norme prEN 408 (2000). Il s'agit d'essais de flexion quatre points réalisés dans des conditions de chargement quasi statique (Figures 2.6 et 2.7).

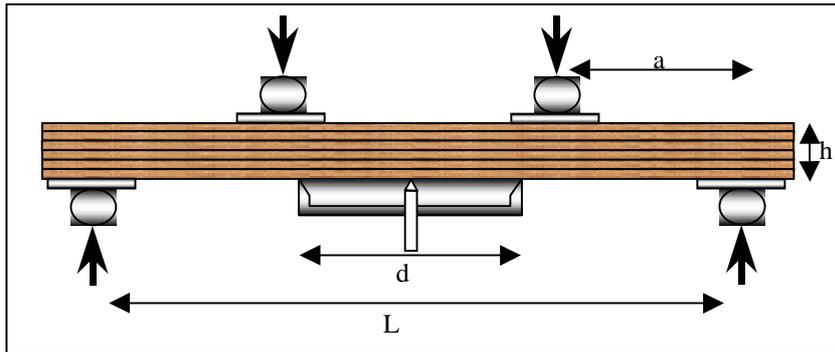


Figure 2.6: Configuration des essais de flexion statiques.



Figure 2.7: Configuration des essais de flexion statiques.

Le projet de norme prEN 408 (2000) préconise comme dimensions :

$$L = 18h ; \quad a = 6h \pm 1,5h ; \quad d = 5h.$$

L'éprouvette est placée sur champ et repose librement sur deux appuis cylindriques non fixes. La distance entre-axe de ces appuis est égale à 18 fois la hauteur fléchie. La charge (F) est appliquée au tiers et aux deux tiers de la portée, également au moyen de deux appuis cylindriques. Des plaques sont insérées entre chaque appui et l'éprouvette pour minimiser le risque d'écrasement. La dimension des plaquettes est au moins égale à la largeur de l'éprouvette. Un dispositif permet de mesurer la flèche de l'éprouvette déformée au milieu d'une base de mesure égale à 5 fois la hauteur de l'éprouvette et disposé symétriquement dans le tiers central.

Deux grandeurs sont mesurées au cours de l'essai :

- le module d'élasticité statique E_{stat} et
- la contrainte de rupture σ_R .

Les résultats expérimentaux sont obtenus à partir de calculs de RDM classique sur la théorie

des poutres par les formules suivantes :

$$E_{stat} = \frac{ad^2}{16I} \frac{\Delta F}{\Delta w} \quad (MPa) \quad (2.2)$$

où a est la distance entre tête de chargement et appui extérieur (mm),
 d tel que sus défini (mm),

I le moment d'inertie de la section transversale (mm^4),

$\frac{\Delta F}{\Delta w}$ la pente de la partie linéaire de la courbe effort/déplacement, et

$$\sigma_R = \frac{3aF_{max}}{bh^2} \quad (MPa) \quad (2.3)$$

où F_{max} est la force à la rupture (N),

b la largeur de l'éprouvette (mm),

h la hauteur de l'éprouvette (mm),

a tel que sus défini.

L'essai de flexion quatre points permet de solliciter l'éprouvette jusqu'à la rupture (Figure 2.8).

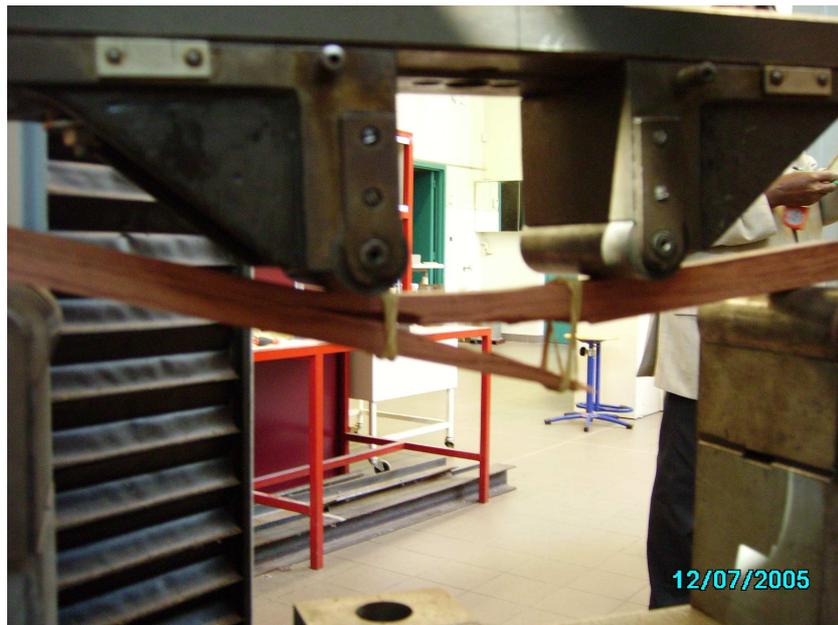


Figure 2.8: Rupture d'une éprouvette par essai de flexion statique.

2.2.2 Appareillage.

Les essais de flexion quatre points ont été réalisés au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux qui est doté d'un appareillage approprié (*Figure 2.9*). A savoir :

- un banc d'essai piloté sur ordinateur ;
- des capteurs de déplacement LVDT ;
- pied à coulisse ;
- etc.



Figure 2.9: Dispositif d'essai statique piloté par ordinateur.

2.2.3 Mode opératoire.

L'éprouvette de dimensions moyennes $20 \times 20 \times 400 \text{ mm}^3$ repose sur deux appuis cylindriques. L'effort F , mesuré par un capteur de force, est appliqué par un vérin chargeant la poutre par l'intermédiaire d'un chevêtre métallique. Le déplacement est mesuré par un capteur de déplacement LVDT initialement étalonné (*Figure 2.10*)

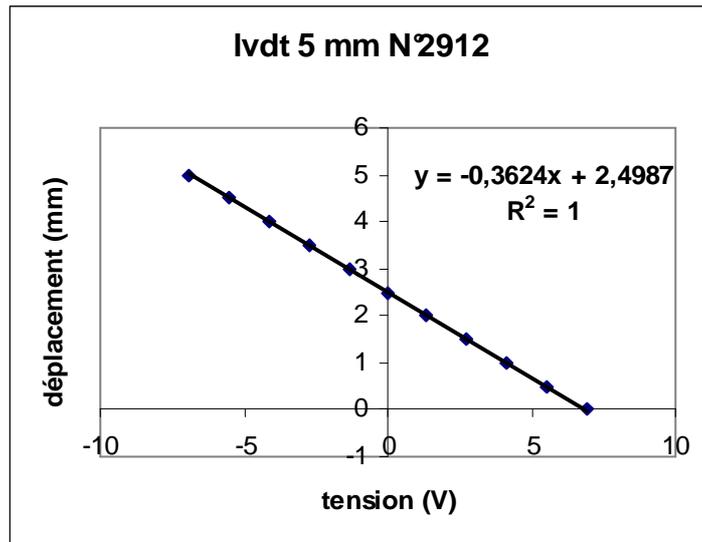


Figure 2.10: Courbe d'étalonnage du capteur de déplacement LVDT.

Le mode opératoire se décompose suivant les étapes ci après :

- la longueur, la hauteur et la largeur de l'éprouvette sont mesurées. Une moyenne sur trois positions équidistantes est effectuée pour les mesures de la hauteur et de la largeur ;
- l'éprouvette est mise en place sur le banc d'essai en respectant l'orientation longitudinale et la symétrie des appuis;
- on commande par ordinateur la descente du vérin. L'acquisition de l'effort et du déplacement se fait tous les dixièmes de seconde;
- lorsque l'effort représente les deux tiers de la valeur numérique de la contrainte de rupture en flexion pré calculée, on stoppe la descente du vérin pour ôter le capteur de déplacement ;
- on commande la poursuite de la descente du vérin jusqu'à la rupture.

2.2.4 Obtention des valeurs numériques du module d'élasticité et du module de rupture.

A l'aide des relevés fournis par l'ordinateur, on construit la courbe effort/déplacement (Figure 2.11). La pente de la partie linéaire donne la valeur numérique du terme $\frac{\Delta F}{\Delta w}$. Il s'en

suit le calcul de E_{stat} suivant la formule (2.2). Par ailleurs, connaissant la force à la rupture F_{max} , on calcule aisément contrainte de rupture σ_R .

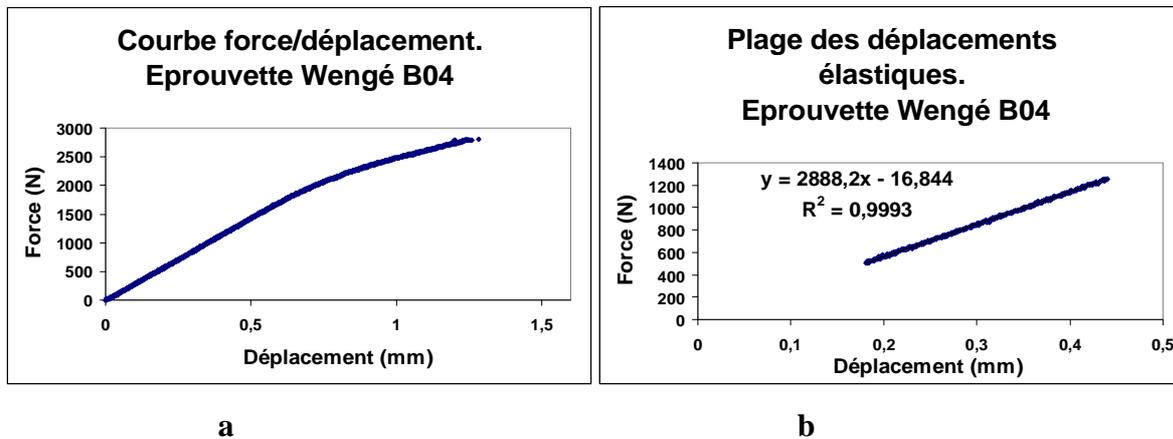


Figure 2.11: Courbe effort-déplacement (a) et la partie linéaire de la même courbe (b)
Pour une éprouvette de Wengé (*Millettia laurentii*).

2.3 Taux d'humidité.

Le taux d'humidité est une propriété physique qui influence grandement les propriétés mécaniques obtenues par essais statiques.

L'eau se présente sous trois formes dans le bois, en « eau liée » et en « eau libre » et « eau de constitution »:

- sous forme d'eau liée ou hygroscopique, l'eau est adsorbée sur les fonctions hydroxyles des chaînes de polysaccharides et sur la lignine. Cette eau est en équilibre thermodynamique avec l'hygrométrie du milieu ambiant. Le domaine hygroscopique est borné par une humidité caractéristique appelée Point de Saturation des Fibres (PSF) qui est d'environ 30%, en dessous duquel se produisent les variations dimensionnelles du bois (retrait et gonflement) ;
- sous forme d'eau libre, l'eau est retenue dans les lumens des cellules par des mécanismes de condensation capillaire ;
- l'eau de constitution faisant partie de la composition moléculaire du matériau.

Dans un bois vert, une partie de l'eau remplit plus ou moins complètement les vides cellulaires et intercellulaires. L'évacuation de cette eau libre s'effectue sans retrait du bois. Lorsque l'eau libre a entièrement disparu, le bois ne contient plus que de l'eau liée qui imprègne les membranes des cellules, et dont le départ lors du séchage va occasionner des phénomènes de retraits à l'origine de déformation du bois.

Le PSF correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée, taux en dessous duquel le bois va commencer à sécher en se contractant.

Le taux d'humidité d'équilibre du bois est relié à l'humidité relative de l'air par des isothermes de sorption qui se singularisent par un effet d'hystérésis.

Le taux d'humidité d'une éprouvette de bois s'exprime par le pourcentage de la masse d'eau présente dans l'éprouvette par rapport à la masse anhydre. Cette dernière est obtenue par séchage de l'éprouvette à l'étuve à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la masse soit constante.

Le taux d'humidité s'obtient par le principe de la méthode par pesées et déshydratation suivant la norme NF B 51-004. Il est défini par la formule suivante :

$$H\% = \frac{(M_H - M_0)}{M_0} \times 100 \quad (2.4)$$

où H est le taux d'humidité de la masse anhydre exprimé en pourcentage,

M_H est la masse de l'éprouvette au taux d'humidité H,

M_0 est la masse anhydre de déshydratation dans une enceinte climatique à 105°C jusqu'à ce que la masse soit constante.

Le Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux est doté d'une enceinte climatique à 12% du taux d'humidité. Les éprouvettes y ont été conditionnées pour obtenir les propriétés mécaniques à de 12% du taux d'humidité qui fait office de référence.

Sur le plan pratique, si l'humidité H de l'éprouvette au moment de l'essai diffère de 12% tout en restant dans les limites de valeurs comprises entre 10% et 14%, il est possible de ramener le module d'élasticité en flexion parallèlement aux fibres du bois E_H à 12% à l'aide de la formule :

$$E_{12} = E_H [1 + c(H - 12)] \quad (2.5)$$

où c est le coefficient de correction du module d'élasticité en flexion en fonction de l'humidité pour l'essence considérée. Il est déterminé sur un lot d'éprouvettes de même bois, ou sur la même éprouvette, essayées à des humidités allant de 7% à 18% (Norme NF B 51-016).

Souvent, on adopte la correction suivante (Guitard, 1987):

$$E_H = E_{12} [1 - 0,015(H - 12)] \quad (2.6)$$

La mesure de la masse se fera à l'aide d'une balance sensible (précision : 1%).

2.4 Méthodologie du regroupement mécanique des essences du bassin du Congo.

Le regroupement s'effectue autour de quatre essences parmi les plus commercialisées. A savoir : ayous (*Triplochiton scleroxylon*), sapelli (*Entandrophragma cylindricum*), tali (*Erythrophleum suaveolens*) et l'azobé (*Lophira alata*).

Ce regroupement mécanique des essences du bassin du Congo repose sur le choix adéquat de la propriété indicatrice, les arguments en faveur du nombre de groupes, l'affectation exclusive d'une essence donnée dans un groupe, la pertinence d'une technique d'échantillonnage à moindre coût et la rigueur de l'exploitation statistique des résultats (Ayina, 2002).

Le MOE E_i d'une essence de numéro d'ordre i (avec $i \in \{1;2;...;58\}$), est une variable aléatoire. L'affectation d'une essence donnée, dans un des quatre groupes G_j (avec $j \in \{1;2;3;4\}$) s'effectue au moyen d'un *test d'homogénéité* de comparaison des moyennes de la variable aléatoire E_i à chacune des variables aléatoires E_j .

2.4.1 Paramètres des échantillons.

Pour une essence i , le MOE E_i est une variable aléatoire et les résultats expérimentaux $e_{i,1}, e_{i,2}, \dots, e_{i,n_i}$ observés lors de n_i réalisations indépendantes forment une série statistique de la variable aléatoire E_i . Il s'agit des résultats expérimentaux observés lors de n_i essais. Ces résultats sont interprétés comme n_i réalisations indépendantes de l'expérience stochastique à laquelle est associée la variable aléatoire E_i ou comme une réalisation de l'échantillon aléatoire $\{E_{i,1}, E_{i,2}, \dots, E_{i,n_i}\}$ constitué de n_i variables aléatoires indépendantes ayant la même loi de distribution que E_i .

Il est naturel de prendre la moyenne arithmétique \bar{E}_i des variables aléatoires de l'échantillon comme estimateur de la moyenne inconnue m_{E_i} ; c'est la *moyenne de l'échantillon* dont une réalisation \bar{e}_i (à partir des valeurs observées) est une *moyenne empirique*.

$$\bar{E}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} E_{i,k}}{n_i} ; \quad \bar{e}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} e_{i,k}}{n_i} \quad (2.7)$$

\bar{E}_i est un estimateur sans biais de m_{E_i} (c'est-à-dire que $E[\bar{E}_i] = m_{E_i}$) qui est en plus convergent (c'est-à-dire que $E[\bar{E}_i]$ tend vers m_{E_i} et $\text{Var}[\bar{E}_i]$ tend vers 0 lorsque n_i augmente indéfiniment). On peut également vérifier que \bar{E}_i est l'estimateur linéaire sans biais le plus efficace de m_{E_i} , c'est-à-dire celui qui a la plus petite variance. Autrement dit, \bar{E}_i est un bon estimateur de m_{E_i} .

Par ailleurs, la statistique S_i^2 , dont une réalisation numérique est s_i^2 , est appelée *variance de l'échantillon*.

$$S_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} (E_{i,k} - \bar{E}_i)^2}{n_i - 1} = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} E_{i,k}^2 - n_i \bar{E}_i^2}{n_i - 1} ; \quad s_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} (e_{i,k} - \bar{e}_i)^2}{n_i - 1} = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} e_{i,k}^2 - n_i \bar{e}_i^2}{n_i - 1} \quad (2.8)$$

On convient que l'*ayous* est l'essence de numéro d'ordre 1, le *sapelli* l'essence de numéro d'ordre 2, le *tali* celle de numéro d'ordre 3 et enfin le *tali* de numéro d'ordre 4. Il vient que E_1 , E_2 , E_3 et E_4 représentent respectivement les MOE de l'*ayous*, du *sapelli*, du *tali* et de l'*azobé*.

2.4.2 Affectation d'une essence dans un groupe.

L'affectation d'une essence donnée, de numéro d'ordre i (avec $i \in \{1;2;\dots;58\}$), dans un des quatre groupes G_j (avec $j \in \{1;2;3;4\}$) s'effectue au moyen d'un *test d'homogénéité* de comparaison des moyennes de la variable aléatoire E_i à chacune des variables aléatoires E_j (avec $j \in \{1;2;3;4\}$).

Un *test d'hypothèse* est un procédé d'inférence qui permet de contrôler (accepter ou rejeter) à partir de l'étude d'un ou plusieurs *échantillons* aléatoires, la validité d'hypothèses relatives à une ou plusieurs *populations*. Ici, les populations sont les essences du bassin du Congo et le caractère quantitatif est le MOE.

Les méthodes de l'*inférence statistique* permettent de déterminer, avec une probabilité donnée, si les différences constatées au niveau des échantillons peuvent être imputables au

hasard ou si elles sont suffisamment importantes pour signifier que les échantillons proviennent de populations vraisemblablement différentes.

Les tests d'égalité ou d'homogénéité permettent de comparer plusieurs populations d'essences à l'aide d'un nombre équivalent d'échantillons.

Le principe des tests d'hypothèse est de poser une hypothèse de travail et de prédire les conséquences de cette hypothèse pour la population ou l'échantillon. On compare ces prédictions avec les observations et l'on conclut en acceptant ou en refusant l'hypothèse de travail à partir de règles de décisions objectives.

Les différentes étapes ici sont :

1°)- définir l'hypothèse nulle (notée H_0) à contrôler.

$H_0 : m_{E_i} = m_{E_j}$ avec $i \in \{1;2;\dots;58\}$ et $j \in \{1;2;3;4\}$, c'est-à-dire que les moyennes « vraies » des deux populations (essences de numéros d'ordre i et j) coïncident. L'hypothèse nulle consiste à dire qu'il n'existe pas différence entre les paramètres comparés ou que la différence observée n'est pas significative et est due aux fluctuations d'échantillonnage.

L'hypothèse alternative (notée H_1) est la négation de H_0 .

$H_1 : m_{E_i} \neq m_{E_j}$

2°)- choisir un test statistique ou une statistique pour contrôler H_0 .

Dans cette optique, on définit la variable aléatoire $Z_{i,j}$ par :

$$Z_{i,j} = \bar{E}_i - \bar{E}_j \quad (2.9)$$

3°)- définir la distribution de la statistique $Z_{i,j}$ sous l'hypothèse « H_0 est réalisée ».

4°)- définir le niveau de signification du test $1-\alpha$ ou risque d'erreur α . Le risque d'erreur est la probabilité de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie ou d'accepter H_1 alors qu'elle est fausse.

$$\alpha = P[\text{rejeter } H_0 / H_0 \text{ vraie}] = P[\text{accepter } H_1 / H_1 \text{ fausse}] \quad (2.10)$$

5°)- calculer à partir des données fournies par les échantillons, la valeur observée z de la statistique Z .

6°)- prendre une décision concernant l'hypothèse posée et décider de l'appartenance ou non de l'essence de numéro d'ordre i au groupe G_j .

La règle de décision est la suivante pour un seuil de signification $(1-\alpha)$ fixé *a priori* :

- si la valeur observée $z_{i,j}$ de la variable aléatoire $Z_{i,j}$ est supérieure à la valeur seuil z_α (obtenue à partir des tables numériques), alors l'hypothèse H_0 est rejetée au risque d'erreur α et l'hypothèse H_1 est acceptée ;

- si la valeur observée $z_{i,j}$ de la variable aléatoire $Z_{i,j}$ est inférieure ou égale à la valeur seuil z_α , alors l'hypothèse H_0 ne peut être rejetée.

Supposons que les variables aléatoires E_i et E_j sont distribuées suivant des lois normales $N(m_{E_i}; \sigma_{E_i}^2)$ et $N(m_{E_j}; \sigma_{E_j}^2)$ respectivement. On montre que les variables aléatoires \bar{E}_i et \bar{E}_j suivent des lois normales $N\left(m_{E_i}; \frac{\sigma_{E_i}^2}{n_i}\right)$ et $N\left(m_{E_j}; \frac{\sigma_{E_j}^2}{n_j}\right)$ respectivement.

Remarquons que, si l'on extrait de ces deux populations deux échantillons indépendants de grandes tailles ($n_i \geq 30$ et $n_j \geq 30$), l'existence du *théorème central limite* permet de supprimer la condition exigeant que les variables aléatoires E_i et E_j soient distribuées suivant des lois normales. Ce qui sera le cas ici où la taille de chaque échantillon est de 100.

La variable aléatoire Z définie par :

$$Z_{i,j} = \bar{E}_i - \bar{E}_j$$

Est telle que

$$E[Z_{i,j}] = E[\bar{E}_i - \bar{E}_j] = E[\bar{E}_i] - E[\bar{E}_j] = m_{E_i} - m_{E_j}$$

$$Var[Z_{i,j}] = Var[\bar{E}_i - \bar{E}_j] = Var[\bar{E}_i] + Var[\bar{E}_j] = \frac{\sigma_{E_i}^2}{n_i} + \frac{\sigma_{E_j}^2}{n_j}$$

Car les variables aléatoires \bar{E}_i et \bar{E}_j sont indépendantes.

$Z_{i,j}$ suit donc une loi normale $N\left(m_{E_i} - m_{E_j}; \frac{\sigma_{E_i}^2}{n_i} + \frac{\sigma_{E_j}^2}{n_j}\right)$.

On peut établir, la variable $U_{i,j}$ centrée réduite telle que :

$$U_{i,j} = \frac{Z_{i,j} - E[Z_{i,j}]}{\sigma_{Z_{i,j}}} = \frac{(\bar{E}_i - \bar{E}_j) - E[\bar{E}_i - \bar{E}_j]}{\sqrt{Var[\bar{E}_i - \bar{E}_j]}} = \frac{(\bar{E}_i - \bar{E}_j) - (m_{E_i} - m_{E_j})}{\sqrt{\frac{\sigma_{E_i}^2}{n_i} + \frac{\sigma_{E_j}^2}{n_j}}} \quad (2.11)$$

Sous l'hypothèse $H_0 : m_{E_i} = m_{E_j}$,

$$U_{i,j} = \frac{\left(\bar{E}_i - \bar{E}_j \right)}{\sqrt{\frac{\sigma_{E_i}^2}{n_i} + \frac{\sigma_{E_j}^2}{n_j}}} \quad (2.12)$$

suit une loi normale centrée réduite $N(0;1)$.

Si l'on suppose que les variances inconnues $\sigma_{E_i}^2$ et $\sigma_{E_j}^2$ et les échantillons grands ($n_i \geq 30$ et $n_j \geq 30$ environ), on peut remplacer les variances des populations par leurs estimations ponctuelles calculées à partir des échantillons, que les variances soient égales ou non.

$$\hat{\sigma}_{E_i}^2 = \frac{n_i}{n_i - 1} s_i^2 \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{E_j}^2 = \frac{n_j}{n_j - 1} s_j^2 \quad (2.13)$$

Une valeur $u_{i,j}$ de la variable aléatoire $U_{i,j}$ est calculée.

$$u_{i,j} = \frac{\left| \bar{e}_i - \bar{e}_j \right|}{\sqrt{\frac{s_i^2}{n_i - 1} + \frac{s_j^2}{n_j - 1}}} \quad (2.14)$$

Par ailleurs, pour un risque d'erreur α fixé, on obtient une valeur u_α telle que :

$$u_\alpha = F_U^{-1}(\alpha) \quad (2.15)$$

où F_U^{-1} est la fonction réciproque de la fonction de répartition F_U de la normale réduite. u_α est lue sur la table de la loi normale réduite.

Si $u_{i,j} > u_\alpha$, l'hypothèse H_0 est rejetée au risque d'erreur α . On peut conclure, avec une probabilité $1 - \alpha$, que $m_{E_i} \neq m_{E_j}$. L'essence de numéro d'ordre i ne peut être, à ce stade, affectée au groupe G_j .

Si $u_{i,j} \leq u_\alpha$, l'hypothèse H_0 est acceptée : les deux échantillons sont extraits de deux populations ayant la même espérance. On peut alors admettre que la différence observée entre \bar{e}_i et \bar{e}_j est due à des fluctuations aléatoires qu'il est impossible de supprimer entièrement. Partant, l'essence de numéro d'ordre i est affectée au groupe G_j . Car, au risque d'erreur α , la moyenne m_{E_i} n'est pas alors significativement différente de la moyenne m_{E_j} .

Si on ne parvient pas à affecter l'essence de numéro d'ordre i dans un groupe G_j , on augmente progressivement le risque d'erreur α et on reprend le test d'hypothèse jusqu'à obtention de l'acceptation de l'hypothèse H_0 pour un groupe G_j exclusif.

En d'autres termes, pour une essence de numéro d'ordre i , on calcule les quatre réels suivants :

$$d_{i,j} = \frac{\left(\bar{e}_i - \bar{e}_j \right)}{\sqrt{\frac{s_i^2}{n_i - 1} + \frac{s_j^2}{n_j - 1}}}, \quad j \in \{1;2;3;4\} \quad (2.16)$$

L'un de ces trois réels est tel que : $|d_{i,j}|$ soit minimale. C'est ce réel qui fixe l'appartenance de l'essence de numéro d'ordre i au groupe G_j .

2.5 Estimation statistique de la valeur caractéristique.

Le but est d'exposer clairement les bases théoriques sur lesquelles s'appuient nos investigations pour la détermination des valeurs caractéristiques de dimensionnement pour le bois de structure. Les paramètres statistiques et les hypothèses qui sous-tendent la procédure d'estimation du quantile à $100\alpha\%$ d'exclusion inférieure seront explicités. La propriété mécanique prise en compte ici est le module d'élasticité E d'une essence ou d'un groupe d'essences, les assertions restant valables *mutatis mutandis* pour le module de rupture, la masse volumique, etc.

La valeur caractéristique e_α du MOE E d'une population est telle que la probabilité pour que E soit plus petit que e_α vaut une probabilité donnée, notée α (Figure 2.12)

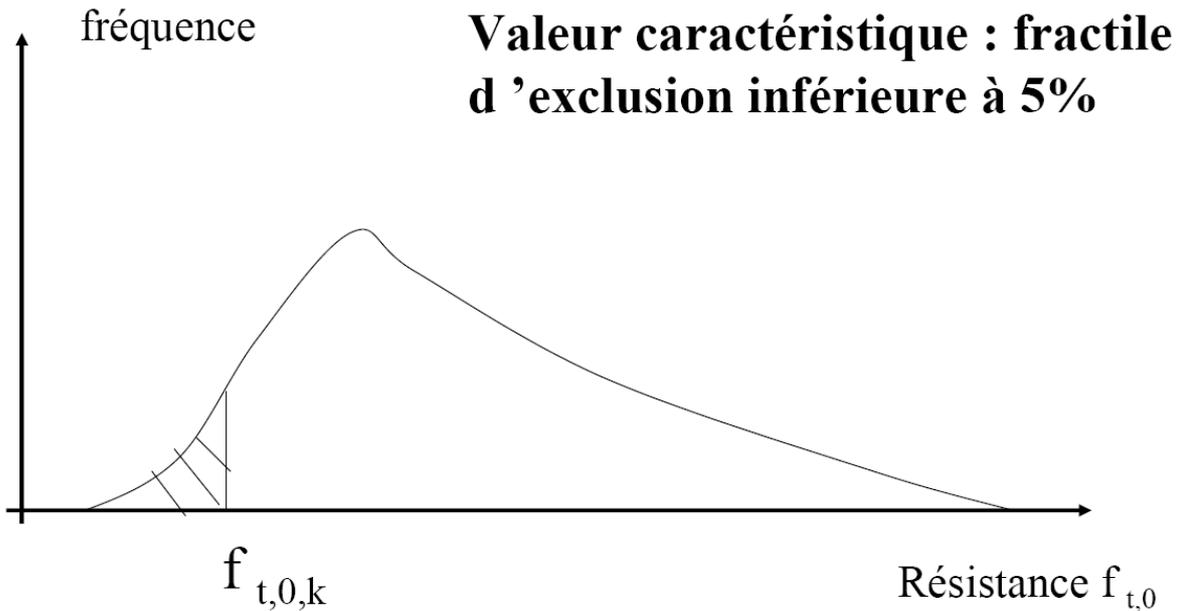


Figure 2.12: Illustration de la notion de fractile d'exclusion inférieure.

L'objectif est d'estimer la limite supérieure e_α telle qu'une proportion α des réalisations de E soient inférieures à e_α . Par exemple, une limite supérieure e_α telle que $\alpha = 0.05$ décrit une situation où 5% de la population est au-dessous de e_α . La variabilité des résultats expérimentaux ne permet pas d'avoir une lecture déterministe de la valeur caractéristique. Une estimation statistique est donc nécessaire. Elle permet d'apprécier la valeur caractéristique avec un certain niveau de confiance.

S'il est trivial que les paramètres de la loi de distribution de la variable aléatoire E sont inconnus, il est toutefois nécessaire de formuler l'hypothèse d'un modèle de densité de probabilité qui ajuste au mieux les valeurs expérimentales. Aussi, considérera-t-on les cas où la variable aléatoire E suit tour à tour une loi normale et une loi lognormale.

La valeur caractéristique e_α dépend de la loi de distribution de la variable aléatoire E . En effet,

$$P[E < e_\alpha] = \alpha \quad (2.17)$$

Donc,

$$F_E(e_\alpha) = \alpha \quad (2.18)$$

Où F_E est la fonction de répartition de la variable aléatoire E . F_E est une bijection de $I \subset \mathbb{R}$ vers l'intervalle $J =]0;1[$; elle admet donc une bijection réciproque F_E^{-1} . En composant les deux membres de l'équation (2) par F_E^{-1} , on obtient l'équation suivante :

$$e_\alpha = F_E^{-1}(\alpha). \quad (2.19)$$

Dans ce cas trivial où la loi de distribution de E et ses paramètres (moyenne et écart-type) sont connus, on peut connaître la fonction de répartition F_E et calculer la valeur exacte de e_α .

Ce cas qui ne laisse transparaitre aucune difficulté est utopique. Car les valeurs de la moyenne m_E et de l'écart type σ_E sont inconnues en pratique ; on ne peut que les estimer à partir d'un *échantillon empirique* de la variable aléatoire E. Il s'agit d'un ensemble de résultats expérimentaux $e_1, e_2, \dots, e_n, \dots$ réalisés dans la détermination de E. On peut considérer ces mesures comme les réalisations d'un *échantillon aléatoire* constitué par des variables aléatoires $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$ indépendantes et identiquement distribuées.

Ainsi, au lieu d'obtenir la valeur exacte e_α de la valeur caractéristique, seule une estimation est possible. L'estimateur de la valeur caractéristique est lui-même une variable aléatoire que l'on note \hat{E}_α . La probabilité pour que l'estimateur \hat{E}_α soit moins grand que la vraie valeur e_α peut être calculée numériquement. On obtient un estimateur escompté (sans biais notamment) de la valeur caractéristique en contrôlant la probabilité

$$P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]. \quad (2.20)$$

La valeur caractéristique dépend fortement de la loi de distribution de la variable aléatoire E. Par conséquent, son estimateur à partir d'un échantillon empirique dépend aussi de la loi de distribution de la variable aléatoire E. Nous limiterons nos investigations à la loi normale.

2.5.1 Estimation de la valeur caractéristique pour une variable aléatoire distribuée suivant une loi normale.

Soit E une variable aléatoire distribuée suivant une loi normale $N(m_E ; \sigma_E^2)$.

La densité de probabilité de E est

$$f_E(x) = \frac{1}{\sigma_E \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_E)^2}{2\sigma_E^2}} \quad (2.21)$$

La justification de l'hypothèse de normalité de E peut se faire à partir d'un échantillon empirique, moyennant des tests de normalité. Et, comme la variable aléatoire E ne peut prendre une valeur négative en pratique, on choisira m_E et σ_E tels que $P[E < 0]$ soit négligeable.

Lorsque la taille de l'échantillon est élevée ($n \geq 50$), le « Théorème Central Limite » permet d'affirmer que la statistique \bar{E} suit une loi normale proche de $N(m_E ; \frac{\sigma_E^2}{n})$ quelle que soit la distribution de la variable aléatoire E. Il s'énonce comme suit :

Soient $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$ une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées.

Supposons que $E[E_i]=m_E$ et $Var[E_i]=\sigma_E^2$ existent. Si $S_n=E_1+E_2+\dots+E_n$, alors la loi de probabilité de la somme réduite $S_n^* = \frac{(S_n - n.m_E)}{\sigma_E \sqrt{n}}$ converge vers la loi normale réduite.

Autrement dit, la somme d'un grand nombre de fluctuations aléatoires indépendantes obéit, sous des conditions assez générales, à une distribution proche d'une distribution normale. L'espérance mathématique est un paramètre de position qui nous renseigne sur l'ordre de grandeur des valeurs prises par la variable aléatoire E, tandis que la variance est une mesure de la dispersion de ces valeurs autour de leur moyenne.

$$E[E]=m_E = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_E(x) dx ; \quad Var[E]=\sigma_E^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_E)^2 f_E(x) dx \quad (2.22)$$

La variable aléatoire U définie par :

$$U = \frac{E - m_E}{\sigma_E} \quad (2.23)$$

Suit une loi normale réduite $N(0 ; 1)$.

Le graphe de $f_U(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{[-x^2/2]}$, $-\infty < x < +\infty$, est une courbe en cloche symétrique par rapport à l'axe des ordonnées et dont les deux points d'inflexion ont pour abscisses +1 et -1.

Transformons l'équation (2.17) en centrant et en réduisant la variable aléatoire E afin de faire apparaître la variable aléatoire centrée réduite U.

$$P[E < e_\alpha] = \alpha \Rightarrow P\left[\frac{E - m_E}{\sigma_E} < \frac{e_\alpha - m_E}{\sigma_E}\right] = \alpha \quad (2.24)$$

$$\Rightarrow P\left[U < \frac{e_\alpha - m_E}{\sigma_E}\right] = \alpha$$

$$\Rightarrow F_U\left(\frac{e_\alpha - m_E}{\sigma_E}\right) = \alpha$$

$$\Rightarrow F_U^{-1} \circ F_U\left(\frac{e_\alpha - m_E}{\sigma_E}\right) = F_U^{-1}(\alpha)$$

$$\Rightarrow \frac{e_\alpha - m_E}{\sigma_E} = F_U^{-1}(\alpha)$$

$$\Rightarrow e_\alpha = m_E + \sigma_E F_U^{-1}(\alpha) \quad (2.25)$$

où F_U est la fonction de répartition de la normale réduite et F_U^{-1} la fonction réciproque de F_U .

Cette équation (13) est d'une grande importance dans la détermination des valeurs caractéristiques. Car, le réel $F_U^{-1}(\alpha)$ est indépendant des paramètres m_E et σ_E .

2.5.1.1 Estimation simple de la valeur caractéristique et calcul de $P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]$.

En pratique, la variable aléatoire E suit une distribution supposée normale où la population n'est pas connue de manière exhaustive et où la moyenne m_E et la variance σ_E^2 sont inconnus. On convient de les remplacer dans l'équation (2.25) par leurs estimateurs à partir d'un échantillon empirique \bar{E} et S^2 (voir équations (2.7) et (2.8)). Dans cette situation, un estimateur simple \hat{E}_α de la valeur caractéristique peut être obtenu par l'équation

$$\hat{E}_\alpha = \bar{E} + S.F_U^{-1}(\alpha). \quad (2.26)$$

Connaissant une réalisation \bar{e} de \bar{E} et une réalisation s de S , on calcule une valeur numérique \hat{e}_α de \hat{E}_α .

$$\hat{e}_\alpha = \bar{e} + s.F_U^{-1}(\alpha). \quad (2.27)$$

Une valeur particulière et couramment utilisée de $F_U^{-1}(\alpha)$ est

$$F_U^{-1}(0.05) = -1.645.$$

L'estimation simple est assez naïve. Car le facteur de correction est indépendant de la taille de l'échantillon ! Pratiquement, pour que cet estimateur \hat{E}_α soit fiable, il faut un échantillon de très grande taille ($n \rightarrow +\infty$).

Il est convenable que la variable aléatoire \hat{E}_α soit étudiée en prenant toujours en compte la vraie valeur e_α . Ainsi, la probabilité suivante doit être recherchée.

$$P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha] \quad (2.28)$$

On transforme cette expression en utilisant les seconds membres des équations (26) et (27).

$$P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha] = P[\bar{E} + S.F_U^{-1}(\alpha) < m_E + \sigma_E.F_U^{-1}(\alpha)] = P\left[\frac{\bar{E} - m_E}{\sigma_E} + \frac{S}{\sigma_E} F_U^{-1}(\alpha) < F_U^{-1}(\alpha)\right].$$

D'après le théorème central limite, $m_{\bar{E}} = m_E$ et $\sigma_{\bar{E}} = \frac{\sigma_E}{\sqrt{n}}$. Donc,

$$P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha] = P\left[\frac{\bar{E} - m_{\bar{E}}}{\sqrt{n}\sigma_{\bar{E}}} + \frac{S}{\sigma_E} F_U^{-1}(\alpha) < F_U^{-1}(\alpha)\right] = P\left[\frac{U}{\sqrt{n}} + \frac{S}{\sigma_E} F_U^{-1}(\alpha) < F_U^{-1}(\alpha)\right].$$

Posons $\frac{S}{\sigma_E} F_U^{-1}(\alpha) = V$ et définissons une nouvelle variable aléatoire Z telle que

$$Z = \frac{U}{\sqrt{n}} + V.$$

Il vient,

$$P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha] = P[Z < F_U^{-1}(\alpha)].$$

D'où,

$$P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha] = F_Z[F_U^{-1}(\alpha)] \quad (2.29)$$

où F_Z est la fonction de répartition de la variable aléatoire Z . On voit immédiatement que l'expression (16) est la fonction de répartition de la variable aléatoire Z au point d'abscisse $F_U^{-1}(\alpha)$. Il suffit de connaître la fonction de répartition F_Z pour avoir $P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]$.

La densité de probabilité de la variable aléatoire Z est obtenue à partir des densités de probabilité des variables aléatoires $\frac{U}{\sqrt{n}}$ et V .

Comme U suit une loi normale réduite $N(0; 1)$, alors $\frac{U}{\sqrt{n}}$ suit une loi normale $N(0; \frac{1}{n})$ de moyenne nulle et d'écart type $\frac{1}{\sqrt{n}}$. Donc,

$$f_{\frac{U}{\sqrt{n}}}(u) = \sqrt{\frac{n}{2\pi}} \cdot e^{-\frac{nu^2}{2}}, \quad -\infty < u < +\infty. \quad (2.30)$$

Quant à la variable aléatoire V , on a :

$$V = \frac{S}{\sigma_E} F_U^{-1}(\alpha) = F_U^{-1}(\alpha) \sqrt{\frac{S^2}{\sigma_E^2}} = \frac{F_U^{-1}(\alpha)}{\sqrt{n-1}} \sqrt{(n-1) \frac{S^2}{\sigma_E^2}}.$$

On remarque que le signe de V dépend du signe de $F_U^{-1}(\alpha)$. Si $F_U^{-1}(\alpha) < 0$, V est négatif, sinon il est positif.

Comme la statistique $(n-1) \frac{S^2}{\sigma_E^2}$ suit une loi de *khi-deux* à $n-1$ degrés de libertés (A. RUEGG, 1988), la variable aléatoire V peut donc être dérivée de la *khi-deux* à $n-1$ degrés de liberté.

La densité de probabilité correspondant à la loi de *khi-deux* à v degrés de liberté est :

$$f_{x^2(v)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{\frac{v}{2}} \Gamma(\frac{v}{2})} x^{\frac{v}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} & \text{pour } x \geq 0. \\ 0 & \text{pour } x < 0. \end{cases} \quad (2.31)$$

Partant de l'équation (19) et en utilisant la transformation des densités (G. Turk, D. Zupan), On obtient la densité de probabilité de la variable aléatoire V .

$$f_V(v) = \frac{2}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left[\frac{n-1}{2(F_U^{-1}(\alpha))} \right]^{\frac{n-1}{2}} |v|^{n-2} e^{-\frac{n-1}{2(F_U^{-1}(\alpha))^2} v^2} \quad (2.32)$$

La densité de probabilité de la variable aléatoire Z est (G. Turk, D. Zupan),

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_V(v) f_U\left(\frac{z-v}{\sqrt{n}}\right) dv \quad (2.33)$$

Donc,

$$f_Z(z) = \begin{cases} \int_{-\infty}^0 \frac{2}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \sqrt{\frac{n}{2\pi}} k^{\frac{n-1}{2}} (-v)^{n-2} e^{-kv^2} e^{-\frac{n}{2}(z-v)^2} dv & \text{pour } F_U^{-1}(\alpha) < 0 \\ \int_{-\infty}^0 \frac{2}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \sqrt{\frac{n}{2\pi}} k^{\frac{n-1}{2}} v^{n-2} e^{-kv^2} e^{-\frac{n}{2}(z-v)^2} dv & \text{pour } F_U^{-1}(\alpha) \geq 0. \end{cases} \quad (2.34)$$

où le paramètre $k = \frac{n-1}{2[F_U^{-1}(\alpha)]^2}$.

La fonction de répartition F_Z est définie par intégration

$$F_Z(z) = \int_{-\infty}^z f_Z(\tilde{z}) d\tilde{z}. \quad (2.35)$$

Cette relation (2.35) permet de résoudre l'équation (2.29)

$$P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha] = F_Z[F_U^{-1}(\alpha)]$$

Au stade actuel, on peut donc calculer la probabilité $P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]$ pour une distribution normale de la variable aléatoire E quelques soient la probabilité α et la taille n de l'échantillon.

Quelques résultats obtenus par le logiciel MATLAB 6.5.1 sont rangés dans le tableau 1.

Tableau 2.1: $P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]$ pour quelques valeurs usuelles de n et de α .

α	n	3	4	5	6	7	8	10	100
0.10		0.415	0.432	0.442	0.449	0.453	0.457	0.462	0.489
0.05		0.402	0.421	0.433	0.440	0.446	0.450	0.456	0.487
0.01		0.387	0.409	0.422	0.431	0.437	0.442	0.449	0.485

Comme $P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]$ est autour de 0.5. Cependant, pour des échantillons de faible taille, cette probabilité est encore plus faible. On tend d'autant plus vers 0.5 que la taille de l'échantillon augmente indéfiniment.

Par exemple, pour $\alpha=0.05$ qui est la valeur la plus communément utilisée pour la détermination de la valeur caractéristique, un échantillon de trois éléments donne une probabilité $P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]=0.402$. Autrement dit, dans 59,8% des cas, la valeur estimée \hat{E}_α sera plus grande que la valeur réelle e_α pour un tel échantillon.

En exploitant la symétrie de la loi normale, on peut obtenir les probabilités des valeurs très élevées de α (0.90, 0.95, 0.99, 0.999,...). En effet,

$$P[\hat{E}_{1-\alpha} < e_{1-\alpha}] = 1 - P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha] \quad (2.36)$$

2.5.1.2 Estimation par intervalle.

L'estimateur de la valeur caractéristique peut être donné à un seuil de confiance donné. Pour ce faire, on impose que la probabilité de la relation (16) vaille une valeur donnée à l'avance.

Reformulons le problème ainsi : soit une probabilité arbitraire α_λ telle que l'estimateur $\hat{E}_{\alpha,\lambda}$ de la valeur caractéristique e_α soit tel que la probabilité d'avoir $\hat{E}_{\alpha,\lambda} < e_\alpha$ soit égale à $1-\alpha_\lambda$ quelques soient α et n.

$$P[\hat{E}_{\alpha,\lambda} < e_\alpha] = 1 - \alpha_\lambda. \quad (2.37)$$

L'intervalle de confiance unilatéral $\left[\hat{E}_{\alpha,\lambda}; +\infty \right]$ de la valeur caractéristique e_α spécifie la crédibilité de l'estimation. Il recouvre, avec une probabilité donnée $1-\alpha_\lambda$, la vraie valeur inconnue e_α .

La probabilité $1-\alpha_\lambda$ associée à cette estimation par intervalle est appelée *niveau de confiance* ou *seuil de confiance*.

Autrement dit, l'estimateur $\hat{E}_{\alpha,\lambda}$ devra être au plus égal à la valeur caractéristique e_α avec un niveau de confiance de $1-\alpha_\lambda$.

A partir d'un échantillon empirique, l'objectif poursuivi est d'estimer une valeur limite $\hat{E}_{\alpha,\lambda}$ au dessous de laquelle une portion α de la population se situe avec un niveau de confiance de $1-\alpha_\lambda$. Le choix de $1-\alpha_\lambda$ dépend naturellement de la nature du problème étudié. Les valeurs les plus souvent utilisées de $1-\alpha_\lambda$ sont : 0.90, 0.95, 0.99, 0.999.

Chaque réalisation de la statistique $\hat{E}_{\alpha,\lambda}$ donne lieu à un intervalle de confiance numérique $\left[\hat{e}_{\alpha,\lambda}; +\infty \right[$. La notion niveau de confiance est alors à interpréter dans le sens

suitant : si l'on effectue un grand nombre de réalisations de la statistique $\hat{E}_{\alpha,\lambda}$, alors, la vraie valeur caractéristique inconnue e_α sera supérieure dans environ $100(1-\alpha_\lambda)\%$ des intervalles $\left[\hat{e}_{\alpha,\lambda}; +\infty \right[$ ainsi obtenus.

Reformulons l'équation (2.26) et remplaçons le réel $F_U^{-1}(\alpha)$ par le paramètre λ .

$$\hat{E}_{\alpha,\lambda} = \bar{E} + \lambda S. \quad (2.38)$$

Il suffit de connaître une valeur appropriée du paramètre λ pour calculer une valeur numérique $\hat{e}_{\alpha,\lambda}$ à partir d'un échantillon empirique.

$$\hat{e}_{\alpha,\lambda} = \bar{e} + \lambda s \quad (2.39)$$

Le paramètre λ est un facteur de correction. Il est déterminé de telle manière que

$$P[\hat{E}_{\alpha,\lambda} < e_\alpha] = 1 - \alpha_\lambda.$$

En tenant compte de la relation (25), cette probabilité peut encore s'écrire :

$$P[\bar{E} + \lambda S < e_\alpha] = 1 - \alpha_\lambda. \quad (2.40)$$

Dans la suite, on remplace e_α par le second membre de l'équation (2.25) et on réorganise le premier membre de l'équation (2.40) dans le dessein de faire apparaître la fonction de répartition F_{Z_λ} d'une variable aléatoire Z_λ .

$$P[\bar{E} + \lambda S < e_\alpha] = P[\bar{E} + \lambda S < m_E + \sigma_E F_U^{-1}(\alpha)] = P\left[\frac{\bar{E} - m_E}{\sigma_E} + \frac{S}{\sigma_E} \lambda < F_U^{-1}(\alpha)\right].$$

D'après le théorème central limite, $m_{\bar{E}} = m_E$ et $\sigma_{\bar{E}} = \frac{\sigma_E}{\sqrt{n}}$. Donc,

$$P\left[\frac{\bar{E} - m_E}{\sigma_E} + \frac{S}{\sigma_E} \lambda < F_U^{-1}(\alpha)\right] = P\left[\frac{\bar{E} - m_{\bar{E}}}{\sqrt{n}\sigma_{\bar{E}}} + \frac{S}{\sigma_E} \lambda < F_U^{-1}(\alpha)\right] = P\left[\frac{U}{\sqrt{n}} + \frac{S}{\sigma_E} \lambda < F_U^{-1}(\alpha)\right].$$

Posons $\frac{S}{\sigma_E} \lambda = V_\lambda$ et définissons une nouvelle variable aléatoire Z_λ telle que

$$Z_\lambda = \frac{U}{\sqrt{n}} + V_\lambda.$$

Il vient,

$$P[\bar{E} + \lambda S < e_\alpha] = P[Z_\lambda < F_U^{-1}(\alpha)].$$

D'où,

$$1 - \alpha_\lambda = P[\hat{E}_{\alpha, \lambda} < e_\alpha] = F_{Z_\lambda}[F_U^{-1}(\alpha)] \quad (2.41)$$

où F_{Z_λ} est la fonction de répartition de la variable aléatoire Z_λ . On voit immédiatement que l'expression (2.41) est la fonction de répartition de la variable aléatoire Z_λ au point d'abscisse $F_U^{-1}(\alpha)$. L'équation (2.41) permet de déterminer les valeurs appropriées du facteur λ . Pour cela, il suffit de connaître la fonction de répartition F_{Z_λ} .

La densité de probabilité de la variable aléatoire Z_λ est analogue à celle de la variable aléatoire Z (équation (2.34)) où le paramètre k est remplacé par le paramètre k_λ .

$$k_\lambda = \frac{n-1}{2\lambda^2}.$$

La fonction de répartition F_{Z_λ} est définie par intégration

$$F_{Z_\lambda}(z_\lambda) = \int_{-\infty}^{z_\lambda} f_{Z_\lambda}(\tilde{z}) d\tilde{z}. \quad (2.42)$$

Au stade actuel, l'équation (2.41)

$$F_{Z_\lambda}[F_U^{-1}(\alpha)] = 1 - \alpha_\lambda$$

a comme seule inconnue le paramètre λ , les valeurs de n , α , et α_λ étant données. La résolution de cette équation permet d'obtenir la valeur appropriée du facteur de correction λ .

Et, partant, de calculer une valeur numérique $\hat{e}_{\alpha, \lambda}$ recherchée de l'estimateur $\hat{E}_{\alpha, \lambda}$ de la vraie valeur e_α de la valeur caractéristique à partir d'un échantillon empirique (équation (2.39))

Quelques résultats des valeurs de λ obtenus par le logiciel MATLAB 6.5.1. sont consignés dans le *Tableau 2.2* pour une valeur fixe de $\alpha = 0.05$ et pour différentes valeurs de α_λ et n .

Tableau 2.2: Facteur de correction λ pour un échantillon de taille n et les probabilités α_λ et $\alpha = 0.05$

n	3	4	5	6	7	8	10	100
α_λ								
0.50	1.938	1.830	1.780	1.750	1.732	1.719	1.702	1.650
0.10	5.311	3.957	3.400	3.092	2.894	2.754	2.568	1.861
0.05	7.656	5.144	4.203	3.708	3.400	3.187	2.911	1.927
0.01	17.370	9.083	6.578	5.406	4.728	4.285	3.738	2.056

Notons que $\alpha_\lambda = 0.5$ est le cas particulier où e_α est la médiane de la variable aléatoire $\hat{E}_{\alpha,\lambda}$. On peut aussi remarquer que, pour $\alpha_\lambda = 0.5$ et n augmentant indéfiniment ($n \rightarrow +\infty$), la valeur de λ converge vers $F_U^{-1}(0.05) = -1.645$ qui est le facteur de correction remplaçant λ dans le cas d'une estimation simple (voir équation (2.26)).

2.5.1.3 Estimation sans biais de la valeur.

Reformulons l'équation (14) et remplaçons le réel $F_U^{-1}(\alpha)$ par le paramètre ε .

$$\hat{E}_{\alpha,\varepsilon} = \bar{E} + \varepsilon S \quad (2.43)$$

Comme précédemment, il suffit de connaître une valeur appropriée du paramètre ε pour calculer une valeur numérique $\hat{e}_{\alpha,\varepsilon}$ à partir d'un échantillon empirique.

$$\hat{e}_{\alpha,\varepsilon} = \bar{e} + \varepsilon S \quad (2.44)$$

Le paramètre ε est un facteur de correction. Il est déterminé de telle manière que l'estimateur $\hat{E}_{\alpha,\varepsilon}$ de la valeur caractéristique e_α soit sans biais c'est-à-dire que

$$E[\hat{E}_{\alpha,\varepsilon}] = e_\alpha \quad (2.45)$$

En tenant compte de la relation (2.43), cette équation (2.45) peut encore s'écrire :

$$E[\bar{E} + \varepsilon S] = e_\alpha$$

Dans la suite, on remplace e_α par le second membre de l'équation (2.25) et on réorganise le premier membre dans le dessein de faire apparaître la densité de probabilité f_{Z_ε} d'une variable aléatoire Z_ε .

$$E[\bar{E} + \varepsilon S] = m_E + \sigma_E F_U^{-1}(\alpha).$$

Comme l'espérance mathématique est un opérateur linéaire (voir équation (2.22)), cette dernière équation peut encore s'écrire :

$$E\left[\frac{\bar{E} - m_E}{\sigma_E} + \frac{S}{\sigma_E} \varepsilon\right] = F_U^{-1}(\alpha)$$

D'après le théorème central limite, $m_{\bar{E}} = m_E$ et $\sigma_{\bar{E}} = \frac{\sigma_E}{\sqrt{n}}$. Donc,

$$E\left[\frac{\bar{E} - m_E}{\sigma_E} + \frac{S}{\sigma_E} \varepsilon\right] = E\left[\frac{\bar{E} - m_{\bar{E}}}{\sqrt{n}\sigma_{\bar{E}}} + \frac{S}{\sigma_E} \varepsilon\right] = E\left[\frac{U}{\sqrt{n}} + \frac{S}{\sigma_E} \varepsilon\right] = F_U^{-1}(\alpha)$$

Posons $\frac{S}{\sigma_E} \varepsilon = V_\varepsilon$ et définissons une nouvelle variable aléatoire Z_ε telle que

$$Z_\varepsilon = \frac{U}{\sqrt{n}} + V_\varepsilon.$$

Il vient,

$$E[Z_\varepsilon] = F_U^{-1}(\alpha).$$

Par ailleurs,

$$E[Z_\varepsilon] = \int_{-\infty}^{+\infty} t f_{Z_\varepsilon}(t) dt$$

où f_{Z_ε} est la densité de probabilité de la variable aléatoire Z_ε .

D'où l'équation suivante

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t f_{Z_\varepsilon}(t) dt = F_U^{-1}(\alpha) \quad (2.46)$$

La densité de probabilité f_{Z_ε} de la variable aléatoire Z_ε est analogue à celle de la variable aléatoire Z (équation (2.34)) où le paramètre k est remplacé par le paramètre k_ε .

$$k_\varepsilon = \frac{n-1}{2\varepsilon^2}.$$

L'équation (2.46) a comme seule inconnue le paramètre ε , les valeurs de n , et α étant données. La résolution de cette équation permet d'obtenir la valeur appropriée du facteur de correction ε . Et, partant, de calculer une valeur numérique $\hat{e}_{\alpha,\varepsilon}$ recherchée de l'estimateur $\hat{E}_{\alpha,\lambda}$ de la vraie valeur e_α de la valeur caractéristique à partir d'un échantillon empirique (équation (2.44))

Quelques résultats des valeurs de ε obtenus par le logiciel MATLAB 6.5.1. sont consignés dans le *Tableau 2.3* pour différentes valeurs de α et n .

Tableau 2.3: Facteur de correction - ε pour une estimation sans biais.

α	n	3	4	5	6	7	8	10	100
0.10		1.446	1.391	1.363	1.347	1.336	1.328	1.318	1.285
0.05		1.856	1.785	1.750	1.729	1.715	1.705	1.691	1.649
0.01		2.625	2.525	2.475	2.445	2.425	2.411	2.392	2.332

Les valeurs de ε pour des probabilités très élevées de α (0.90, 0.95, 0.99, 0.999,...) sont obtenues en multipliant les valeurs correspondantes de $1-\alpha$ par -1.

2.5.2 Estimation de la valeur caractéristique pour une variable aléatoire distribuée suivant une loi lognormale.

En génie Civil, les grandeurs estimées sont généralement positives. Or la loi normale $N(m_X; \sigma_X^2)$ suppose que la variable aléatoire X peut prendre des valeurs négatives (même si un choix approprié des paramètres permet de négliger cette probabilité). On lui préfère la loi

lognormale compte tenu de son adéquation évidente aux variables aléatoires ne pouvant prendre des valeurs négatives.

Pour étudier la *loi de distribution lognormale*, on utilise la relation entre la variable aléatoire E qui suit par hypothèse une loi *lognormale* $N(m_E ; \sigma_E^2)$ et une variable aléatoire X qui suit une loi normale $N(m_X ; \sigma_X^2)$:

$$E = e^X ; \quad X = \ln E \quad (2.47)$$

Les relations entre les moyennes et les écart types des deux variables sont :

$$m_X = \ln \left(\frac{m_E^2}{\sqrt{\sigma_E^2 + m_E^2}} \right) ; \quad \sigma_X^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_E^2}{m_E^2} \right). \quad (2.48)$$

Transformons l'équation (1) en centrant et en réduisant la variable aléatoire E afin de faire apparaître la variable aléatoire centrée réduite U .

$$\begin{aligned} P[E < e_\alpha] = \alpha &\Rightarrow P[\ln E < \ln e_\alpha] = \alpha \\ &\Rightarrow P[X < \ln e_\alpha] = \alpha \\ &\Rightarrow P\left[\frac{X - m_X}{\sigma_X} < \frac{\ln e_\alpha - m_X}{\sigma_X} \right] = \alpha. \\ &\Rightarrow P\left[U < \frac{\ln e_\alpha - m_X}{\sigma_X} \right] = \alpha \\ &\Rightarrow F_U \left(\frac{\ln e_\alpha - m_X}{\sigma_X} \right) = \alpha \\ &\Rightarrow F_U^{-1} \circ F_U \left(\frac{\ln e_\alpha - m_X}{\sigma_X} \right) = F_U^{-1}(\alpha) \\ &\Rightarrow \frac{\ln e_\alpha - m_X}{\sigma_X} = F_U^{-1}(\alpha) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \ln e_\alpha = m_X + \sigma_X F_U^{-1}(\alpha)$$

$$\Rightarrow e_\alpha = e^{m_X + \sigma_X F_U^{-1}(\alpha)}$$

$$\Rightarrow e_\alpha = e^{m_X} e^{\sigma_X F_U^{-1}(\alpha)}$$

$$\Rightarrow e_\alpha = e^{\ln \left(\frac{m_E^2}{\sqrt{\sigma_E^2 + m_E^2}} \right)} e^{F_U^{-1}(\alpha) \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_E^2}{m_E^2} \right)}} \quad (\text{voir équation (2.48)})$$

$$\Rightarrow e_\alpha = \frac{m_E^2}{\sqrt{\sigma_E^2 + m_E^2}} e^{F_U^{-1}(\alpha) \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_E^2}{m_E^2} \right)}} \quad (2.49)$$

où F_U est la fonction de répartition de la normale réduite et F_U^{-1} la fonction réciproque de F_U .

Cette équation (37) est d'une grande importance dans la détermination des valeurs caractéristiques. Car, le réel $F_U^{-1}(\alpha)$ est indépendant des paramètres m_E et σ_E .

2.5.2.1 Estimation simple de la valeur caractéristique.

En pratique, la variable aléatoire E suit une distribution supposée *lognormale* où la population n'est pas connue de manière exhaustive et où la moyenne m_E et la variance σ_E^2 sont inconnus. On convient de les remplacer dans l'équation (2.49) par leurs estimateurs à partir d'un échantillon empirique \bar{E} et S^2 (voir équations (2.51) et (2.52)). Dans cette situation, un estimateur simple \hat{E}_α de la valeur caractéristique peut être obtenu par l'équation

$$\hat{E}_\alpha = \frac{(\bar{E})^2}{\sqrt{S^2 + (\bar{E})^2}} e^{F_U^{-1}(\alpha) \sqrt{\ln\left(1 + \frac{S^2}{(\bar{E})^2}\right)}} \quad (2.50)$$

Connaissant une réalisation \bar{e} de \bar{E} et une réalisation s de S , on calcule une valeur numérique \hat{e}_α de \hat{E}_α .

$$\hat{e}_\alpha = \frac{(\bar{e})^2}{\sqrt{s^2 + (\bar{e})^2}} e^{F_U^{-1}(\alpha) \sqrt{\ln\left(1 + \frac{s^2}{(\bar{e})^2}\right)}} \quad (2.51).$$

Une valeur particulière et couramment utilisée de $F_U^{-1}(\alpha)$ est

$$F_U^{-1}(0.05) = -1.645.$$

L'estimation simple est assez naïve. Car le facteur de correction est indépendant de la taille de l'échantillon ! Pratiquement, pour que cet estimateur \hat{E}_α soit fiable, il faut un échantillon de très grande taille ($n \rightarrow +\infty$).

2.5.2.2 Estimation par intervalle.

L'estimateur de la valeur caractéristique peut être donné à un seuil de confiance donné. Reformulons l'équation (2.50) et remplaçons le réel $F_U^{-1}(\alpha)$ par le paramètre λ .

$$\hat{E}_{\alpha,\lambda} = \frac{(\bar{E})^2}{\sqrt{S^2 + (\bar{E})^2}} e^{\lambda \sqrt{\ln\left(1 + \frac{S^2}{(\bar{E})^2}\right)}} \quad (2.52)$$

Il suffit de connaître une valeur appropriée du paramètre λ pour calculer une valeur numérique $\hat{e}_{\alpha,\lambda}$ à partir d'un échantillon empirique.

$$\hat{e}_{\alpha,\lambda} = \frac{(\bar{e})^2}{\sqrt{S^2 + (\bar{e})^2}} e^{\lambda \sqrt{\ln \left(1 + \frac{S^2}{(\bar{e})^2} \right)}} \quad (2.53)$$

Le paramètre λ est un facteur de correction. Il est déterminé de telle manière que

$$P[\hat{E}_{\alpha,\lambda} < e_{\alpha}] = 1 - \alpha_{\lambda}.$$

Or,

$$\begin{aligned} P[\hat{E}_{\alpha,\lambda} < e_{\alpha}] = 1 - \alpha_{\lambda} &\Rightarrow P[\ln \hat{E}_{\alpha,\lambda} < \ln e_{\alpha}] = 1 - \alpha_{\lambda}. \\ &\Rightarrow P[\ln \hat{E}_{\alpha,\lambda} < \ln e_{\alpha}] = 1 - \alpha_{\lambda} \\ &\Rightarrow P[X_{\alpha,\lambda} < \ln e_{\alpha}] = 1 - \alpha_{\lambda}. \\ &\Rightarrow P[\bar{X} + \lambda S < m_X + \sigma_X F_U^{-1}(\alpha)] = 1 - \alpha_{\lambda} \\ &\Rightarrow P\left[\frac{\bar{X} - m_X}{\sigma_X} + \frac{S}{\sigma_X} \lambda < F_U^{-1}(\alpha)\right] = 1 - \alpha_{\lambda} \\ &\Rightarrow P\left[\frac{\bar{X} - m_{\bar{X}}}{\sqrt{n}\sigma_{\bar{X}}} + \frac{S}{\sigma_X} \lambda < F_U^{-1}(\alpha)\right] = 1 - \alpha_{\lambda} \\ &\Rightarrow P\left[\frac{U}{\sqrt{n}} + \frac{S}{\sigma_X} \lambda < F_U^{-1}(\alpha)\right] = 1 - \alpha_{\lambda} \\ &\Rightarrow F_{Z_{\lambda}}[F_U^{-1}(\alpha)] = 1 - \alpha_{\lambda} \end{aligned} \quad (2.54)$$

où Z_{α} est la variable aléatoire précédemment décrite à l'équation (2.41).

Partant, les solutions du paramètre λ sont les mêmes que dans le cas de la distribution normale et les résultats du tableau 2 sont valables.

2.5.2.3 Estimation sans biais de la valeur caractéristique.

Reformulons l'équation (2.50) et remplaçons le réel $F_U^{-1}(\alpha)$ par le paramètre ε .

$$\hat{E}_{\alpha,\varepsilon} = \frac{(\bar{E})^2}{\sqrt{S^2 + (\bar{E})^2}} e^{\varepsilon \sqrt{\ln \left(1 + \frac{S^2}{(\bar{E})^2} \right)}} \quad (2.55)$$

Il suffit de connaître une valeur appropriée du paramètre ε pour calculer une valeur numérique $\hat{e}_{\alpha,\varepsilon}$ à partir d'un échantillon empirique.

$$\hat{e}_{\alpha,\varepsilon} = \frac{\bar{e}^2}{\sqrt{s^2 + \bar{e}^2}} e^{\varepsilon \sqrt{\ln\left(1 + \frac{s^2}{\bar{e}^2}\right)}} \quad (2.56)$$

La variable aléatoire X suit une loi normale ; on peut donc écrire (voir équation (2.26)) :

$$\hat{X}_\alpha = \bar{X} + S F_U^{-1}(\alpha)$$

En remplaçons le réel $F_U^{-1}(\alpha)$ par le paramètre ε , il vient (voir équation (2.43))

$$\hat{X}_{\alpha,\varepsilon} = \bar{X} + \varepsilon S$$

Le paramètre ε est un facteur de correction. Il est déterminé de telle manière que l'estimateur $\hat{E}_{\alpha,\varepsilon}$ de la valeur caractéristique e_α soit sans biais c'est-à-dire que (voir équation (2.45))

$$E[\hat{E}_{\alpha,\varepsilon}] = e_\alpha$$

En tenant compte des relations (35) et (36), cette dernière équation peut encore s'écrire :

$$\begin{aligned} E[e^{\hat{X}_{\alpha,\varepsilon}}] = e_\alpha &\Rightarrow E\left[e^{\bar{X} + \varepsilon S}\right] = e^{m_X + F_U^{-1}(\alpha)\sigma_X} \\ &\Rightarrow E[\bar{X} + \varepsilon S] = m_X + \sigma_X F_U^{-1}(\alpha) \end{aligned}$$

Comme l'espérance mathématique est un opérateur linéaire (voir équation (2.22)), cette dernière équation peut encore s'écrire :

$$E\left[\frac{\bar{X} - m_X}{\sigma_X} + \frac{S}{\sigma_X} \varepsilon\right] = F_U^{-1}(\alpha).$$

Soit,

$$E[Z_\varepsilon] = F_U^{-1}(\alpha).$$

où Z_ε est la variable aléatoire précédemment décrite à l'équation (2.46).

Partant, les solutions du paramètre ε sont les mêmes que dans le cas de la distribution normale et les résultats du *tableau 3* sont valables.

2.6 Echantillonnage.

2.6.1 Aperçu bibliographique.

Comme cela se passe pour tous les matériaux naturels, les propriétés du bois varient considérablement d'une pièce à l'autre et il existe plusieurs centaines d'espèces d'arbres dans le bassin du Congo. Même à l'intérieur d'une espèce donnée, ces propriétés varient en

fonction des conditions climatiques, de la nature des sols, de la vitesse de croissance des arbres, etc. La notion de variabilité relativement connue au niveau interspécifique (le bubinga est plus dur de l'ayous), l'est beaucoup moins au niveau intraspécifique ; pourtant, à l'intérieur d'une espèce, la variabilité est parfois aussi importante sinon davantage qu'entre espèces. Cette variabilité du plan ligneux n'est pas en soi surprenante si l'on considère que le bois est un matériau d'origine biologique. Comme tout système vivant, le bois est soumis à l'action de facteurs externes (concurrence entre arbres, richesse chimique du sol, alimentation en eau, etc.) ou internes à l'arbre (patrimoine génétique) ainsi qu'à l'interaction de ces facteurs.

Pour tenir compte de cette variabilité inter essences et intra essence, deux démarches statistiques sont couramment utilisées dans l'acquisition des échantillons et l'analyse des résultats consécutifs aux essais : l'échantillonnage systématique et l'échantillonnage aléatoire. L'échantillonnage systématique est prescrit par la norme American Society for Testing Material (ASTM), N° D143-61, notamment.

Cette méthode demande un minimum de cinq arbres par essence desquels on prélève des éprouvettes de bois sans défaut pour les essais de caractérisation escomptés. Comme les variations des propriétés d'un arbre à l'autre sont plus significatives que les variations à l'intérieur d'un arbre, il est conseillé de prélever un plus grand nombre d'arbres et un plus petit nombre d'éprouvettes dans chaque arbre (Pearson et Williams, 1958).

Les éprouvettes doivent être distribuées au hasard dans l'ensemble du volume de l'arbre pour que chaque partie utilisable ait une chance égale d'être retenue.

L'échantillonnage statistique au hasard se déroule suivant trois grandes étapes :

- échantillonnage d'unités écologiques à l'intérieur desquelles les conditions de croissance soient similaires, chaque unité écologique étant pondéré en fonction de son importance ;
- échantillonnage des arbres à l'intérieur de chaque unité écologique. Les arbres sont sélectionnés selon une méthode statistique intégrant les facteurs sylvicoles les plus pertinents : classe de diamètre, classe de fertilité, altitude, sylviculture, etc. Cet échantillonnage doit être validé par un groupe d'experts forestiers, l'objectif étant de sélectionner des arbres représentatifs du peuplement sciable ;
- échantillonnage des éprouvettes d'essais à l'intérieur de chaque arbre. Il s'agit de transformer les arbres en avivés destinés aux essais. Chaque pièce est référencée par rapport à la placette forestière (données sylvicoles, lieu de provenance), l'arbre (place de l'arbre au sein de la placette), le billon (hauteur de prélèvement dans l'arbre), l'avivé (localisation par rapport à la moelle de l'arbre).

Il ressort que la taille correcte de l'échantillonnage statistique au hasard est un problème d'optimisation, la précision des valeurs moyenne (pouvant être améliorée au cours du temps) est d'autant plus bonne qu'il y a plusieurs unités écologiques échantillonnées, plusieurs arbres à l'intérieur de chacune d'elles et plusieurs éprouvettes à l'intérieur de chaque arbre. Par exemple, pour la résistance mécanique d'une essence donnée, une précision de plus ou moins 5% est atteinte pour un échantillonnage de 20 à 30 arbres tirés au sort par unité écologique (Noack, 1972).

En France par exemple, plusieurs travaux ont été faits ces dernières années par le CTBA (Bordeaux) sur la caractérisation et le classement du matériau bois.

La caractérisation de l'essence *Douglas* de France se déroule en plusieurs phases (Joyet, 2002).

La première opération consiste à s'approvisionner en grumes dont on connaît l'origine géographique et les principales caractéristiques sylvicoles.

La connaissance de ces informations permettra de transposer les conclusions aux différentes sources d'approvisionnement possibles de l'essence en question.

Les grumes échantillonnées sont ensuite découpées et identifiées pour assurer une traçabilité entre l'arbre récolté et les avivés obtenus. Chaque avivé est référencé et listé (localisation par rapport à la moelle, à la grume, l'arbre et la station sylvicole). Ceci permet de tenir compte de l'influence de la position de l'échantillon dans l'arbre.

Les avivés identifiés serviront aux différents essais mécaniques, notamment la flexion quatre points déterminant la contrainte à la rupture et le module d'élasticité.

Lorsqu'une propriété est caractérisée par un échantillonnage classique, on obtient une distribution statistique, modélisée en loi normale notamment (*Figure 2.13*).

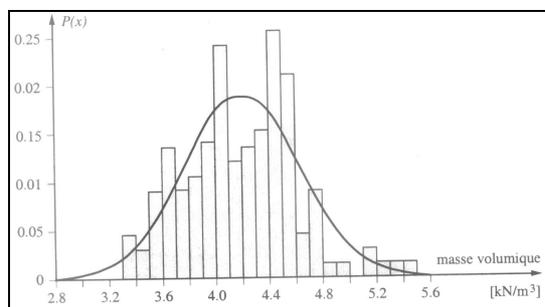


Figure 2.13: Distribution statistique, modélisée en loi normale, d'une propriété indicatrice. Exemple de la masse volumique pour l'épicéa (Natterer et al, 2000).

2.6.2 Technique d'échantillonnage des essences du bassin du Congo.

Dans un contexte des pays en développement, on ne dispose pas suffisamment de moyens en termes d'infrastructures et économique. Les techniques d'échantillonnage sus citées sont onéreuses. Elles exigent des millions de « prélèvements » d'essences au hasard, leur débitage et le test stochastique sur les échantillons !

Elles frisent l'utopie eu égard à la modestie voire l'absence des moyens alloués aux projets de recherche. Il est nécessaire de déterminer les propriétés mécaniques et physiques des groupes d'essences en consentant la plus faible dépense possible, matériellement et financièrement. D'où l'intérêt d'une technique d'échantillonnage pertinente qui permette la détermination à faible coût des propriétés mécaniques et physiques essentielles des quatre essences du bassin du Congo.

L'approvisionnement en bois doit être original. Pour éviter que les échantillons soient issus d'un même arbre ou d'un très petit nombre d'arbres (et donc non représentatifs) et simuler le tirage au sort, on multiplie autant que possible les sources d'approvisionnement (scieurs artisanaux, scieries industrielles) sur toute la zone forestière du Cameroun (est, centre et sud), en passant de manière intempestive des commandes de petites quantités de bois sur un temps relativement long. Le ravitaillement en pièces d'essences escomptées se fera auprès de plusieurs points de vente pour tenir statistiquement compte de la variabilité du bois.

Dans le cadre des présentes investigations, l'une des sources d'approvisionnement est le marché local de Yaoundé où parvient, dans sa variabilité, la plupart d'essences de la forêt dense du Cameroun.

Par ailleurs, plusieurs sources d'approvisionnement sont établies sur toute la zone forestière du Cameroun (est, centre et sud), en passant de manière intempestive des commandes de petites quantités de bois auprès des scieurs artisanaux et industriels.

Dix-neuf essences (dont les quatre leaders autour desquels s'effectue la classification) sont retenues pour appliquer la méthode de regroupement mise au point, avec le dessein de l'étendre plus tard à toutes les soixante essences commercialisées. Ces essences sont l'ayous, le sapelli, le tali, l'azobé, le moabi, l'iroko, l'ébène, le movingui, le bubinga, le bibolo, le bété, le wengé, le difou, le bilinga, le padouk, l'éyong, le pachyloba, le fromager et le fraké.

Un prélèvement d'une centaine d'éprouvettes est réalisé par essence.

Compte tenu du contexte des pays en développement ne disposant pas suffisamment de moyens en termes d'infrastructures et économique, le projet de norme Européen prEN 14081 qui recommande un nombre minimum de 2000 pièces pour un volume minimal de 120 m³ de grumes par essence (JOYET et al., 2002) est une utopie.

Actuellement, il n'existe pas à notre connaissance de norme régissant les essais dynamiques par impact sur poutres flottantes. La norme soviétique GOST 16483.31 (1974), bien que présentant une référence intéressante en matière d'essai de flexion dynamique, concerne des essais en vibrations forcées sur des éprouvettes de dimensions 20*20*300 mm³, et ne peut donc être transposée ici. Certains points expérimentaux du dispositif et de la procédure utilisés sont donc inspirés des travaux internes au LRBB.

2.7 Choix de la propriété indicatrice du regroupement des essences.

En génie civil les paramètres qui caractérisent mécaniquement le bois pour une utilisation structurelle sont le module d'élasticité (MOE) et la résistance à la rupture (MOR).

La rigidité d'une structure, sa résistance à la déformation augmente avec le MOE. On montre que le MOE est relié au MOR par une corrélation linéaire (NATTERER et al., 2000).

En général, la charge et la déflexion maximales d'une structure sont régies par les codes de bâtiment. Pour qu'une pièce de bois fournisse un bon rendement, on doit s'assurer que la charge qu'elle doit supporter et la flexion qui en découle n'excèdent pas la capacité du matériau donné en service. Le MOE sert à calculer la déflexion à laquelle est soumise la pièce sous charges maximales. Un grand MOE correspond à une petite déflexion. En génie civil les paramètres qui caractérisent mécaniquement le bois pour une utilisation structurelle sont le module d'élasticité (MOE) et la résistance à la rupture (MOR).

On montre que les deux sont reliés par un modèle mathématique (*Figure 2.14*).

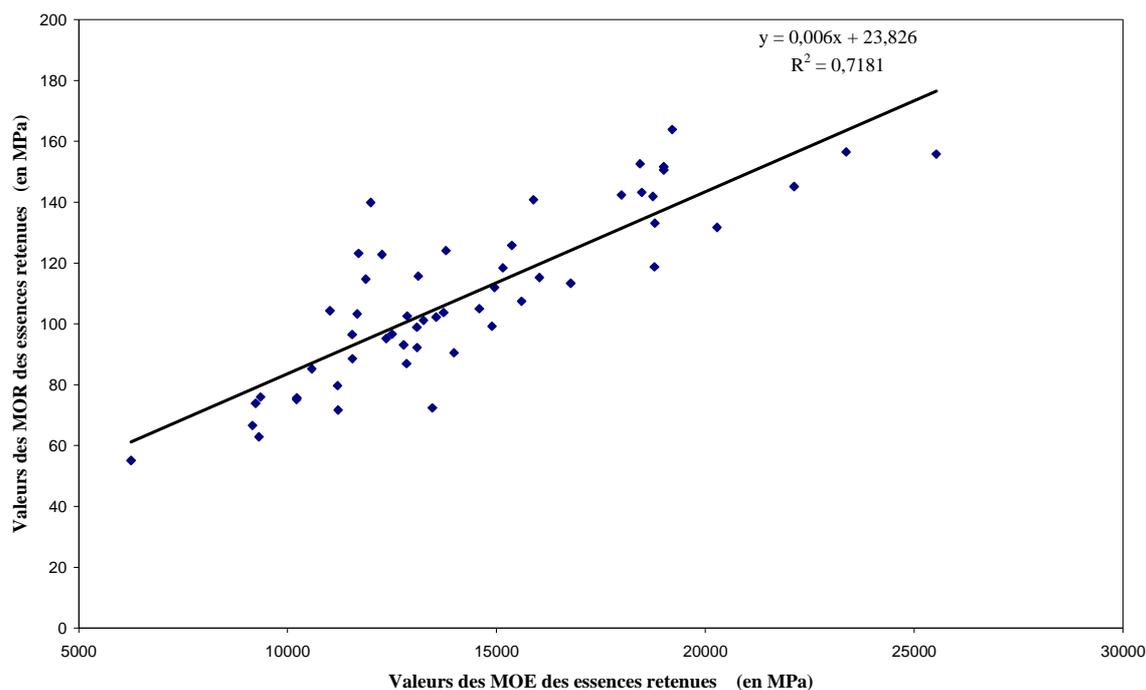


Figure 2.14: Courbe de régression du MOR en fonction du MOE des essences du bassin du Congo d'après la base de données ITTO.

La rigidité d'une structure, sa résistance à la déformation augmente avec le MOE. Le fléchissement d'une charpente, par exemple, dépend directement du MOE.

En général, la charge et la déflexion maximales d'une structure sont régies par les codes de bâtiment. Pour qu'une pièce de bois fournisse un bon rendement, on doit s'assurer que la charge qu'elle doit supporter et la flexion qui en découle n'excèdent pas la capacité du matériau donné en service. Le MOE sert à calculer la déflexion à laquelle est soumise la pièce sous charges maximales. Un grand MOE correspond à une petite déflexion.

Toutes ces raisons conduisent à adopter le MOE comme propriété indicatrice de notre regroupement mécanique des essences.

Dans la suite de ces investigations, on adopte le MOE comme propriété indicatrice du regroupement mécanique des essences. En effet, avec un matériel approprié, la mesure du MOE, obtenue à partir d'un modèle d'essai non destructif basé sur l'analyse spectrale des vibrations naturelles d'une poutre, est simple, rapide, reproductible, précise, et fiable (Gasagrande, 2004).

2.8 Analyses statistiques.

Certaines analyses statistiques seront effectuées au moyen du logiciel MINITAB (Figure 2.15).

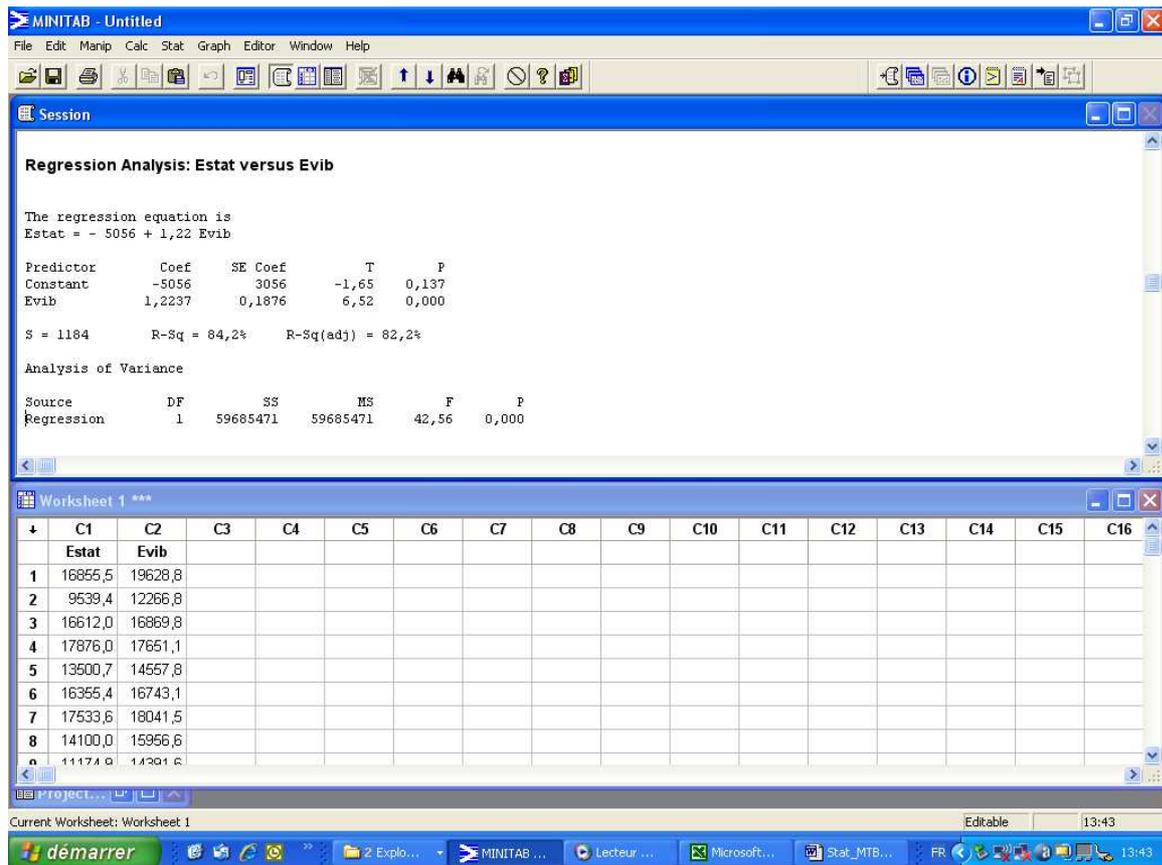


Figure 2.15 : Exemple de traitement des données par le logiciel MINITAB.

Conclusion.

Ce chapitre a mis en relief le matériel et le mode opératoire pour les essais vibratoires et statiques. Alors que le projet de norme prEN 408 (2000) impose un mode opératoire pour la flexion quatre points, l'essai vibratoire reste, à notre connaissance, non standard. Nous-nous contenterons, pour ce dernier, du protocole en usage au LRBB.

Une méthodologie qui préside à l'effectivité du regroupement des essences a été mise au point ainsi que les traitements statistiques des données.

Les résultats expérimentaux seront présentés et analysés au chapitre 3.

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Résumé.

*L'objet de ce **chapitre** est de présenter le matériel végétal d'étude (essences retenues pour la campagne d'essais) et d'analyser dans le détail les résultats de chaque campagne. Plus de 2000 éprouvettes de dimensions moyennes 20x20x400 mm³ constituées de dix-neuf essences ont été testées à humidité contrôlée. Ce nombre élevé d'échantillons de très grande taille permet d'escompter des résultats représentatifs qui tiennent compte de la variabilité du matériau bois. On montrera que l'influence de l'humidité sur les mesures vibratoires est non significative ; un modèle rhéologique permettra d'apporter une tentative d'explication sur ce phénomène encore mal connu sur le plan bibliographique. Des corrélations entre le module d'élasticité vibratoire d'une part et le module d'élasticité statique, la contrainte de rupture et la masse volumique d'autre part, sont effectuées. Il ressort que le module élastique vibratoire est un bon prédicteur de la contrainte à la rupture. Compte tenu du fait que nos mesures montrent que ce module élastique vibratoire est quasi-invariant avec la teneur en eau, l'essai vibratoire apparaîtrait comme un moyen efficace de classement des bois quelque soit le taux d'humidité. Ceci valide l'organisation en groupe d'essences réalisée dans ce travail. Les valeurs caractéristiques des propriétés mesurées sont calculées pour chaque classe. Parce que l'Eurocode 5 exige que les bois utilisés en structure soient classés, quelle que soit la méthode, pour connaître leurs performances mécaniques, nous proposons, in fine, un système de classement des performances en structure des bois du bassin du Congo voué à une meilleure utilisation des forêts pour la conservation des écosystèmes forestiers et la satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme.*

Introduction.

L'objet de ce chapitre est de présenter le matériel végétal d'étude (essences retenues pour la campagne d'essais) et d'analyser dans le détail les résultats de chaque campagne. On montrera que l'influence de l'humidité sur les mesures vibratoires est non significative ; un modèle rhéologique permettra d'apporter une tentative d'explication sur ce phénomène encore mal connu sur le plan bibliographique. Des corrélations entre le module d'élasticité vibratoire d'une part et le module d'élasticité statique, la contrainte de rupture et la masse volumique d'autre part, sont effectuées pour valider l'organisation en groupe d'essences qui est faite *in fine*.

3.1 Le matériel végétal.

Pour réaliser tous les essais, quatre campagnes ont été nécessaires dont deux au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (France) et deux au Laboratoire de Mécanique des Matériaux et Constructions de l'Ecole Polytechnique de Yaoundé (Cameroun).

La première campagne du LRBB (essais vibratoires et mesure du taux d'humidité) s'est concentrée sur le pin maritime, ressource très disponible, pour apprécier l'influence de l'humidité sur le module élastique vibratoire. Pareillement, la deuxième campagne du LMMC s'est basée sur le moabi pour le même motif essais vibratoires et mesure du taux d'humidité).

La deuxième campagne du LRBB (essais vibratoires et essais de flexion et rupture) s'est limitée à quelques essences tandis que la campagne du LMMC (essais vibratoires) concerne, de manière représentative, la vingtaine d'essences retenues pour tester la méthodologie de regroupement d'essences du bassin du Congo. Le *Tableau 3.1* donne le nombre d'éprouvettes par essence retenues pour chaque campagne.

Tableau 3.1: Taille et population des échantillons pour chaque campagne.

Nom de l'essence	Nom botanique de l'essence	Campagne LRBB 1	Campagne LRBB 2	Campagne LMMC 1	Campagne LMMC 2
Ayous	<i>Triplochiton scleroxylon</i>			100	
Sapelli	<i>Entandrophragma cylindricum</i>			100	
Tali	<i>Erythrophleum ivorense</i>			100	
Azobé	<i>Lophira alata</i>		9	100	
Moabi	<i>Baillonella toxisperma</i>		10	100	25
Iroko	<i>Chlorophora excelsa</i>		11	100	
Ebène	<i>Diospyros crassiflora</i>		4	100	
Movingui	<i>Distemonanthus benthamianus</i>		11	100	
Bubinga	<i>Guibourtia tessmannii</i>		4	100	
Bibolo	<i>Lovoa trichilioides</i>			100	
Bété	<i>Mansonia altissima</i>			100	
Wengé	<i>Milletia laurentii</i>		9	100	
Difou	<i>Morus mesozygia</i>		11	100	
Bilinga	<i>Nauclea diderrichii</i>		8	100	
Padouk	<i>Pterocarpus soyauxii</i>		11	100	
Fraké	<i>Terminalia superba</i>		7	100	
Eyong	<i>Eribroma oblonga</i>		3	100	
Fromager	<i>Ceiba pentandra</i>		3	100	
Pachyloba	<i>Azizia pachyloba</i>		8	100	
Pin maritime	<i>Pinus pinaster</i>	110			
Nombre total d'éprouvettes par campagne		110	109	1900	25

Le faible nombre d'éprouvettes lors de la deuxième campagne du LRBB est inhérent à la difficulté de transporter un grand nombre d'éprouvettes d'essences exotiques du Cameroun vers la France où le laboratoire d'accueil est doté d'équipements appropriés.

Tous les essais sont réalisés sur des éprouvettes sans défaut de dimensions 20x20x400 mm³.

3.2 Quasi-invariabilité du module d'élasticité vibratoire en fonction du taux d'humidité dans le matériau bois.

En génie civil les paramètres qui caractérisent mécaniquement le bois pour une utilisation structurelle sont le module d'élasticité (MOE) et la résistance à la rupture (MOR). Ces propriétés mécaniques sont fortement influencées par la teneur en eau lorsqu'on les estime par des essais quasi-statiques à court terme (flexion quatre point notamment). Par conséquent, toutes les normes y relatives (prEN 408 (2000), EN408 (1995), NF B 51-005 (1985), NF B 51-016 [...], etc.) recommandent que les mesures soient effectuées à une humidité de 12% voisine des conditions d'usage des bois d'œuvre en Europe. On montre que, dans des conditions identiques d'humidité du bois, le MOE est relié au MOR par une corrélation linéaire (Natterer et al.; 2000). La rigidité d'une structure, sa résistance à la déformation augmente avec le MOE. Les contraintes de fiabilité et de sécurité sont de plus en plus pressantes dans le village planétaire et exigent la maîtrise des caractéristiques mécaniques des structures. Les normes de calcul des structures en bois (CB 71 ; NF B 52-001 ; Eurocode 5) exigent la connaissance des performances mécaniques des bois utilisés en structure en vue d'estimer les contraintes admissibles dans les conditions d'usage. Pour ces règles professionnelles, la connaissance de la contrainte de rupture en état de service est d'une importante capitale. Par des facteurs correctifs, la bibliographie propose des formules pour prendre en compte cette grande influence de l'humidité sur les propriétés obtenues par essais quasi-statique à court terme.

Sur le plan pratique, on adopte la correction suivante (Guitard, 1987) pour ramener le module d'élasticité en flexion statique parallèlement aux fibres du bois d'une humidité H à l'humidité de 12% :

$$E_H = E_{12} [1 - 0,015(H - 12)]$$

Les normes (NF B 51-016,...) proposent la formule suivante :

$$E_{12} = E_H [1 + c(H - 12)]$$

où c est le coefficient de correction du module d'élasticité en flexion en fonction de l'humidité pour l'essence considérée.

A cause de la variabilité des propriétés mécaniques essentielles du bois avec le taux d'humidité, il est difficile de prévoir la ruine en service d'une structure en bois connaissant les propriétés à une humidité différente de celle d'usage.

Dans le but d'apprécier l'influence éventuelle du taux d'humidité sur les mesures obtenues par essais vibratoires et compte tenu de l'absence totale d'informations bibliographiques sur ce sujet, il nous a semblé utile de monter ces manipulations.

Les investigations présentées ici montrent que le module d'élasticité longitudinal obtenu par essais vibratoires s'avère quasi-invariable en fonction de la teneur en eau. Des tests sont effectués sur deux lots d'échantillons: une essence européenne (pin maritime) et une essence tropicale (moabi). Les autres lots sont issus des travaux de Pommier sur le pin maritime.

Il s'en dit que le module élastique vibratoire du bois à n'importe quel taux d'humidité (et donc à l'état vert notamment) est un prédicteur pertinent du module de rupture au taux d'humidité 12% qui sert de référence dans le calcul des structures en bois.

Lots d'échantillons.

Lot 1 (deuxième campagne LMMC)

C'est un lot de référence de 30 éprouvettes ($20*20*400 \text{ mm}^3$) de Moabi, bois sans défaut triées dans l'approvisionnement issu de la scierie Patrice Bois: sans nœud, droit, sans bois dit de cœur. Ces éprouvettes ont été façonnées et testées de septembre 2006 à mars 2007 au Laboratoire de Mécanique des Matériaux et Constructions (LMMC) de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Université de Yaoundé 1.

Lot 2 (première campagne LRBB)

C'est un lot d'une centaine de planches ($32*100*1100 \text{ mm}^3$) de pin maritime issues de l'entreprise Beynel Manustock (Bordeaux), fabricant de palettes. Des centaines d'éprouvettes ($20*20*400 \text{ mm}^3$) ont été façonnées et testées entre les mois d'avril et juin de l'année 2005 au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (LRBB).

Lot 3

Dans le cadre de sa thèse, Pommier (2006) a réalisé des essais sur le pin maritime (*Pinus pinaster*) au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux. Deux éléments de même dimensions ($22*37*500 \text{ mm}^3$) ont été aboutés à l'état vert ou selon un processus traditionnel ; issus d'un lot de classe 3, chacun des éléments a été purgé pour atteindre une classe 1. Ce lot représente près de 300 éprouvettes dont 180 sont des produits aboutés vert avec la colle innovante Polyuréthane et testé à une teneur en eau de 12% ou voisin du PSF.

Lot 4

110 éprouvettes de pin maritime (*Pinus pinaster*) de dimensions $22*100*1200 \text{ mm}^3$ (Figure 3.1) a été testé par essais vibratoires à divers taux d'humidité.



Figure 3.1 Matériel et appareil d'essai vibratoire: (la poutre est placée sur des supports élastiques, l'accéléromètre est fixé à une extrémité).

Après usinage, les éprouvettes sont immédiatement soumises aux tests non destructifs à un taux d'humidité moyen voisin de 130%. Elles sont ensuite placées dans une chambre ventilée (Humidité Relative = 65%, $T=20^\circ\text{C}$) pour un séchage lent. Enfin, elles seront testées pas à pas pour déterminer leur MOE_{vib} à différents taux d'humidité: 130%, 40% et 18%.

Lot 5

Pommier (2005).

Des planches de pin maritime de section $22 \times 100 \times 1200 \text{ mm}^3$ ont été aboutées avec des entures usuelles de 20 mm de longueur (EN 385) Le fraisage des entures a été effectué dans les ateliers du CTBA. Le serrage des entures sur les deux coursons a été effectué à l'aide d'un bâti spécifique conçu et réalisé au LRBB, muni d'un vérin hydraulique. Le $MOE_{vib.}$ est mesuré à deux taux d'humidité: 12% et 24%.

Lot 6

Des éprouvettes de pin maritime de $22 \times 37 \times 600 \text{ mm}^3$ ont été soumises aux tests de flexion statique quatre points suivant la norme EN 408 à différents taux d'humidité: 140%, 40%, 26% et 12%.

Le MOE_{stat} est donné par:

$$MOE_{stat.} = \frac{3P(L-l)l^2}{8bh^3\delta}$$

où δ est la deflection centrale

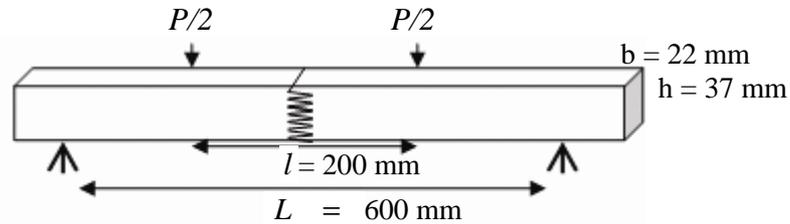


Figure 3.2: Essai de flexion quatre points (EN 408).

3.2.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais.

Les résultats de la campagne d'essais sont consignés dans les Tableaux 3.2 et 3.3 et les courbes de fréquences cumulées sont dressées (Figures 3.3 et 3.4).

La courbe des fréquences cumulées des résultats issus du lot 3 est aussi donnée (Figure 3.3).

Tableau 3.2: Résultats de la campagne d'essais du lot 1 (Moabi) donnant le module vibratoire (en MPa) en fonction du taux d'humidité

N° éprouvette	H1=74%	H2 =24%	H3 =16,7%	H4=13,31%	H5 =12,7%	Hanhydre=0%
1	8118	7749	8021	8624	8593	8743
2	8595	8584	8769	8775	8834	8907
3	8722	8782	9013	9813	9407	9520
4	9187	9599	9701	9972	9842	9964
5	9248	9624	9869	10234	9867	10367
6	10094	9738	9920	10334	9926	10709
7	10508	9867	10098	10378	10216	10740
8	10617	10139	10385	10421	10263	10852
9	10950	10499	10919	10730	10321	10974
10	11019	10705	10947	11678	10612	11289
11	11594	11734	11110	11679	11903	12274
12	11866	11773	12098	12353	12159	12290
13	12038	12188	12153	12514	12326	12860
14	12459	12598	12642	12517	12349	13022
15	12629	12688	12727	12673	12641	13044
16	12738	12822	12841	12754	12799	13252
17	12801	12898	13016	12886	13123	13479
18	12830	12930	13215	13044	13524	13647
19	13230	13176	13717	13055	13624	13745
20	13517	13691	13734	13513	14126	14042
21	13917	13802	13901	13984	14725	14752
22	14105	14347	14692	14346	14754	14849
23	14162	14610	14787	14357	14923	15017
24	14351	14821	15166	14625	15184	15230
25	15064	15340	15417	15162	15382	15647
Moyenne	11774	11788	11954	12017	12057	12369
Ecart type	1996	2138	2132	1853	2140	2053

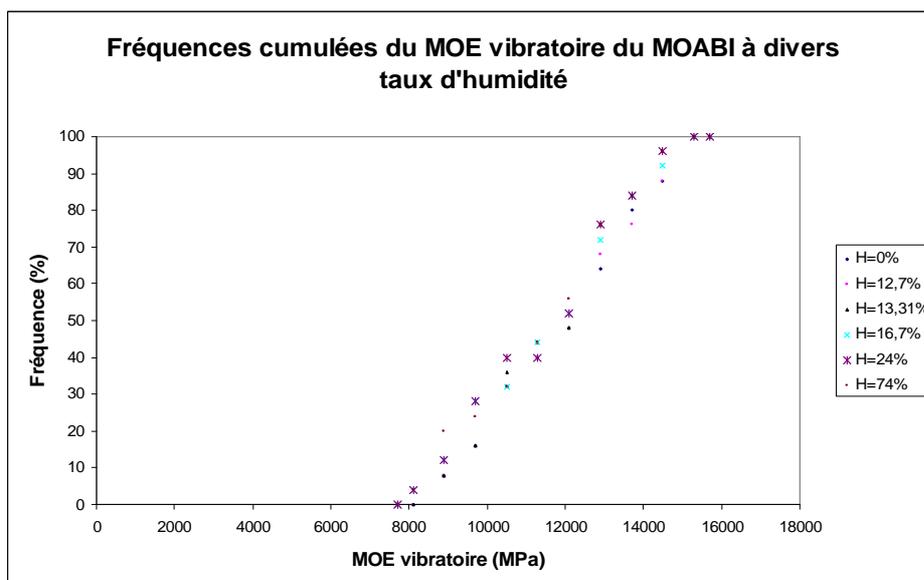


Figure 3.3: Fréquences cumulées du module vibratoire du Moabi à divers taux d'humidité.

Tableau 3.3: Résultats de la campagne d'essais du lot 2 (Pin maritime) $E_{vib} = f(H)$.

n° d'ordre éprouvette,	E Bernoulli H4 (MPa) H=130%	E Bernoulli H5 (MPa) H=46,5%	E Bernoulli H6 (MPa) H=18,76%	n° d'ordre éprouvette,	E Bernoulli H4 (MPa) H=130%	E Bernoulli H5 (MPa) H=46,5%	E Bernoulli H6 (MPa) H=18,76%
1	10916	10258	10777	57	4682	4442	4601
2	9251	8868	9235	58	3739	3664	3791
3	10023	9449	9528	59	6450	6331	6374
4	9406	9309	9555	60	7428	6949	6936
5	8060	7962	8335	61	12197	11299	11534
6	9371	9179	9536	62	9777	8874	8801
7	10387	10212	10107	63	4235	4243	4118
8	10538	10287	10349	64	11539	10973	10747
9	9968	9487	9729	65	11112	10633	10452
10	8332	8266	8497	66	6037	5918	6174
11	10988	10891	10523	67	8586	8290	8482
12	11379	10565	10662	68	7999	7824	7426
13	7827	7483	7668	69	7290	7049	7046
14	9387	8892	8650	70	9822	9291	8820
15	8783	9233	8369	71	11610	10914	10354
16	11224	11614	10847	72	9896	10350	9781
17	8543	7809	7750	73	11958	11706	11175
18	6878	6980	6346	74	10922	10699	9676
19	7139	7573	7238	75	10358	10111	9271
20	9610	9539	8208	76	6411	5990	6054
21	8979	8833	8369	77	6129	6093	5999
22	9692	9663	9219	78	12475	11563	11621
23	9000	9009	8671	79	4696	4646	4602
24	9971	10188	10004	80	5925	6322	6415
25	10395	10016	9691	81	6249	6034	5882
26	9087	8713	8867	82	6869	6151	6246
27	10017	9410	9088	83	12568	11609	11632
28	6039	5870	6009	84	11949	11675	11084
29	4435	3479	4306	85	10307	9408	8653
30	9705	8817	8979	86	10863	9565	9444
31	8229	7837	7934	87	9380	8453	8001
32	10597	9885	9327	88	7285	7038	6729
33	8841	8755	8388	89	8366	8335	8020
34	10309	9031	8899	90	10066	10531	9170
35	8534	8019	7999	91	9751	9720	8880
36	10585	10126	10091	92	9658	8963	8419
37	5364	5444	5513	93	10292	9750	9104
38	9598	9595	8854	94	9774	9877	8519
39	7710	7289	7235	95	12116	12157	11488
40	9694	8884	8829	96	9424	8566	8388
41	10856	9486	9451	97	9555	9405	8960
42	8526	8938	8421	98	8200	8075	7693
43	8292	8299	8096	99	8743	8072	7606
44	5842	5666	6011	100	10551	10123	10055
45	8939	8944	8534	101	10052	9704	9428
46	8367	8346	7933	102	9112	8510	8496
47	3816	3648	3708	103	7950	7952	7783
48	9588	10165	8209	104	4198	4326	4131
49	10970	10256	10178	105	5929	6148	6242
50	8052	7888	7912	106	7840	7407	7606
51	11020	10222	9831	107	6184	5949	5817
52	4825	5019	4787	108	3865	3736	3847
53	8369	8302	8369	109	11365	9846	10166
54	9524	9745	9228	110	7948	7845	6334
55	9980	10068	9835	Moyenne	8825	8511	8283
56	9255	9417	8323	Ecart type	2114	2001	1877

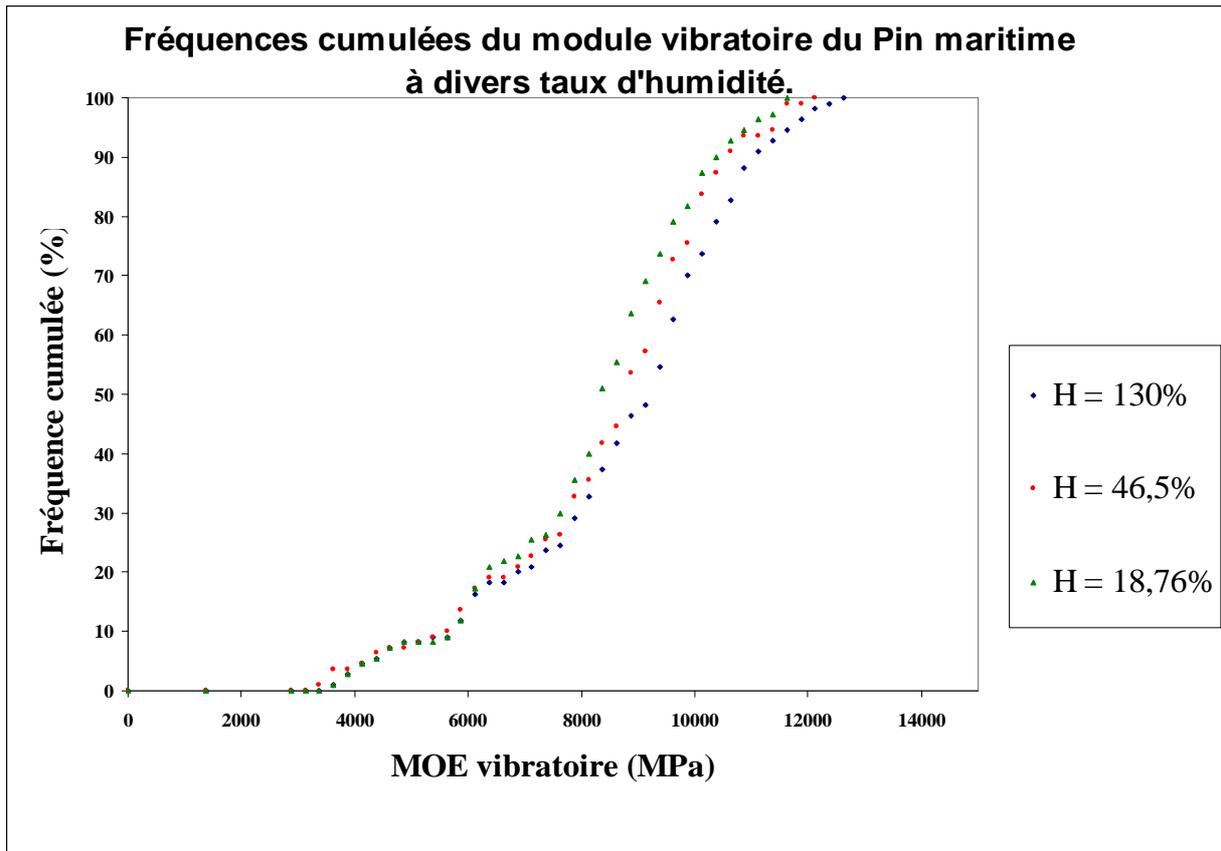


Figure 3.4: Fréquences cumulées du module vibratoire du Pin maritime à divers taux d'humidité.

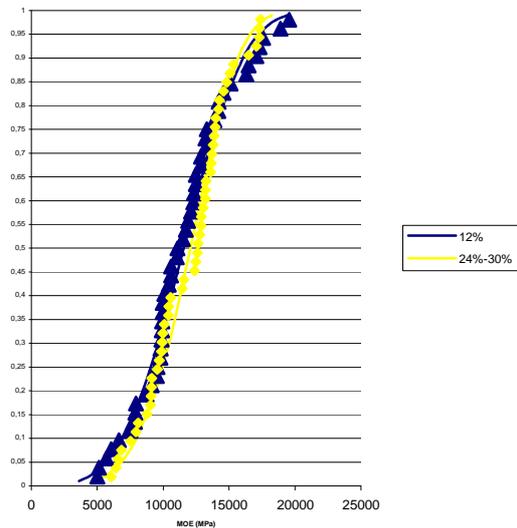


Figure 3.5: Fréquences cumulées du module vibratoire du pin maritime purgé (Pommier, 2006).

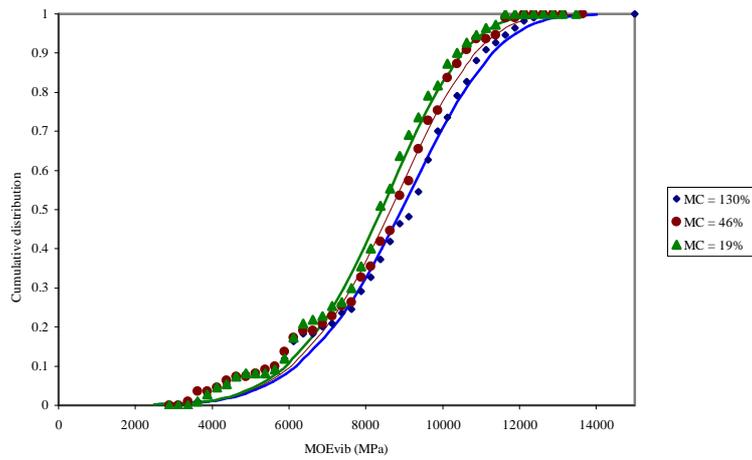


Figure 3.6 : Distribution cumulée du MOEvib à différents taux d'humidité , lot4.

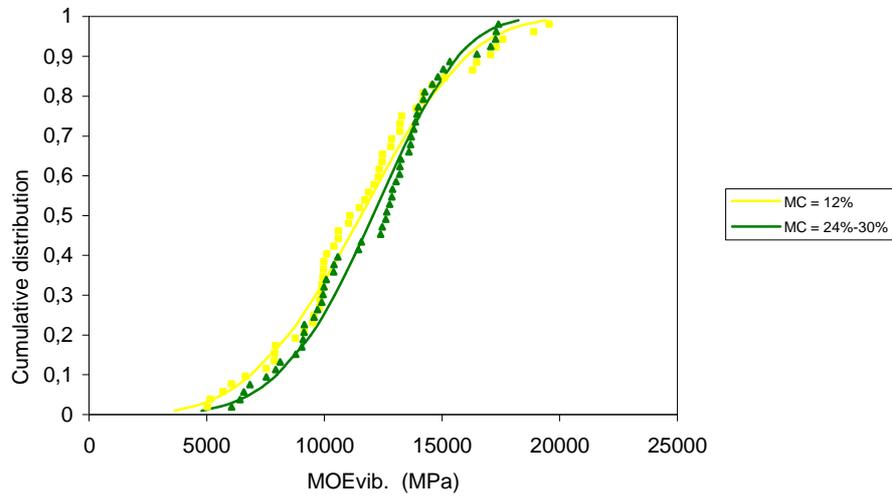


Figure 3.7 : Distribution cumulée du MOEvib à différents taux d'humidité , lot 5.

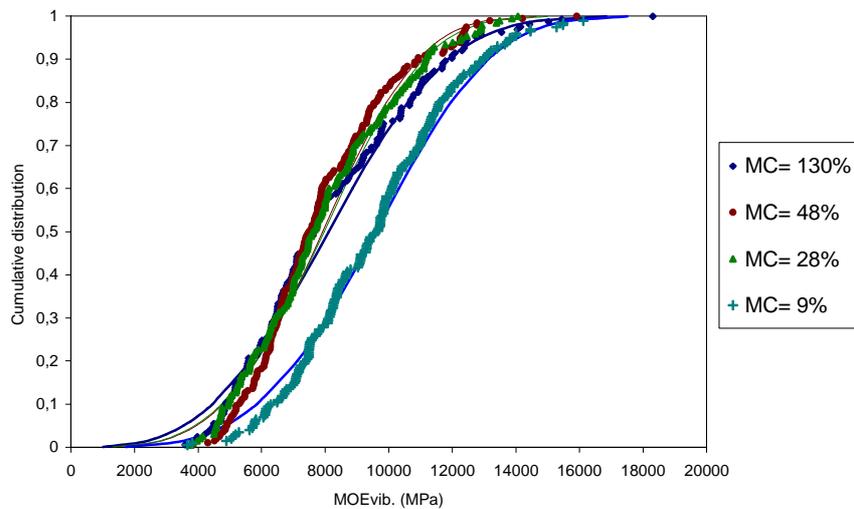


Figure 3.8 : Distribution cumulée du MOEvib à différents taux d'humidité , lot 6.

Sur la base d'un grand nombre d'échantillons qui tiennent compte de la variabilité du matériau bois, les résultats montrent et confirment la quasi invariabilité du MOE_{vib} avec le taux d'humidité. Ceci permet d'entrevoir le classement du bois de structure à l'état vert.

Le Tableau 3.4 représente les résultats statistiques (moyennes (50% de la distribution), valeurs caractéristiques (5% de la distribution), 2 paramètres de la distribution de Weibull).

Tableau 3.4: Résultats statistiques du MOE_{vib} .

Lots	H (%)	Moyenne MOE_{vib} (MPa)	Fractile à 5% MOE_{vib} (MPa)	Facteurs de Weibull	
				Forme	Echelle
Lot 4 N= 90	130	8825	5175	5.4	9000
	48	8511	5273	5.3	9263
	18	8282	5376	5.1	9601
Lot 5 N = 30	24-30	12065	6833	4.5	13071
	12	11551	5667	3.6	12769
Lot 6 N = 130	130	8104	4485	3.15	9101
	48	7916	4911	3.7	8732
	24-30	7963	4571	3.6	8807
	9	9587	4847	3.8	10553

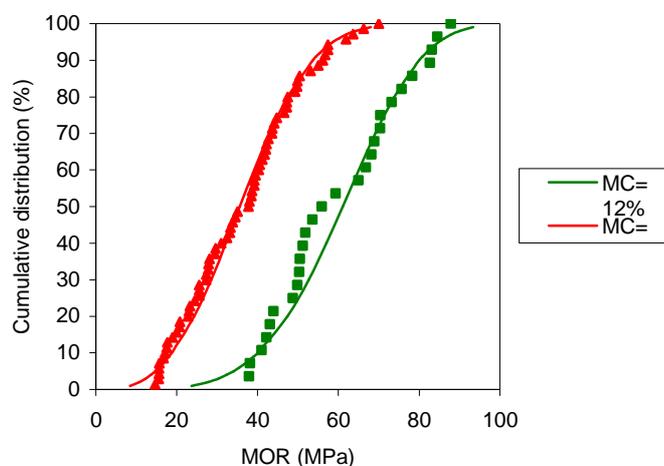


Figure 3.9 : Distribution cumulée du MOR pour deux taux d'humidité obtenus suivant la norme EN 408, lot 6.

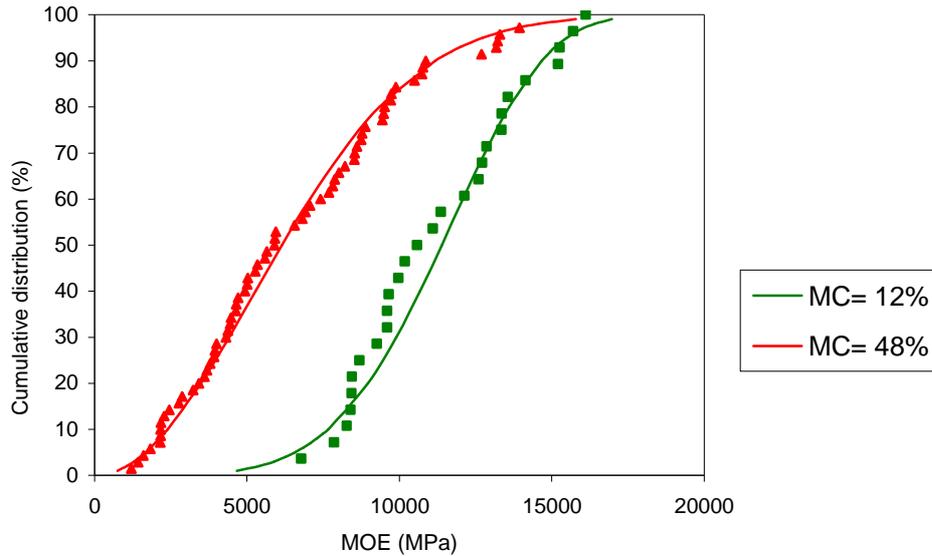


Figure 3.10 : Distribution cumulée du MOE pour deux taux d'humidité obtenu suivant la norme EN 408, lot 6.

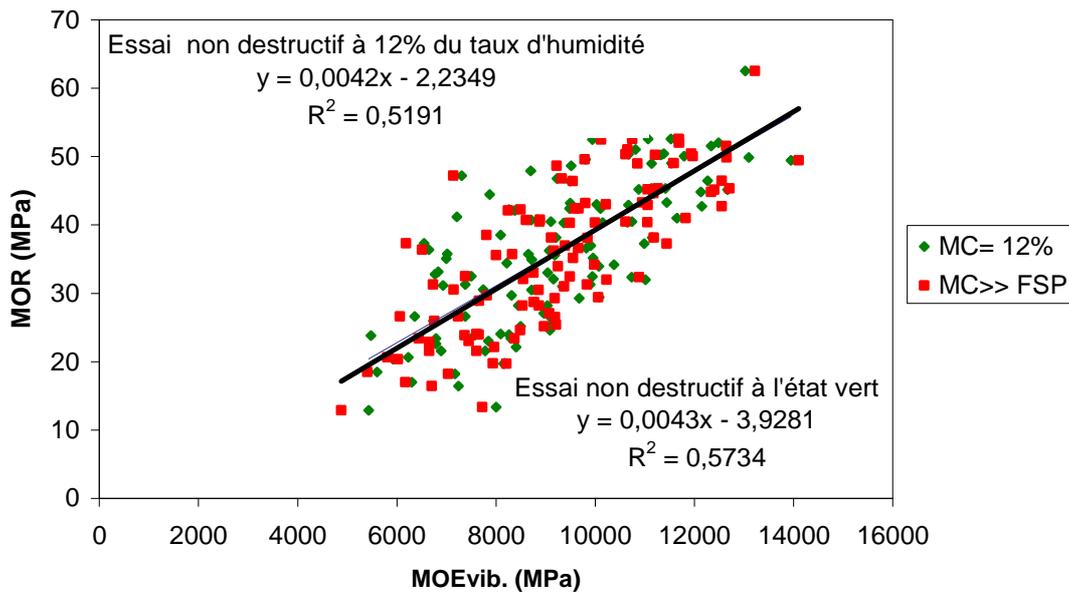


Figure 3.11 : Corrélation entre $MOE_{vib.}$ (taux d'humidité variable) et $MOR_{(12\%)}$, lot 3.

3.2.2 Analyse des résultats et discussions.

Le module d'élasticité de différentes essences à différents taux d'humidité a été mesuré par des tests vibratoires non destructifs d'une part et par des classiques essais quasi statiques de flexion quatre points. Un grand nombre d'essais a été effectué pour escompter des résultats statistiquement significatifs. Un modèle rhéologique permet une explication des différentes tendances.

Ces résultats montrent que **le module d'élasticité longitudinal obtenu par essais vibratoires s'avère quasi-invariable en fonction de la teneur en eau pour le matériau bois.**

Si cette observation se généralise, on s'affranchira de la contrainte de mener les essais de mesure du module élastique vibratoire d'une essence donnée au taux d'humidité 12% qui sert de référence dans le calcul des structures en bois pour avoir une estimation de la contrainte de rupture acceptable. Même à l'état vert, on pourrait mesurer facilement et rapidement le module d'élasticité vibratoire d'une pièce en bois et prédire par un modèle mathématique la contrainte de rupture en service.

Si la corrélation entre le module vibratoire et la résistance est bonne, un modèle de prédiction de la contrainte de rupture pourra donc être établi sous la forme d'une régression entre le module d'élasticité vibratoire quelque soit le taux d'humidité et la contrainte à la rupture des bois au taux d'humidité référentiel de 12%. Le test non destructif vibratoire du bois à un taux d'humidité inconnu (très souvent à l'état vert) permet de prédire la résistance à la rupture dans des conditions d'usage en génie civil (test standard de flexion quatre point à un taux d'humidité de 12%). En effet, en raison de la quasi invariabilité du MOE_{vib} avec la teneur en eau et compte tenu des corrélations entre MOE_{vib} et $MOE_{(12\%)}$, $MOE_{(12\%)}$ et $MOR_{(12\%)}$ on montre que $MOE_{vib(Taux\ d'humidité\ inconnu)}$ est bien corrélé à $MOR_{(12\%)}$. Ceci permet d'envisager remplir les exigences du marquage CE dans les premières phases de la production industrielle du bois de structure et notamment lorsque le bois est à l'état vert

L'essai vibratoire apparaîtrait comme un moyen efficace de classement des bois quelque soit le taux d'humidité.

Le module d'élasticité vibratoire s'obtient instantanément; il est l'expression de la matière solide qui constitue le bois à l'exclusion de l'eau. Tant que la matière solide constituant une éprouvette de bois reste la même, ce module d'élasticité vibratoire ne change pas, quelque soit l'état d'humidité du matériau.

Par contre, pendant l'essai statique à court terme, la force F doit être appliquée à vitesse constante de déplacement de la tête de chargement ajustée de telle façon que la force F_{max} soit atteinte en (300 ± 120) secondes (prEN 408, 2000). Cet essai, qui met plus de temps que l'essai vibratoire, prend en compte les effets visqueux dus à la présence de l'eau dans le matériau bois. C'est la raison pour laquelle le module d'élasticité statique est fortement influencé par le taux d'humidité de l'éprouvette.

Contrairement au MOE_{vib} , le MOE_{stat} et le MOR obtenus par essais quasi statiques suivant la norme EN 408 sont fortement tributaires du taux d'humidité du bois ([Wood Handbook, 1987], [Tsoumis, 1991]).

D'après *Wood Handbook*, une baisse de:

- 40% du MOE,
- 30% du MOR,

est envisagé entre le matériau bois à 10% du taux d'humidité et le même matériau à l'état vert.

Les figures 3.9 et 3.10 présentent des résultants du MOE et du MOR pour deux taux d'humidité, au dessus du Point de Saturation des Fibres (PSF) et au taux d'humidité standard de 12%.

Les coefficients de corrélation pour les droites MOE_{vib} -MOR (standard) et MOE_{vib} (taux d'humidité variable)- MOR (standard) sont similaires.

Les résultats consécutifs aux essais sus mentionnés peuvent être résumés en trois points suivants:

- Concernant le pin maritime et le moabi, le $MOE_{vib.}$ est quasi invariant avec le taux d'humidité au-dessus et en dessous du PSF lorsque la mesure est effectuée par des méthodes vibratoires en mesurant rigoureusement le poids d'une part et les sections et longueurs d'autre part pour tenir compte des variations dimensionnelles;
- Comme on s'y attend, ce n'est pas le cas lorsque le MOE est mesuré par essai quasi statique conformément à la norme EN 408. MOE décroît dans la zone hygroscopique, entre l'état anhydre et le PSF;
- Dans des conditions standard (Température = 20°C, H = 12%), les traitements statistiques montrent que les MOE statique et vibratoire sont similaires.

Ces observations physiques sont nouvelles. Car, à notre humble avis, la bibliographie du matériau bois n'a jamais fait mention de ces aspects. La bonne corrélation mise en évidence entre $MOE_{vib.}$ du bois à l'état vert et MOR obtenu dans des conditions standard permet d'envisager le classement du bois dès les premières phases de la production.

Morlier, (1992) a récapitulé la transition viscoélastique: la complaisance élastique $1/MOE$ dépend du temps de chargement dans le cas du fluage ou dans le cas de l'essai de flexion statique avec un temps de chargement relativement plus faible. Entre la mesure du MOE par essai ultrasonique (fréquence = 1MHz, $t_{charge} \leq 10^{-6}$ seconde) et le fluage (t_{charge} = quelques années), plusieurs méthodes intermédiaires sont utilisées pour l'obtention du MOE allant des essais vibratoires (dans notre cas, fréquence = 50 kHz, t_{charge} = 0,02 minutes) aux essais standards de flexion quasi statique (t_{charge} = 5 minutes).

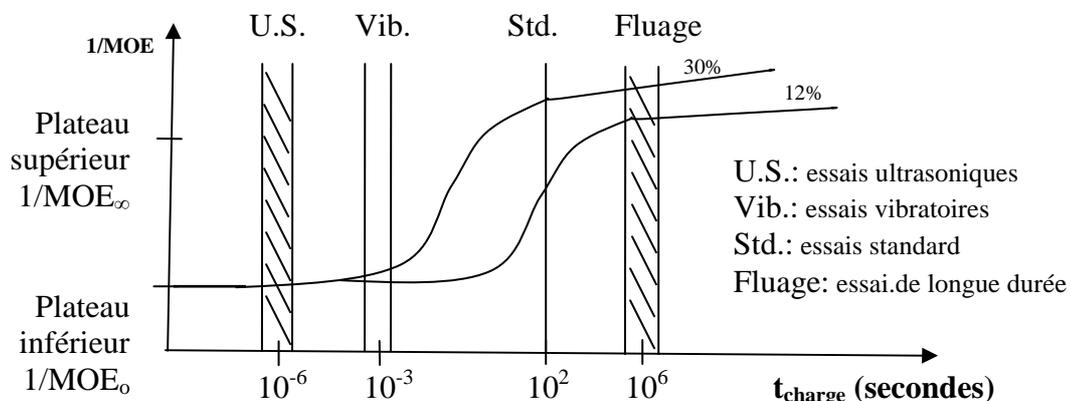


Figure 3.12 : Complaisance élastique du matériau bois en fonction du temps de charge (échelle logarithmique).

La tendance dépend de l'essence, des conditions climatiques (température et taux d'humidité) ainsi que de la qualité du bois (densité, présence de singularités)

Par exemple, concernant le pin maritime, Casagrande et Morlier (1997) ont établi que $1/MOE_{\infty}$ vaut environ deux fois $1/MOE_0$ dans des conditions standards. L'effet mécanosorptif, qui accélère la transition, n'a pas été pris en compte dans cette étude: les éprouvettes sont de dimensions structurales et le temps de chargement est bref dans l'essai vibratoire; il n'est donc pas pertinent ici de tenir compte du transport d'eau.

On utilise souvent des modèles rhéologiques comme support de la pensée dans la formulation de modèles de comportement uniaxial.

Certains éléments de base utilisés pour la modélisation du comportement mécanique du bois sont les suivants :

- le ressort qui schématise l'élasticité linéaire (modèle de Hooke) (Figure 3.13).

avec

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad (3.1)$$

E est le module d'élasticité;

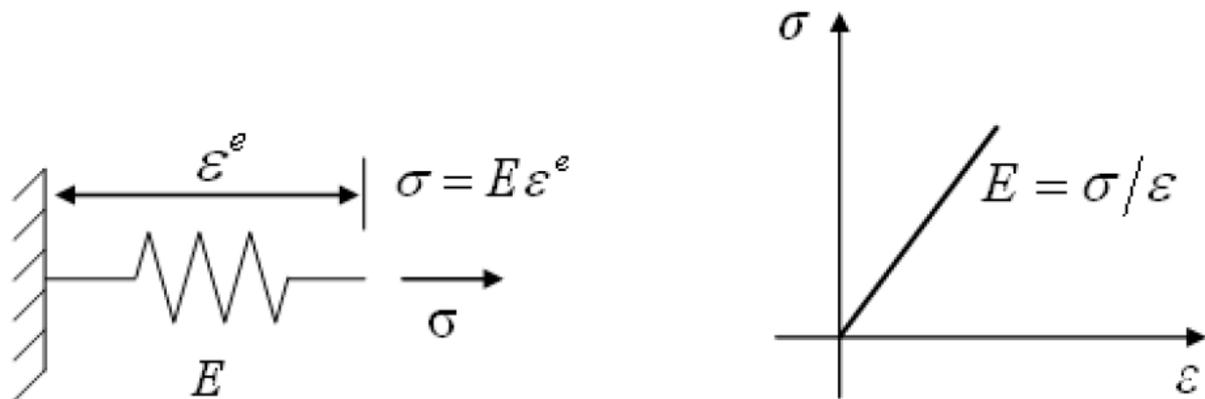


Figure 3.13: Ressort schématisant le modèle de Hooke (élasticité parfaite).

-l'amortisseur (Figure 3.14), ou pot visqueux, qui schématise la viscosité linéaire (Newton) ou non linéaire.

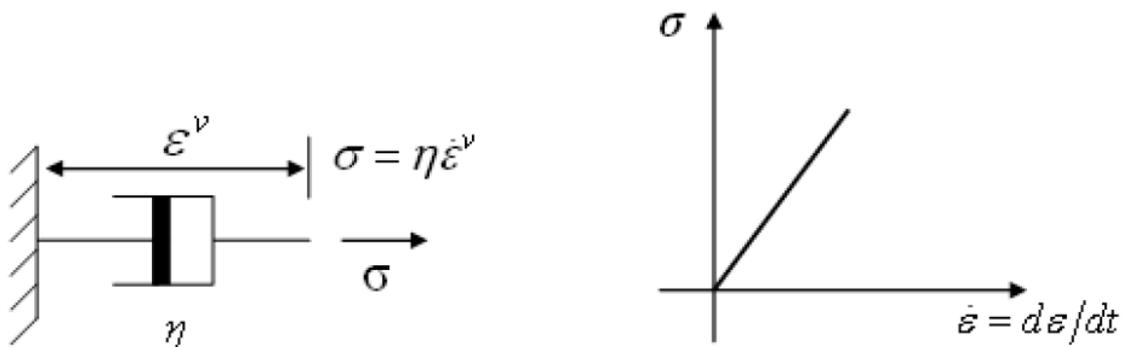


Figure 3.14: Modèle de Newton (viscosité parfaite).

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{\sigma_v}{\eta} \quad (\text{Viscosité linéaire}) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_v = \frac{(\sigma_v)^n}{\gamma} \quad (\text{Viscosité non linéaire}) \quad (3.3)$$

où η et γ sont des coefficients de viscosité. Le point représente la dérivée temporelle.

La déformation de viscosité peut se décomposer en une composante retardée et réversible ε_v^e (viscoélastique) et une composante irréversible ε_v^p (viscoplastique);

Ces différents modèles de base peuvent être associés :

- soit en série :

$$\varepsilon_{mec} = \sum_i \varepsilon^i \text{ et } \sigma = \sigma^i \quad (3.4)$$

- soit en parallèle :

$$\sigma = \sum_i \sigma^i \text{ et } \varepsilon_{mec} = \varepsilon^i \quad (3.5)$$

avec i représentant l'élément de base élastique, plastique ou visqueux.

Le modèle rhéologique simple qui permet d'expliquer la transition mise en relief est le modèle simplifié de Zener. Ce modèle résulte de l'association d'un groupement de Kelvin-Voigt (association d'un ressort linéaire de Hooke, élément élastique linéaire de module d'élasticité E_2 et d'un amortisseur linéaire de Newton représentant une résistance interne à la déformation, élément visqueux linéaire de coefficient η , montés en parallèle) en série avec un ressort de module d'élasticité E_1 . Il est souvent utilisé pour la déformation du bois retardé par une résistance interne du matériau en fonction du temps. La déformation du ressort retardée peut être récupérée après l'enlèvement des forces extérieures et sa réversibilité est aussi retardée et n'intervient qu'après un temps infini.

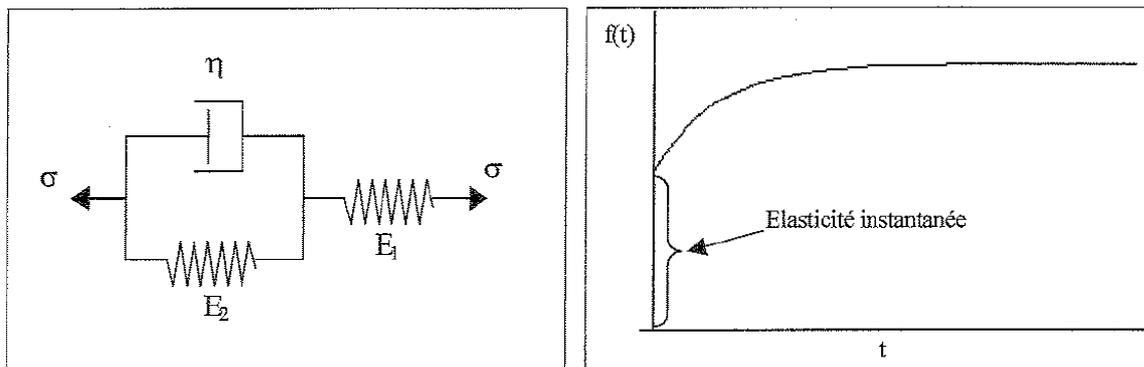


Figure 3.15: Modèle solide viscoélastique de Zener.

On y reconnaît :

- une fonction élasticité instantanée, apportée par le ressort de module E_1 ;
- une fonction élasticité retardée due à la présence du groupement Kelvin-Voigt (E_2 et η en parallèle).

L'élément visqueux (amortisseur) apporte une résistance d'amortissement à l'établissement de l'équilibre élastique dans le groupement de Kelvin. Il n'y a donc pas d'élasticité instantanée, mais seulement une élasticité différée.

La déformation du groupement Kelvin est ε_K et sa variable associée est la contrainte σ_K , somme de deux composantes: une contrainte élastique due au ressort σ_K^e et une contrainte anélastique due à l'amortisseur σ_K^a .

$$\sigma_K = \sigma_K^e + \sigma_K^a \quad (3.6)$$

On a :

$$\varepsilon_K = \varepsilon_K^e = \varepsilon_K^a; \quad \sigma_K^e = E_K * \varepsilon_K \text{ et } \sigma_K^a = \eta_K * \frac{\partial \varepsilon_K}{\partial t} \quad (3.7)$$

La relation de comportement constitutif pour ce modèle s'écrit :

$$\sigma = E_K \varepsilon_e + \eta_K \dot{\varepsilon}_v = E_K \varepsilon + \eta_K \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.8)$$

Dans le cas du fluage où $\dot{\sigma} = 0$ et $\varepsilon_{mec} = \varepsilon_v = 0$ au temps $t=0$, l'équation x devient :

$$E_K \varepsilon + \eta_K \frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \quad (3.9)$$

et la solution de cette équation est la suivante :

$$\varepsilon_d = K \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t\right) \quad (3.14)$$

où K est une constante déterminée par la condition de décharge au temps initial de décharge $t=t_d$.

Dans le cas de la relaxation où $\sigma = \sigma_0 = \text{constante}$ pendant une période $0 < t < t_d$, la déformation pour $t \geq t_d$, d'après xx devient :

$$\varepsilon_d = \frac{\sigma_0}{E_K} \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t_d\right) \quad (3.10)$$

Pour $t > t_d$, $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{constante}$. Donc, la valeur de la contrainte se maintient constante pour ce modèle.

Le modèle simplifié de Zener permet encore de mieux comparer le module instantané et le module de fluage (*Figure 3.11*).

Soumis pendant un certain temps à une tension constante σ_0 , puis délesté à un instant t_d , un solide conforme au modèle de Zener se déforme suivant le processus suivant :

- à $t=0$, $\sigma = 0$;
- à $t=0$, $\sigma = \sigma_0$;
- à $t = t_d$, $\sigma = \sigma_0$;
- à $t = t_d$, $\sigma = 0$;
- à $t = \infty$, $\sigma = 0$.

L'équation qui rend au mieux compte de ce processus, en exprimant les déformations de chacun des deux étages du modèle s'écrit:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right) \quad (3.11)$$

où $\tau_2 = \frac{\eta}{E_2}$ est le temps de retard du groupement Kelvin, c'est-à-dire le temps au bout duquel l'écart entre la déformation de ce groupement (second étage) et sa valeur définitive $\frac{\sigma_0}{E_2}$ est divisé par le nombre irrationnel e. τ_2 est la coordonnée horizontale du point d'inflexion de la courbe de fluage.

A partir de l'équation précédente, la fonction de fluage (ou fonction de retard) est :

$$f(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_2} \right) \quad (3.12)$$

Posons : $\frac{1}{K} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$

La formule (3.12) devient :

$$f(t) = \frac{1}{K} + \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{K} \right) e^{-t/\tau_2} \quad (3.13)$$

On voit que :

$$f(0) = \frac{1}{E_1} \quad (3.14)$$

Il s'en dit que **E_1 est le module d'élasticité instantanée MOE₀ du modèle**. C'est lui qu'on obtient dans un essai quasi-instantané comme l'essai vibratoire.

Par ailleurs, on voit que:

$$f(\infty) = \frac{1}{K} \quad (3.15)$$

Il ressort que $K = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$ représente le module d'élasticité différée obtenu au bout d'un temps théoriquement infini.

En divisant le numérateur et le dénominateur par E_2 , on peut écrire : $K = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{E_2}}$

Il est évident que $E_1 > \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{E_2}}$. Donc, le module vibratoire est supérieur au module statique.

Ceci corrobore les observations de Larsson et al. (1997) pour qui une comparaison des mesures sur 530 échantillons d'Épicéa a montré que les valeurs des modules vibratoires sont supérieures (de 10%) aux valeurs statiques.

Parmi les paramètres du modèle de Zener, η est considéré le paramètre qui est susceptible de varier avec les conditions climatiques d'après les lois d'Arrhenius et Ferry (Ferry, 1961).

$$\text{Loi d'Arrhenius:} \quad \eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{w}{RT}\right) \quad (3.16)$$

où w est une énergie d'activation, R est la constante des gaz parfaits, η_0 est un paramètre empirique.

$$\text{Loi de Ferry:} \quad \eta(H) = \alpha \exp\left(-\frac{V_0}{V_f}\right) \quad (3.17)$$

où V_0 est un volume constant, V_f est une fraction de volume dépendant du taux d'humidité H .

Ces lois sont la base de notre analyse physique ; la première évoque la superposition temps-température tandis que la seconde, très peu utilisée pour le matériau bois, stipule l'évolution de la viscoélasticité (et donc celle du coefficient η et du temps de retard τ_2) en fonction du taux d'humidité.

Lorsque l'on mesure le taux d'humidité de l'état sec au PSF, τ_2 diminue et la courbe de transition se déplace vers la droite. Cet effet est généralement observé dans les tests standard. Huet (1998) donne l'évolution du fluage avec le taux d'humidité pour un temps de charge donné.

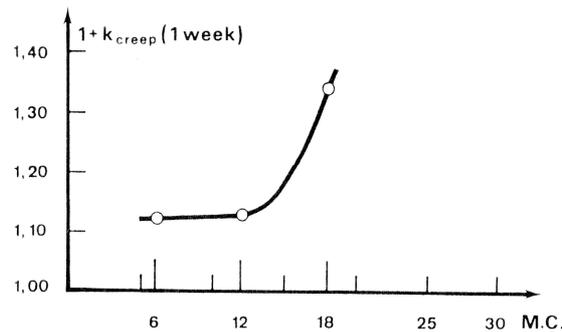


Figure 3.16 : $1+k_{creep}$ en fonction du taux d'humidité en flexion à 25°C (Huet et al., 1981);

$$1+k_{creep} (1 \text{ semaine}) \text{ vaut } \frac{\frac{1}{MOE(1semaine)}}{\frac{1}{MOE_0}}$$

Plus le taux d'humidité est grand dans la zone hygroscopique, plus la transition viscoélastique l'est aussi:

- Lorsque $H \gg FSP$, les valeurs du plateau inférieur concernent le test vibratoire, mais non les tests de flexion standards;
- Pour $H = 12\%$, les valeurs du plateau inférieur concernent à la fois le test vibratoire, et les tests de flexion standard ;

En bref, MOE_0 et E_1 sont invariants avec le taux d'humidité tandis que η (et donc τ_2) change avec le taux d'humidité. Des essais effectués sur des centaines d'éprouvettes montrent que MOE vibratoire est quasi invariant avec la teneur en eau. La corrélation entre MOR et MOE_{vib}

à 12% du taux d'humidité peut être extrapolée par la corrélation entre MOR à 12% du taux d'humidité et MOE_{vib} . A n'importe quel taux d'humidité.

Le comportement du bois n'est linéaire qu'en première approximation. Le comportement réel du matériau bois est plus complexe. Le modèle rhéologique simplifié dit de Zener permet de comprendre que le module élastique instantané est strictement supérieur du module élastique à long terme. On suppose ici que les phénomènes dissipatifs associés à l'élasticité peuvent être traduits par la viscosité du matériau. On parle de viscoélasticité.

3.3 Comparaison entre module élastique vibratoire et module élastique statique.

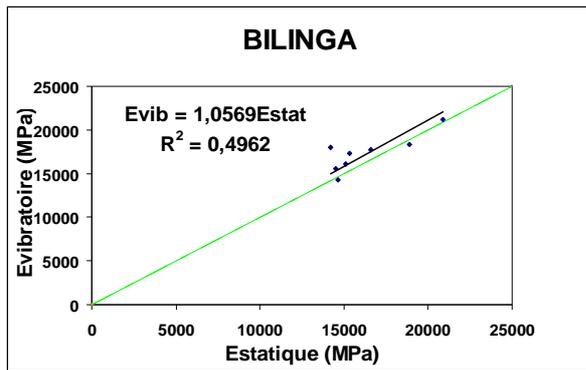
Cette campagne a pour objectif de comparer les modules vibratoires aux modules statiques et d'établir un modèle prédictif du module d'une éprouvette de bois du bassin du Congo à partir d'un paramètre non destructifs, le module dynamique.

Ces essais ont été effectués lors de la deuxième campagne du LRBB. Des éprouvettes sans défaut de dimensions $20 \times 20 \times 400 \text{ mm}^3$ ont été initialement conditionnées dans une enceinte pour atteindre le taux d'humidité de référence de 12%. Chaque échantillon subit d'abord un essai vibratoire (non destructif) avant d'être soumis entre les mors du banc d'essai pour un essai de flexion quatre point tel qu'indiqué au chapitre précédant.

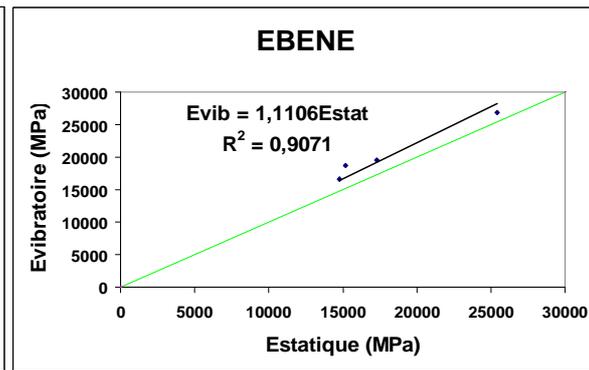
3.3.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais.

Les *Figures 3.17* présentent la courbe de régression linéaire du module élastique statique en fonction du module d'élasticité vibratoire pour chaque essence, tandis que les *Figures 3.18* présentent la même réalité pour tous les échantillons de la campagne. La *Figure 3.18 b* notamment permet de distinguer des « nuages de corrélation » spécifiques aux essences dans une régression générale.

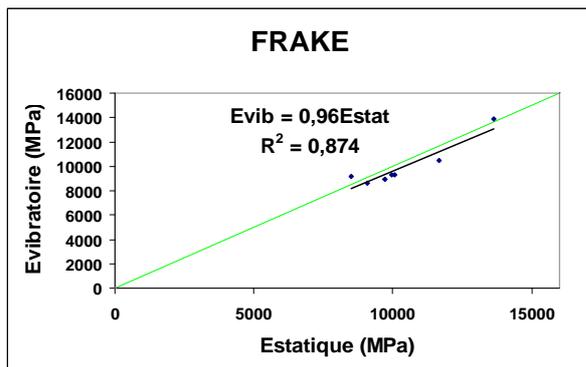
La *Figure 3.19* présente les fréquences cumulées du rapport des deux modules vibratoires en vue de mieux apprécier leur dépendance.



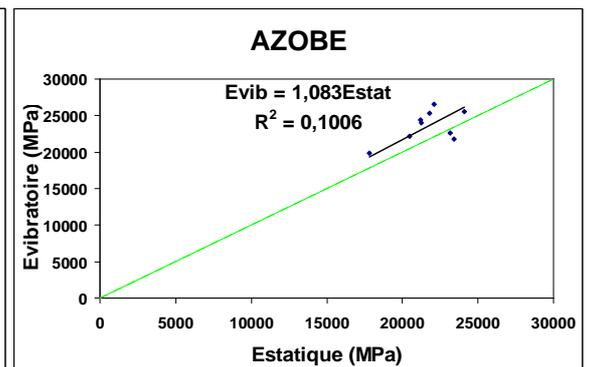
a)



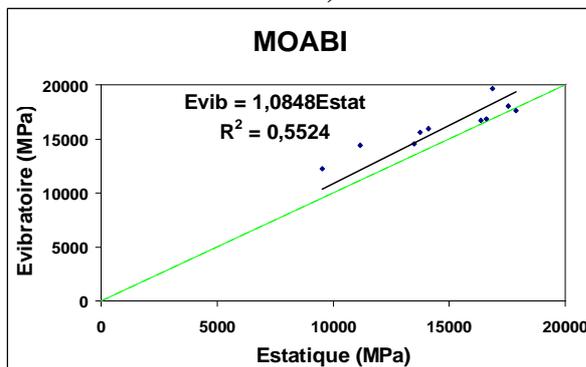
b)



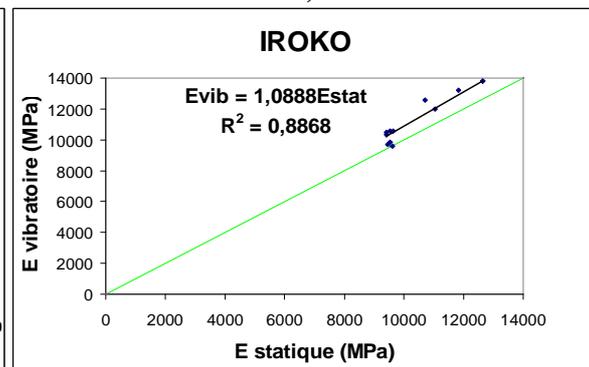
c)



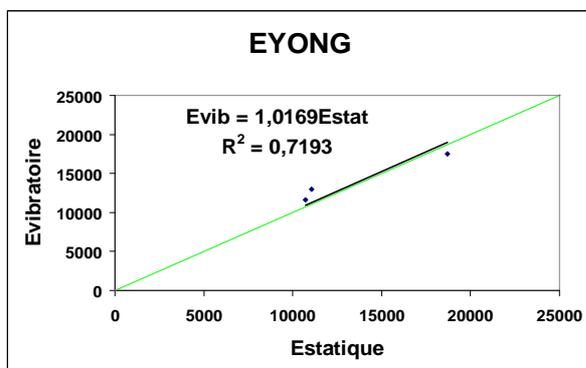
d)



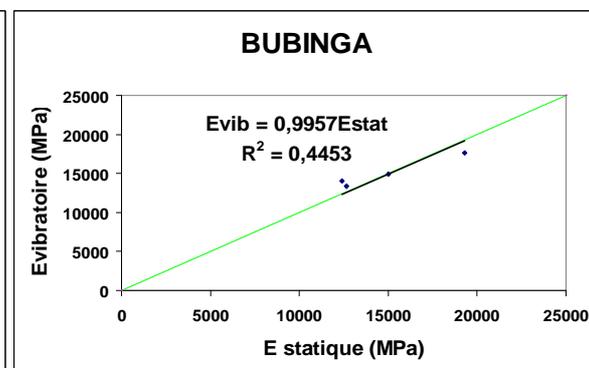
e)



f)

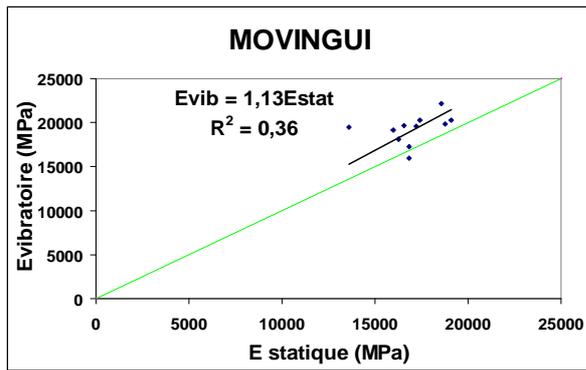


g)

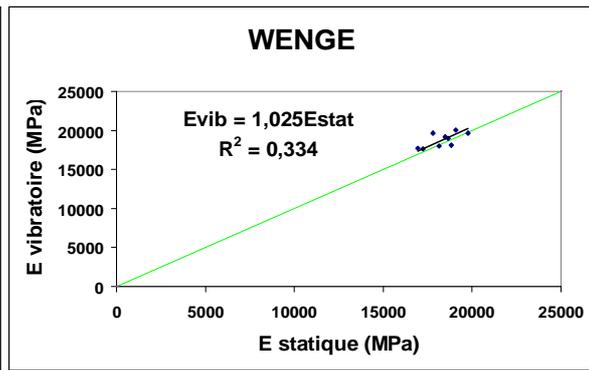


h)

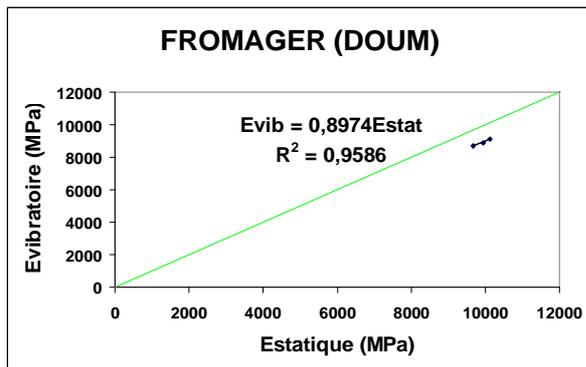
Figures 3.17: Exemples de régression linéaire du MOE vibratoire en fonction du MOE statique.



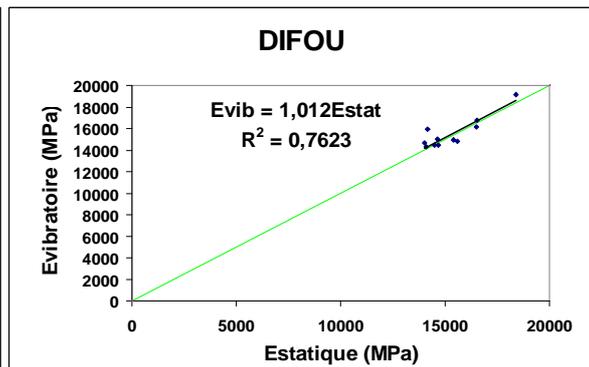
i)



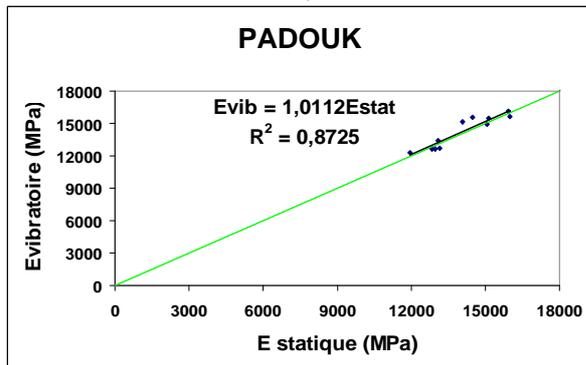
j)



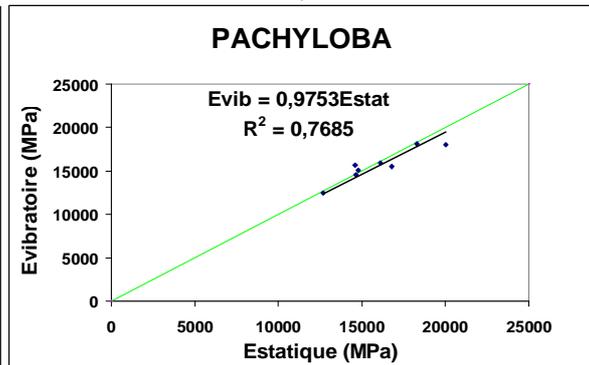
k)



l)

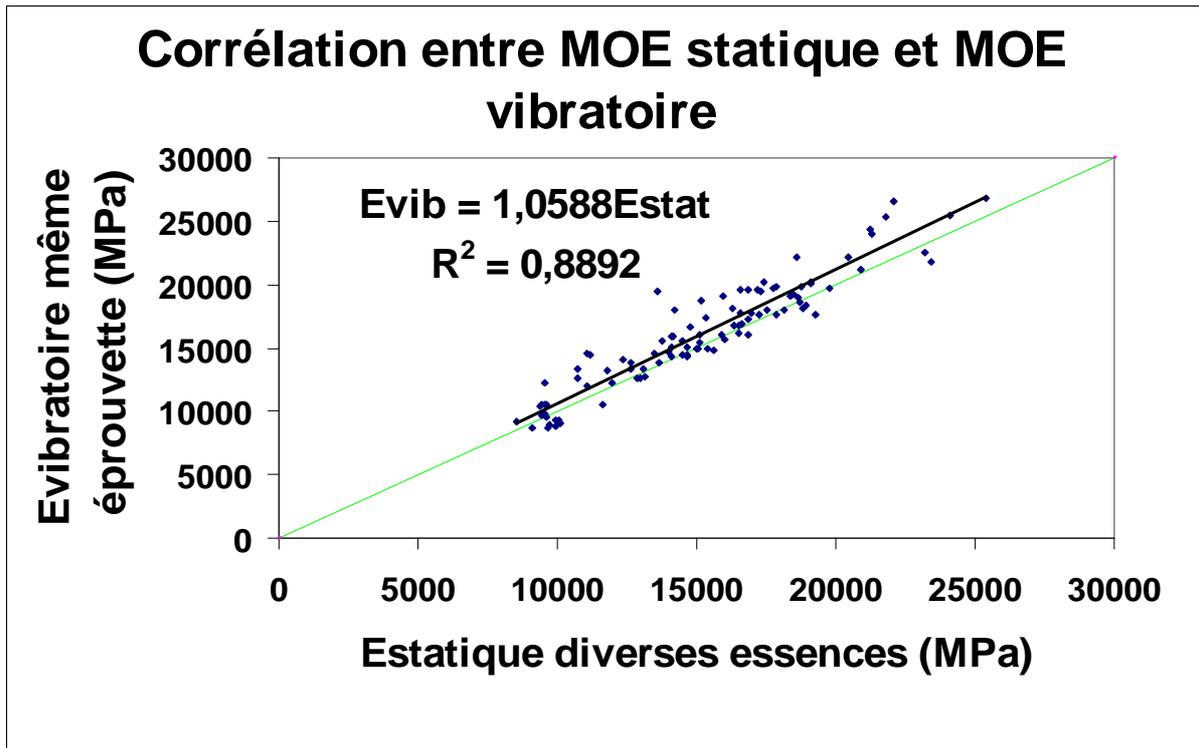


m)

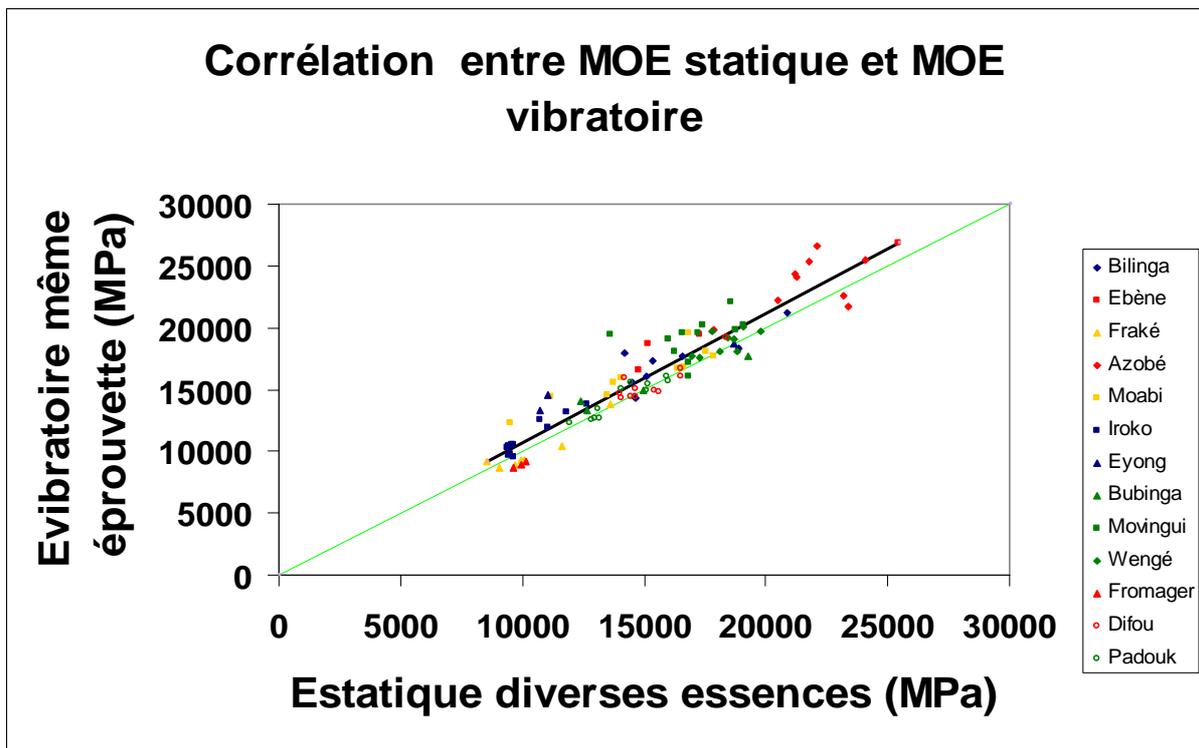


n)

Figures 3.17: Exemples de régression linéaire de MOE vibratoire en fonction de MOE statique.



a)



b)

Figures 3.18: Corrélation entre MOE statique et MOE vibratoire pour tous les échantillons ayant subi l'essai de flexion statique.

a) et b) représentent la même courbe ; en b) le jeu des couleurs et des figurines fait ressortir les noms des essences.

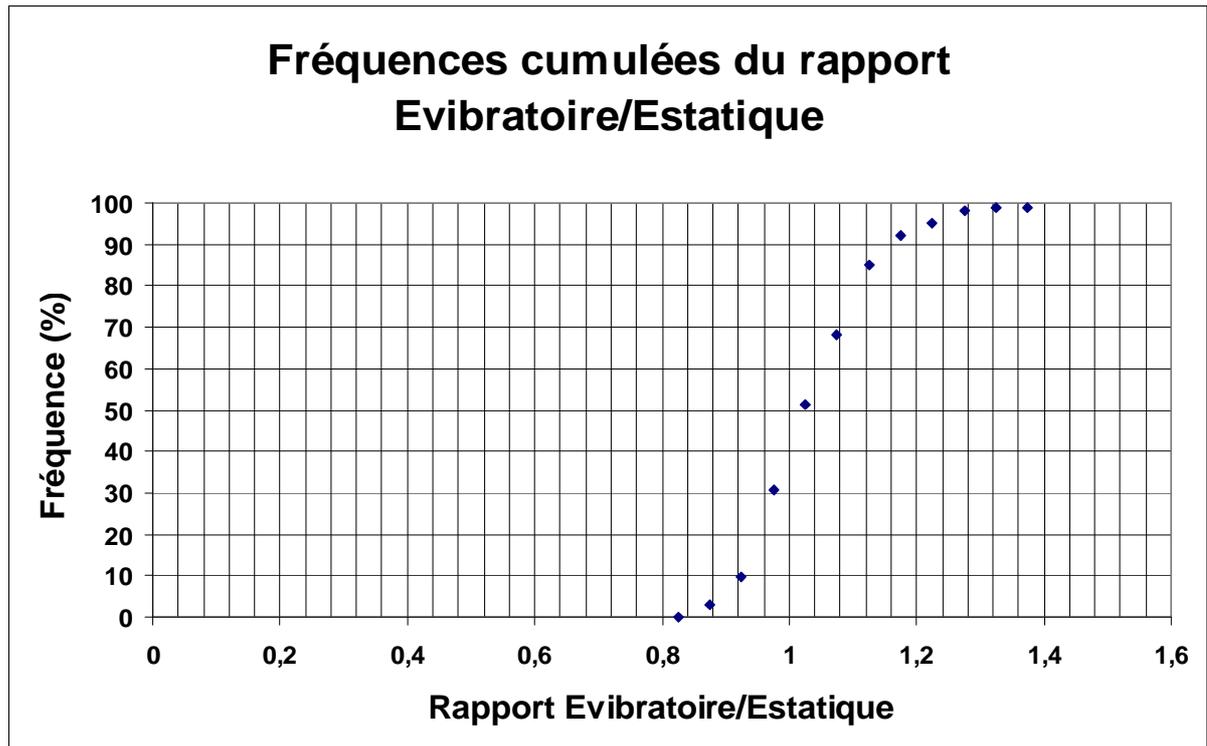


Figure 3.19: Courbe des fréquences cumulées du rapport entre MOE vibratoire et MOE statique.

3.3.2 Analyse des résultats et discussions.

3.3.2.1 Comparaison avec d'autres sources.

Casagrande (1998) a effectué plusieurs campagnes successives pour prédire les propriétés élastiques de différents matériaux, notamment des lamelles simples de bois et des lamelles aboutées. Elle a obtenu une bonne corrélation entre le MOE vibratoire (MOE_{vib}) et le MOE obtenu par flexion quatre points (MOE_{stat} selon la norme EN 408). Le rapport MOE_{vib}/MOE_{stat} est de 1 ± 0.05 pour plus de 80% des résultats. La Figure 3.19 représente la distribution cumulée du MOE_{vib} / MOE_{stat} d'un même lot de poutre.

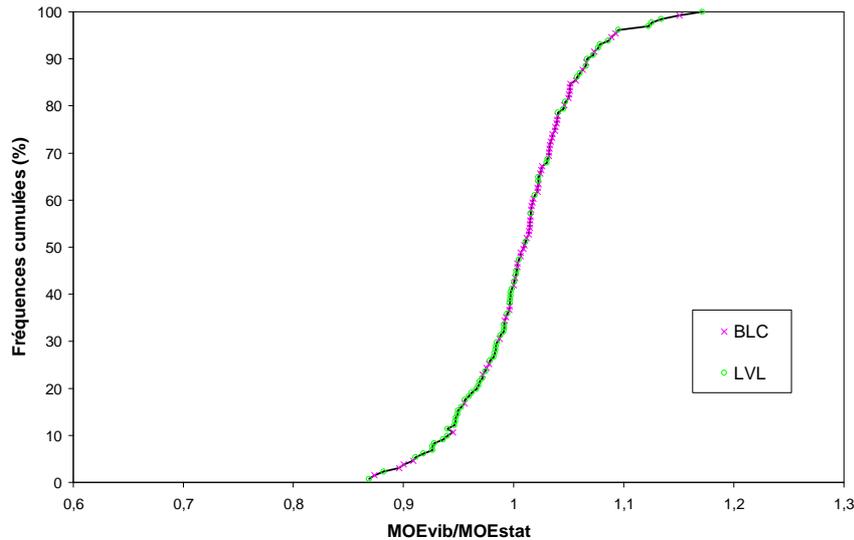


Figure 3.20: Distribution des MOEvib/MOEstat pour du Lamellé-collé et du LVL (Casagrande, 1998).

Faye (1997) a, quant à elle, effectué ce même type d'essais sur de l'Épicéa brut et abouté de façon traditionnelle. Elle a montré que la valeur du MOEvib du bois abouté est un peu supérieure à la valeur du MOEvib du bois massif, pour un même lot de bois. Cette différence ne s'observe plus lorsque l'on raisonne en terme de distribution cumulée.

3.3.2.2 Commentaires.

De la comparaison du module d'Young déterminé à partir du premier mode de vibration en flexion (basé sur la formulation de Bernoulli) par essais vibratoires dans la direction longitudinale avec ceux déterminés par essais statiques dans la même direction, il ressort que le module dynamique en flexion et le module statique sont du même ordre de grandeur.

Toutefois, il s'est avéré que le module vibratoire est supérieur au module statique d'environ 6%.

La viscoélasticité semble être la principale cause de cette différence. En effet les méthodes longitudinales mettent en jeu des impulsions très brèves reliées à des ondes de plus hautes fréquences que les ondes de flexion. Les ondes longitudinales se propageant à des vitesses plus importantes pour les hautes fréquences, les modules d'Young, déterminés à partir des vibrations longitudinales et fonctions de la vitesse au carré, surestiment donc le module statique. Nous pouvons aussi expliquer cette surestimation par le fait que le MOEvib prend en compte la pièce dans son ensemble alors que le MOEstat prend en compte une valeur plus locale ; soit le MOE du courson le plus faible. Selon la norme EN 408, seule la partie centrale de la poutre est expertisée. Enfin, la formulation de Bernoulli est un modèle parmi plusieurs. Certes, si l'on adopte d'autres formulations (Timoshenko, Rayleigh, Bordonné, etc.), on pourrait s'attendre logiquement à des conclusions plus ou moins différentes.

Dès lors, la méthode qui consiste à calculer le module élastique par essai vibratoire à partir du premier mode de vibration en flexion (formule de Bernoulli) est donc précise et performante. Comme elle surestime le module élastique, cette méthode valorise mieux le bois dans ses usages structuraux que la méthode statique,

La méthode vibratoire apparaît donc comme extrêmement pertinente pour évaluer le module d'élasticité du matériau bois. Car, les essais normalisés de flexion 4 points, réalisés dans des

conditions de chargement quasi statique valident les résultats obtenus par des essais vibratoires.

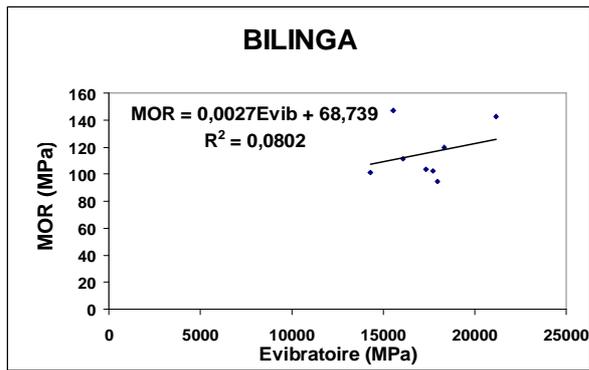
3.4 Corrélation entre module élastique vibratoire et contrainte de rupture.

Cette campagne a pour objectif de comparer les modules vibratoires aux contraintes de rupture (ou résistances mécaniques) et d'établir un modèle prédictif de la résistance mécanique d'une éprouvette de bois du bassin du Congo à partir d'un paramètre non destructifs, le module dynamique.

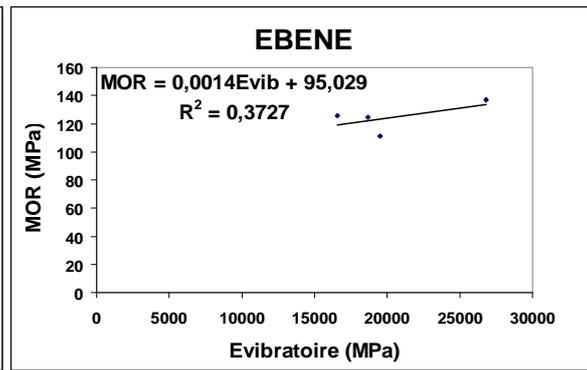
Ces essais ont été effectués lors de la deuxième campagne du LRBB. Des éprouvettes sans défaut de dimensions 20x20x400 mm³ ont été initialement conditionnées dans une enceinte pour atteindre le taux d'humidité de référence de 12%. Chaque échantillon subit d'abord un essai vibratoire (non destructif) avant d'être soumis entre les mors du banc d'essai pour un essai de flexion quatre point jusqu'à la rupture tel qu'indiqué au chapitre précédant.

3.4.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais.

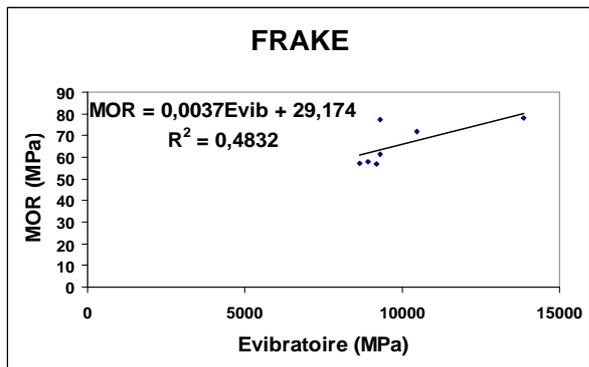
Les *Figures 3.21* présentent la courbe de régression linéaire du module de rupture en flexion statique en fonction du module d'élasticité vibratoire pour chaque essence, tandis que les *Figures 3.22* présentent la même réalité pour tous les échantillons de la campagne. La *Figure 3.22 b* notamment permet de distinguer des « nuages de corrélation » spécifiques aux essences dans une régression générale.



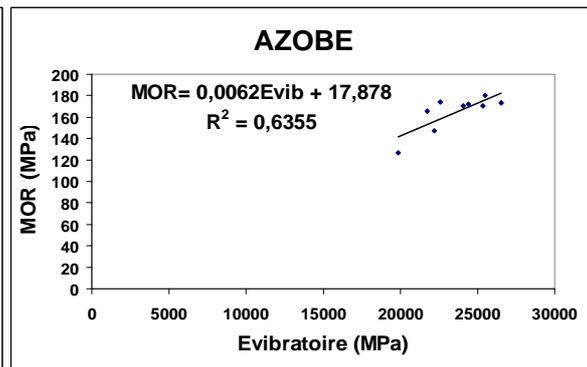
a)



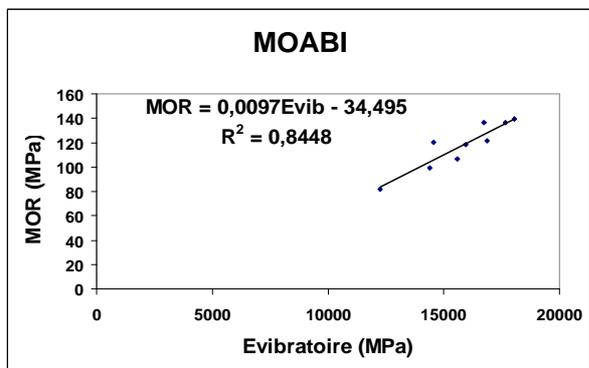
b)



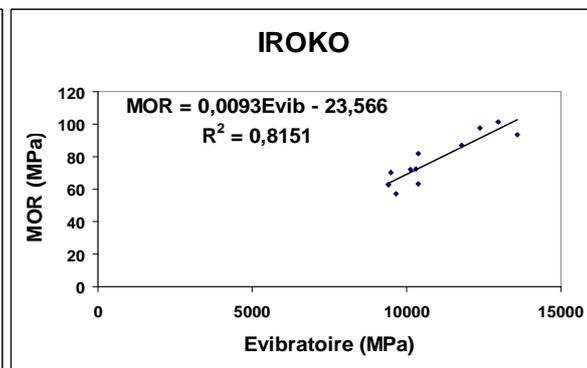
c)



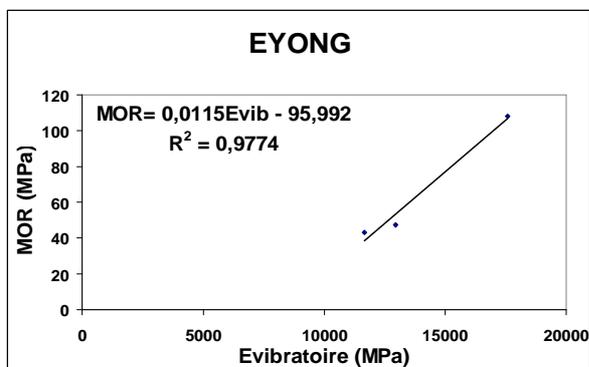
d)



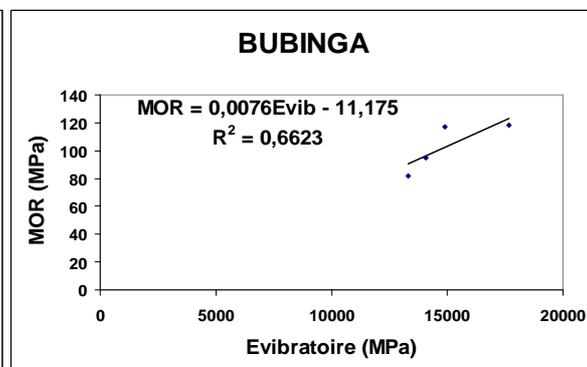
e)



f)

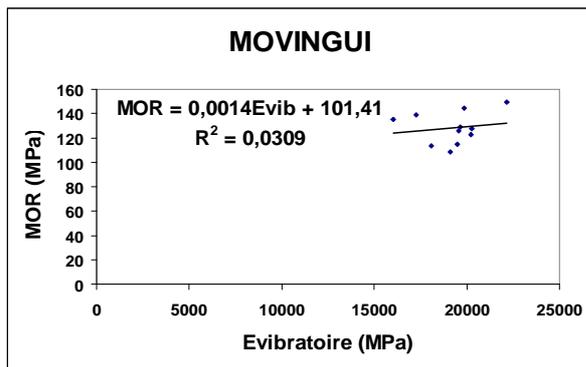


g)

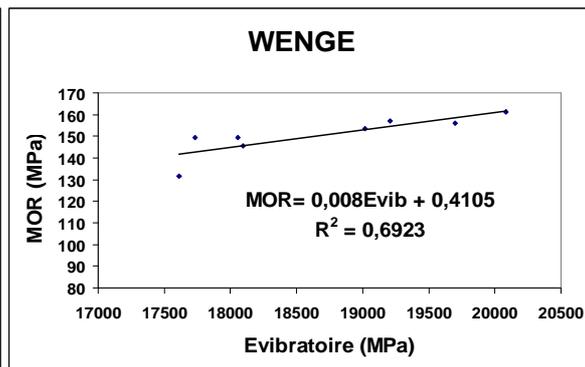


h)

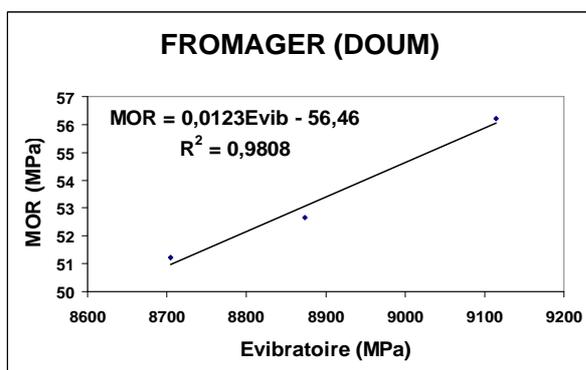
Figures 3.21: Exemples de régressions linéaires de la contrainte de rupture en fonction du MOE vibratoire.



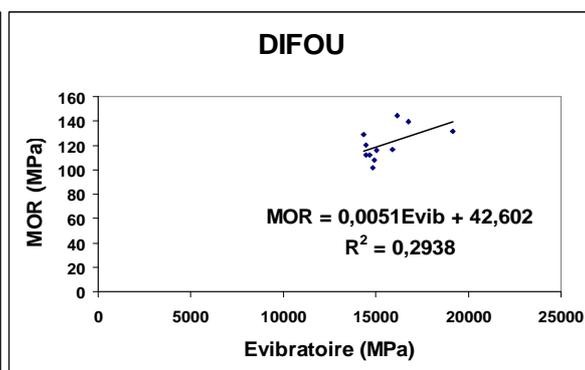
i)



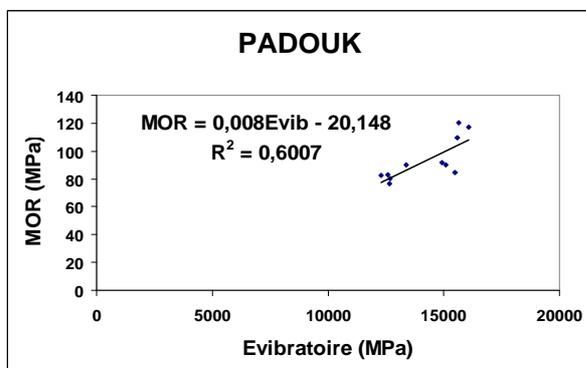
j)



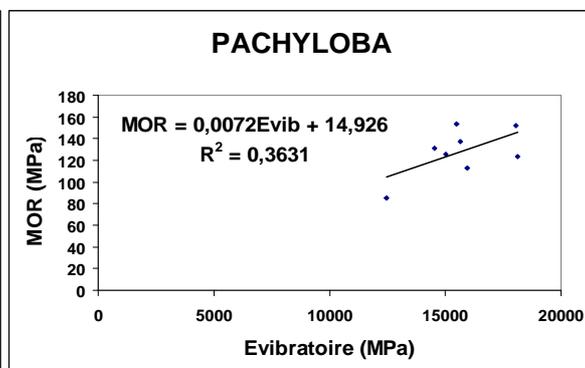
k)



l)

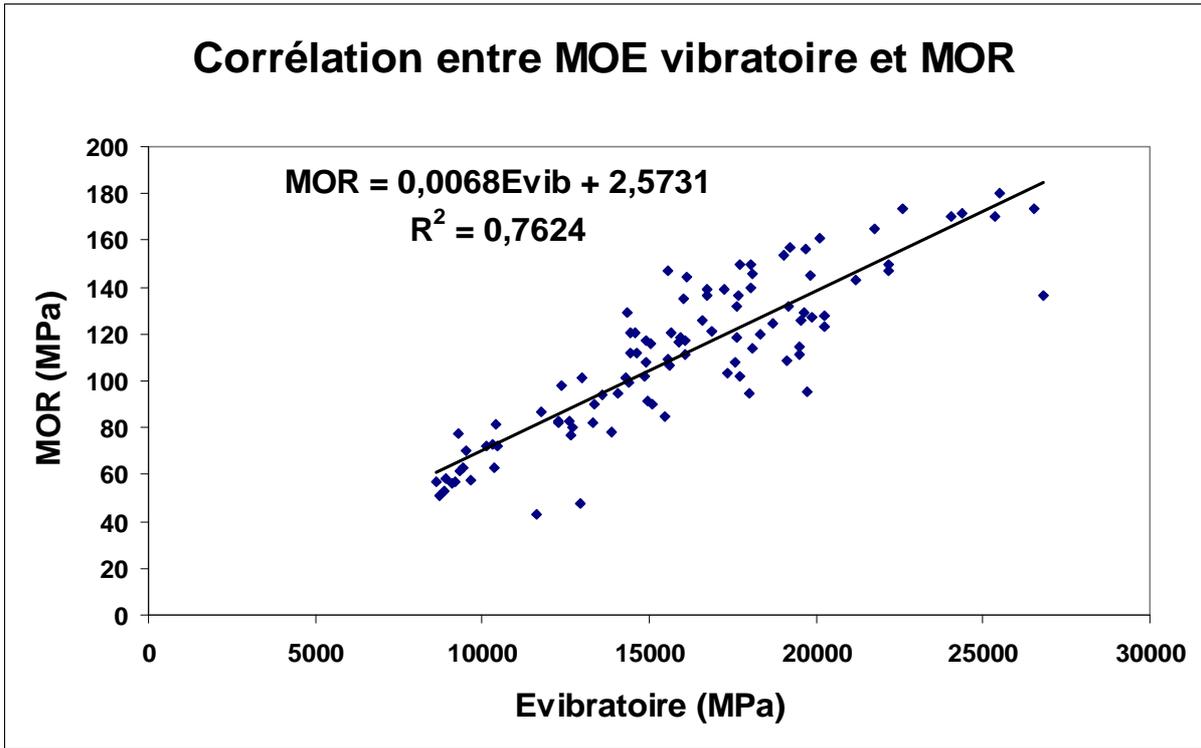


m)

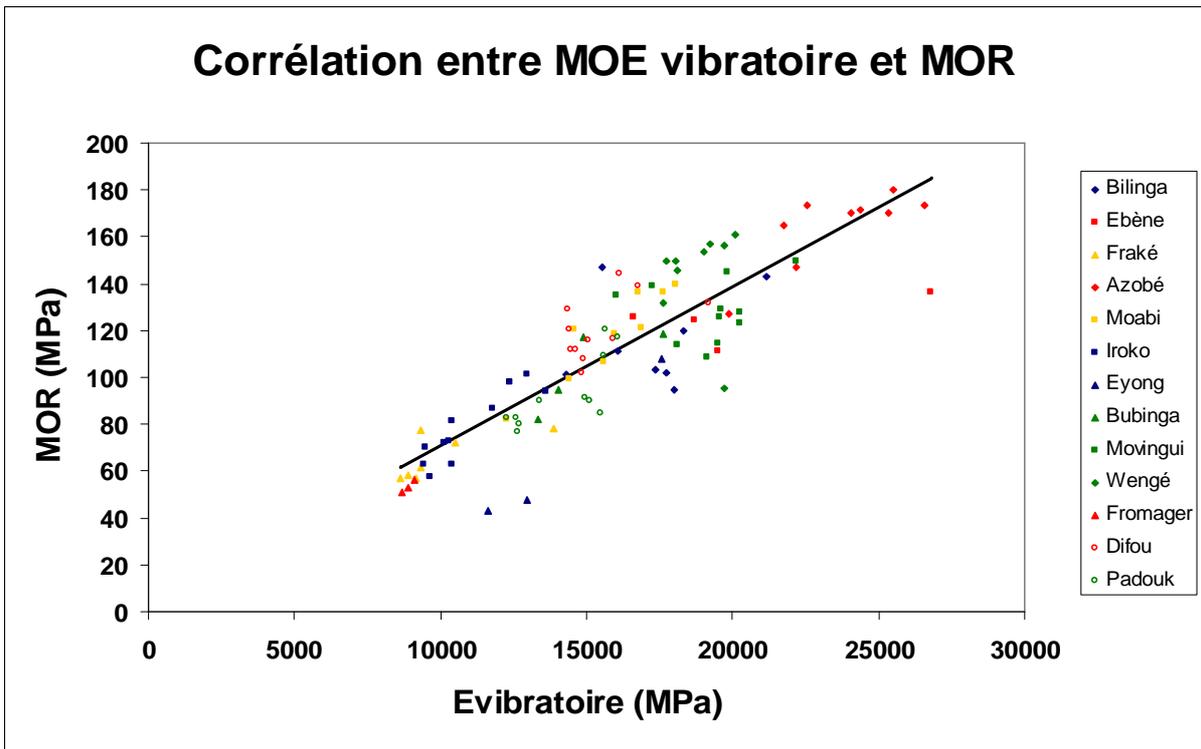


n)

Figures 3.21: Exemples de régressions linéaires de la contrainte de rupture en fonction du MOE vibratoire.



a)



b)

Figures 3.22: Corrélation entre MOR et MOE vibratoire pour tous les échantillons ayant subi l'essai de flexion statique jusqu'à la rupture.

a) et b) représentent la même courbe ; en b) le jeu des couleurs et des figurines fait ressortir les noms des essences.

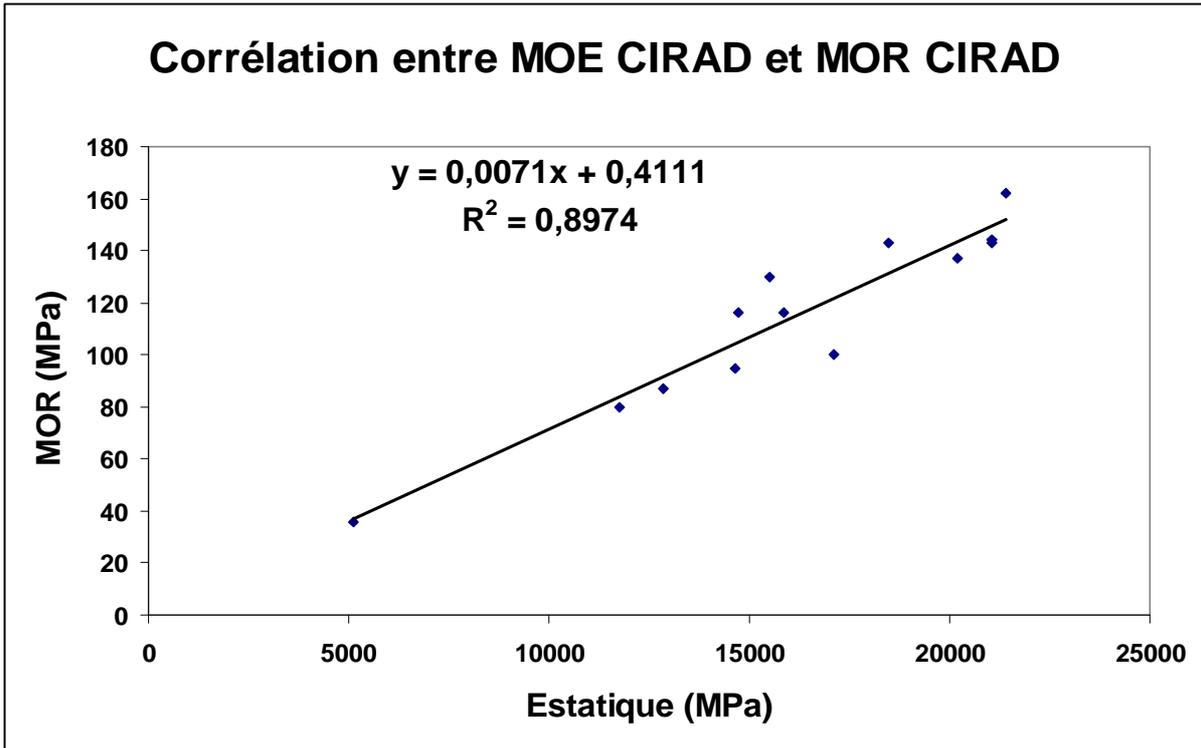
3.4.2 Analyse des résultats et discussions.

3.4.2.1 Validation de la méthode par comparaison avec d'autres sources.

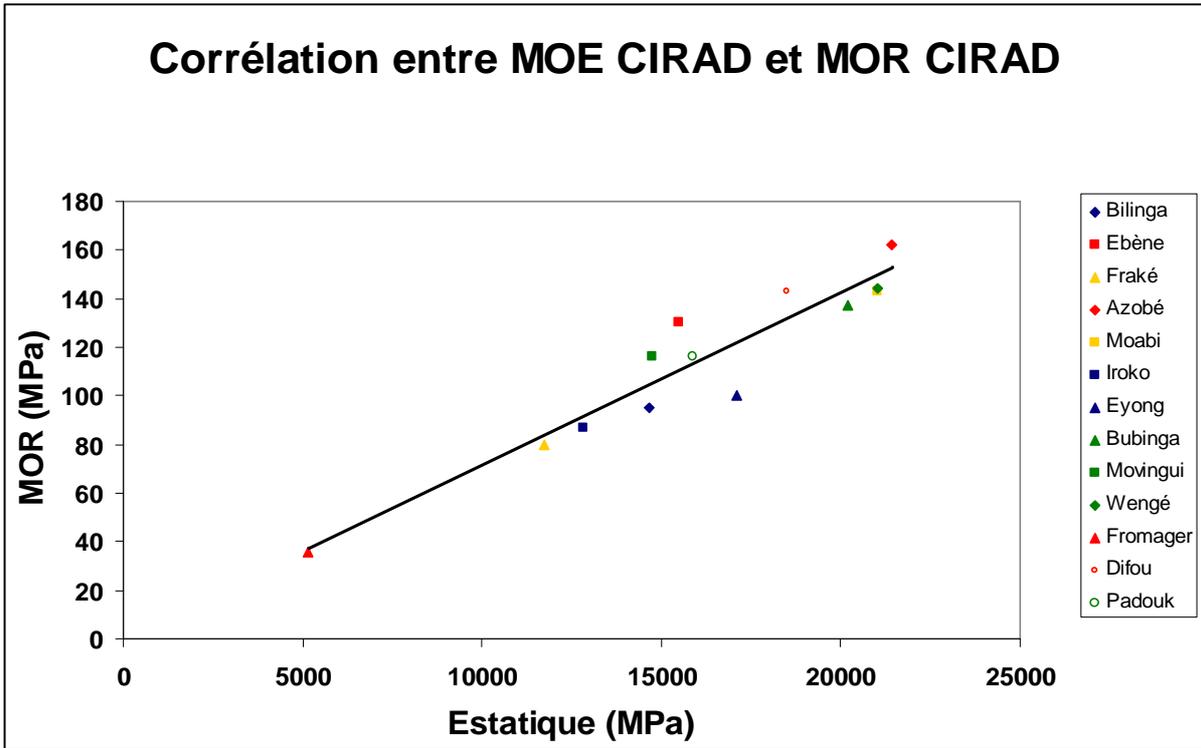
Le CIRAD a conçu, en 2004, un cédérom intitulé « Tropix 5.0 » à partir de sa base de données qui regroupe l'ensemble des résultats d'essais de caractérisation menés par ses laboratoires et son centre d'usinage. On y trouve, pour chaque essence, la description macroscopique et l'aspect du bois, les principales propriétés physiques et mécaniques, le comportement durant les opérations de transformation et de mise en œuvre, les utilisations effectives ou potentielles. En prenant les valeurs moyennes du module statique et du module de rupture pour chaque essence de la deuxième campagne du LRBB, on peut dresser la corrélation illustrée aux *Figures 3.23*

De même, l'Association Internationale Technique des Bois Tropicaux (ATIBT), dans le but de mieux faire connaître les essences tropicales pour qu'elles soient mieux utilisées, a publié en décembre 1986 le premier volume de l'Atlas des Bois Tropicaux consacré à l'Afrique.

D'après l'auteur, « *Les valeurs numériques mentionnées correspondent à des moyennes d'espèce calculées à partir de plusieurs arbres et de plusieurs éprouvettes par arbre* ». En relevant ces valeurs pour le MOE et le MOR, pour les essences répertoriées de la deuxième campagne du LRBB, on obtient le modèle mathématique de la *Figure 3.22*. Notons que certaines essences comme le difou, le fromager et le fraké ne figurent pas dans cette base de données.

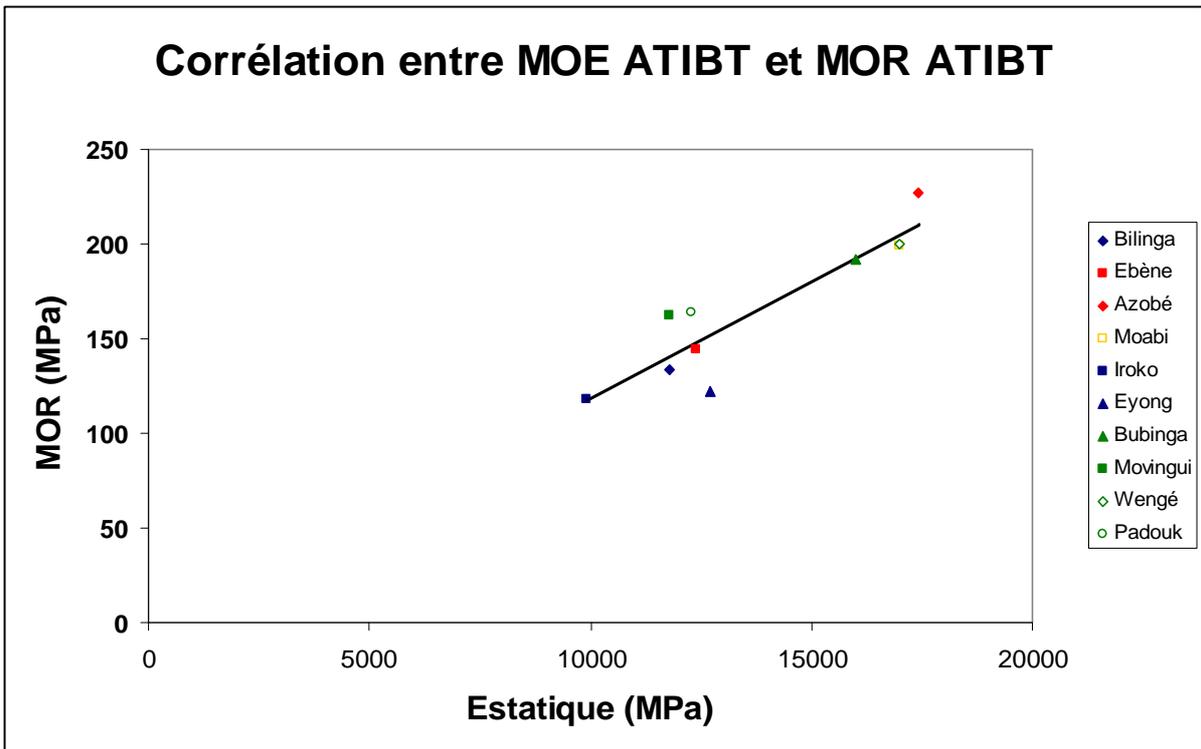
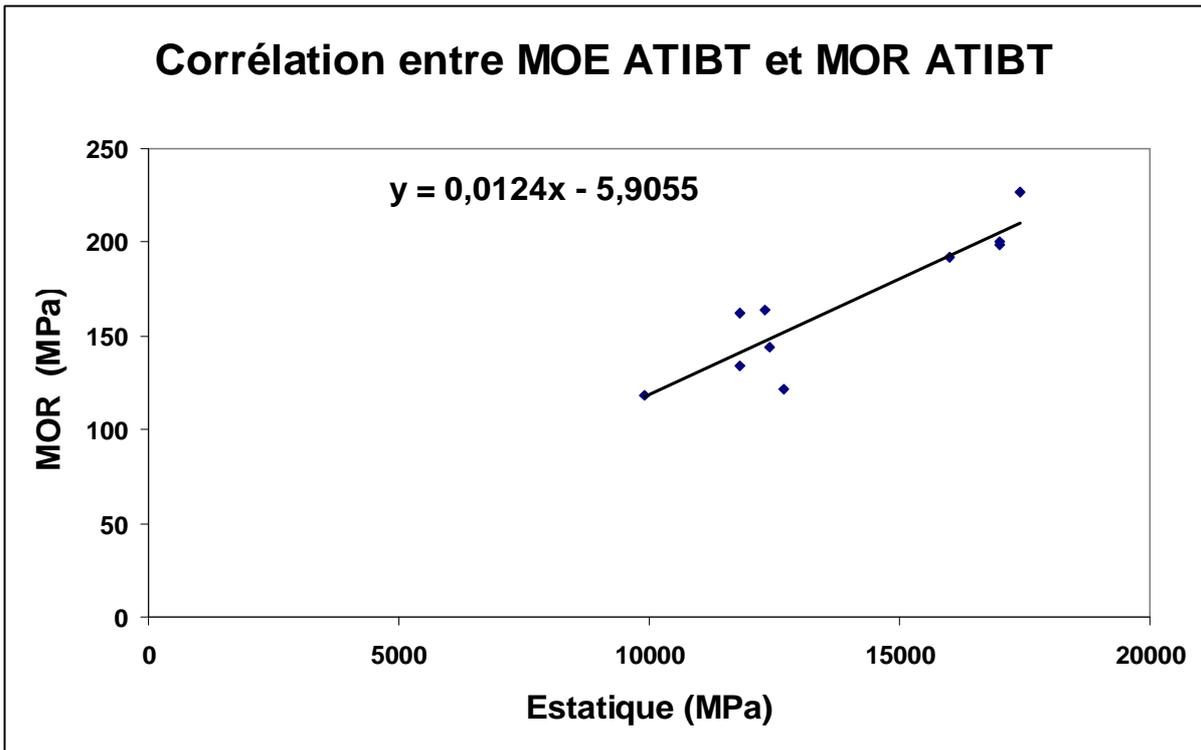


a)



b)

Figures 3.23: Corrélation entre MOR et MOE à 12% d'humidité d'après la base de données du CIRAD (Gérard et al., 2004). a) et b) représentent la même courbe ; en b) le jeu des couleurs et des figurines fait ressortir les noms des essences.



Figures 3.24: Corrélation entre MOR et MOE à 12% d'humidité d'après la base de données de l'ATIBT(1986). a) et b) représentent la même courbe ; en b) le jeu des couleurs et des figurines fait ressortir les noms des essences.

Une troisième base de données intitulée « Tropical Timbers Database » existe sous forme de cédérom conçu en 2001 par International Tropical Timber Organisation (ITTO) appelé

aussi Organisation Internationale des Bois Tropicaux. Son exploitation effectuée et sur 58 essences bois camerounaises conduit à la *Figure 3.25*.

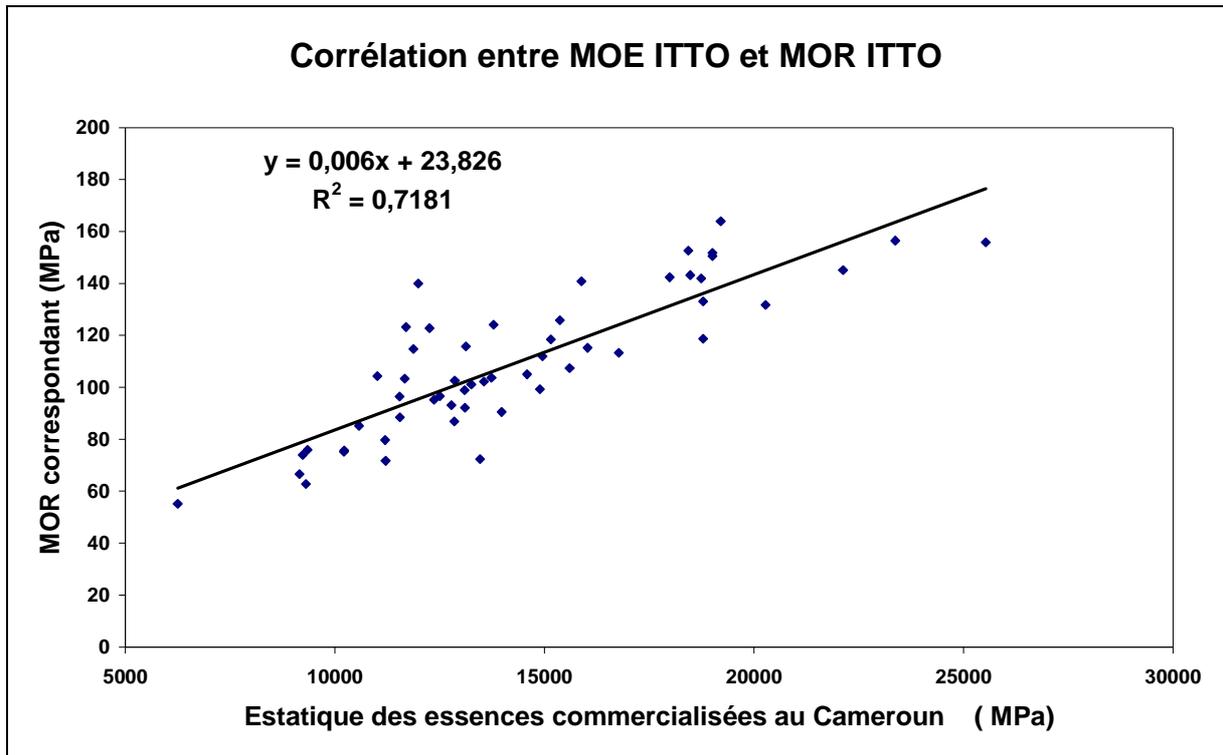


Figure 3.25: Corrélation entre MOR et MOE à 12% d'humidité d'après la base de données « Tropical Timbers Database » (ITTO, 2001).

Le *Tableau 3.5* donne les rapports des coefficients directeurs des diverses droites de régressions.

Tableau 3.5: Comparaison des coefficients directeurs des courbes MOR=f(MOE).

	Nos travaux $\tan \alpha_0 = 0,0068$ $R^2 = 0,7624$	CIRAD $\tan \alpha_1 = 0,0071$ $R^2 = 0,8974$	ITTO $\tan \alpha_2 = 0,006$ $R^2 = 0,7181$	ATIBT $\tan \alpha_3 = 0,0124$
Nos travaux $\tan \alpha_0 = 0,0068$ $R^2 = 0,7624$	$\tan \alpha_0 / \tan \alpha_0 =$ 1	$\tan \alpha_0 / \tan \alpha_1 =$ 0,96	$\tan \alpha_0 / \tan \alpha_2 =$ 1,13	$\tan \alpha_0 / \tan \alpha_3 =$ 0,55
CIRAD $\tan \alpha_1 = 0,0071$ $R^2 = 0,8974$	$\tan \alpha_1 / \tan \alpha_0 =$ 1,04	$\tan \alpha_1 / \tan \alpha_1 =$ 1	$\tan \alpha_1 / \tan \alpha_2 =$ 1,18	$\tan \alpha_1 / \tan \alpha_3 =$ 0,57
ITTO $\tan \alpha_2 = 0,006$ $R^2 = 0,7181$	$\tan \alpha_2 / \tan \alpha_0 =$ 0,88	$\tan \alpha_2 / \tan \alpha_1 =$ 0,86	$\tan \alpha_2 / \tan \alpha_2 =$ 1	$\tan \alpha_2 / \tan \alpha_3 =$ 0,48
ATIBT $\tan \alpha_3 = 0,0124$	$\tan \alpha_3 / \tan \alpha_0 =$ 1,82	$\tan \alpha_3 / \tan \alpha_1 =$ 1,75	$\tan \alpha_3 / \tan \alpha_2 =$ 2,07	$\tan \alpha_3 / \tan \alpha_3 =$ 1

3.4.2.2 Commentaires.

Les bases de données ne sont jamais identiques en raison de plusieurs paramètres au premier rang desquels figurent l'échantillonnage, le matériel et la méthode. On note toutefois qu'à l'exclusion de la base de données ATIBT, toutes les autres sont en accord avec nos investigations. Ceci confirme la pertinence de notre démarche expérimentale.

Nous avons, avec la quantité d'essais réalisée, tenté d'établir la corrélation entre module vibratoire et résistance pour diverses essences du bassin du Congo, l'objectif étant d'obtenir une prédiction de la résistance mécanique à partir du contrôle non destructif.

De l'analyse globale des courbes relatives à nos essais, il ressort que la contrainte de rupture est, en général, bien corrélée avec le module élastique longitudinal vibratoire. Cette observation valide l'essai vibratoire comme un puissant outil de classement, et donc de regroupement des bois de structure.

La méthode vibratoire est donc pertinente pour évaluer la résistance mécanique du matériau bois. Car, les mesures obtenues par des essais normalisés de flexion 4 points réalisés dans des conditions de chargement quasi statique montrent une bonne corrélation avec celles obtenues par essais vibratoires.

Le module dynamique est un bon prédicteur de la résistance.

La caractéristique qu'il est possible de mesurer de façon non destructive sur des éléments de bois est son module élastique (MOE). A partir du module élastique, il est possible de remonter au module de rupture (MOR) en établissant une corrélation classique entre le MOE et un MOR, obtenu de façon destructive. Ce que l'on cherche alors à déterminer est une estimation de la résistance par rapport à la valeur caractéristique effective, pour pouvoir garantir un niveau de qualité minimum. C'est cette philosophie qui préside aux techniques de contrôle non destructif.

Dumail et Morlier (2004), travaillant sur des poutres de Pin Maritime massif en dimension structurale (50*150mm²), ont présenté une grande campagne d'essais destinée à valider ce contrôle non destructif dans une scierie multi-produits (*Figure 3.26*) ; il s'agissait de poutres destinées, à l'issue d'un classement visuel des grumes, à la structure.

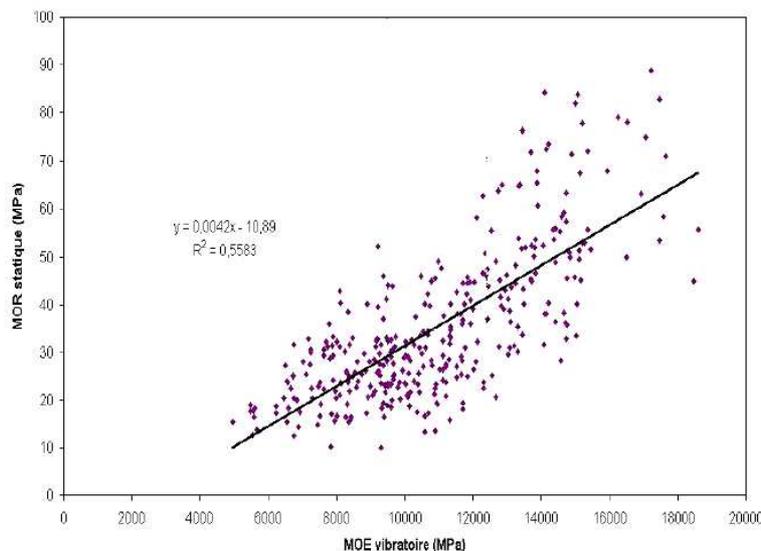


Figure 3.26: Relation MOE / MOR pour du Pin maritime testé à l'état sec en dimension structurale d'après Dumail et Morlier (2004).

Cette campagne a montré que le taux de rejet (bois de classe inférieur à C18) est passé de 47% pour un classement visuel à 8% pour un classement mécanique par vibration.

D'autre part, la qualité de la prédiction du MOR est équivalente que l'on mesure le MOE sur du bois à 12% de teneur en eau ou sur du bois vert (teneur en eau supérieure au PSF, bois tombant de scie).

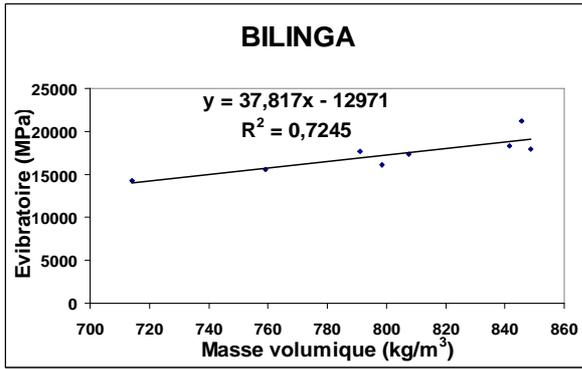
3.5 Corrélation entre module élastique vibratoire et masse volumique.

Cette campagne a pour objectif d'apprécier la corrélation de la masse volumique avec le module vibratoire.

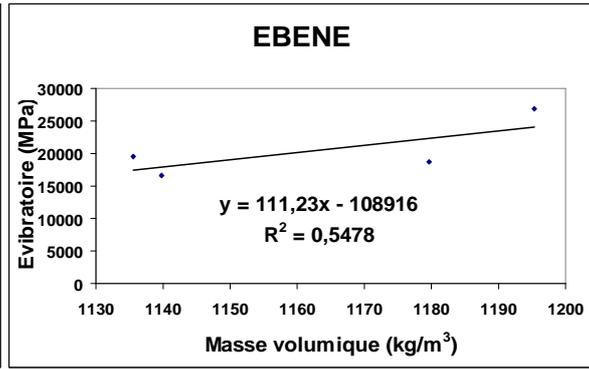
Ces essais ont été effectués lors de la deuxième campagne du LRBB. Des éprouvettes sans défaut de dimensions 20x20x400 mm³ ont été initialement conditionnées dans une enceinte pour atteindre le taux d'humidité de référence de 12%.

3.5.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais.

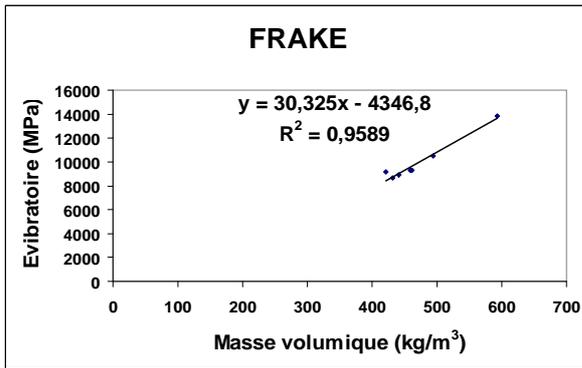
Les *Figures 3.27* présentent la courbe de régression linéaire du module élastique vibratoire en fonction de la masse volumique pour chaque essence, tandis que les *Figures 3.28* présentent la même réalité pour tous les échantillons de la campagne. La *Figure 3.28 b* notamment permet de distinguer des « nuages de corrélation » spécifiques aux essences dans une régression générale.



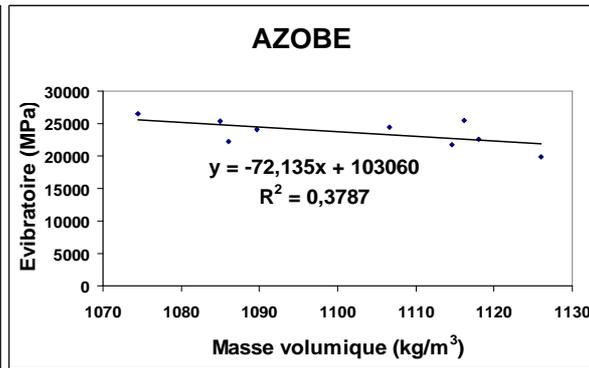
a)



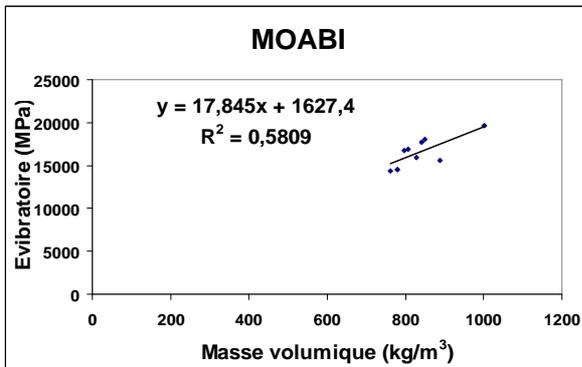
b)



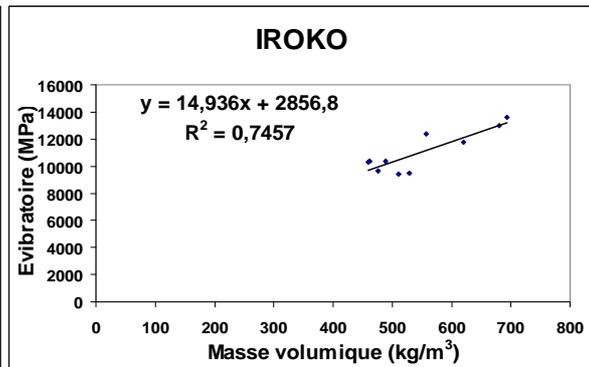
c)



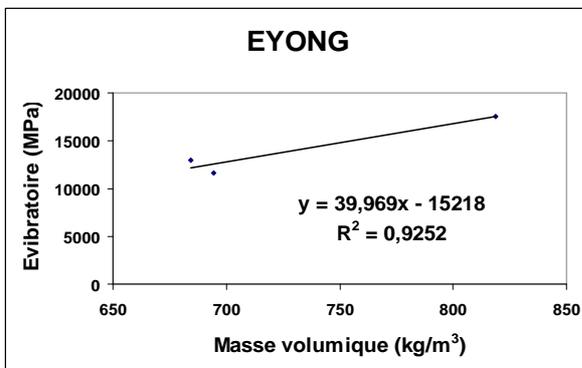
d)



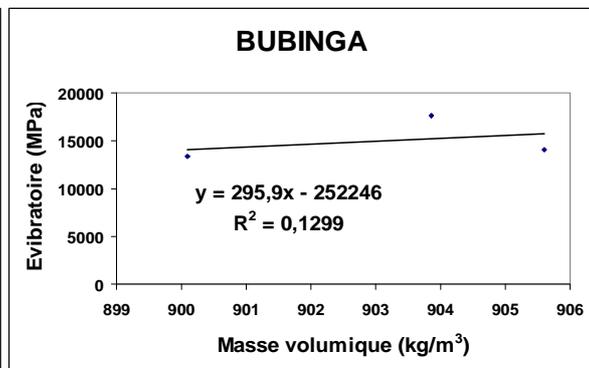
e)



f)

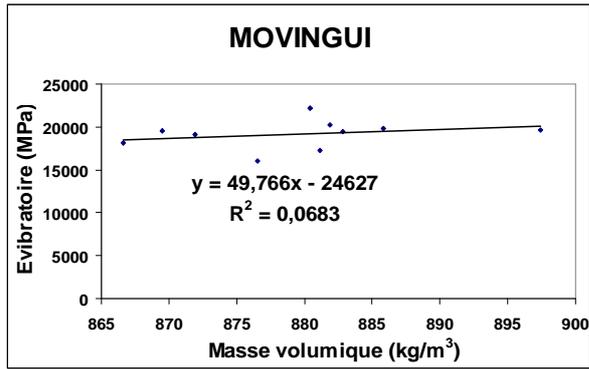


g)

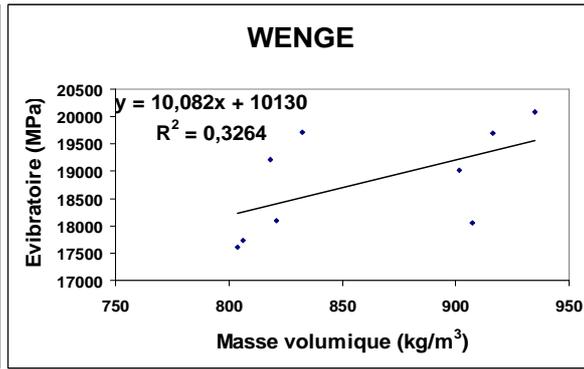


h)

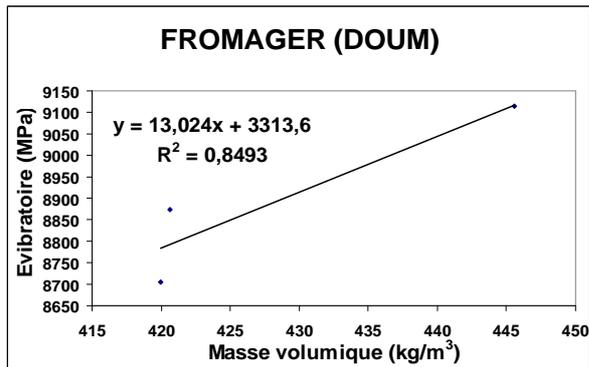
Figures 3.27: Exemples de régressions linéaires de la masse volumique en fonction du MOE vibratoire.



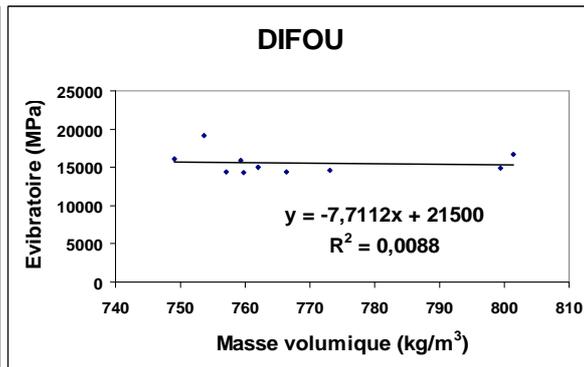
i)



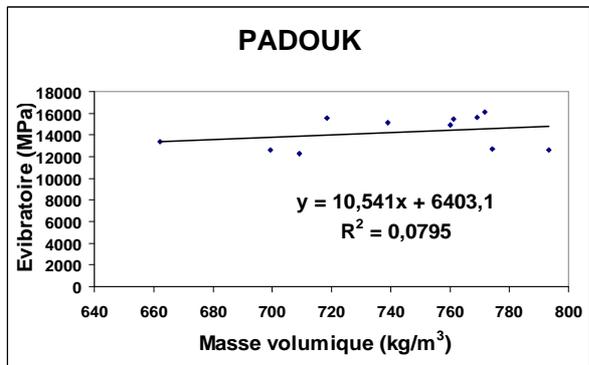
j)



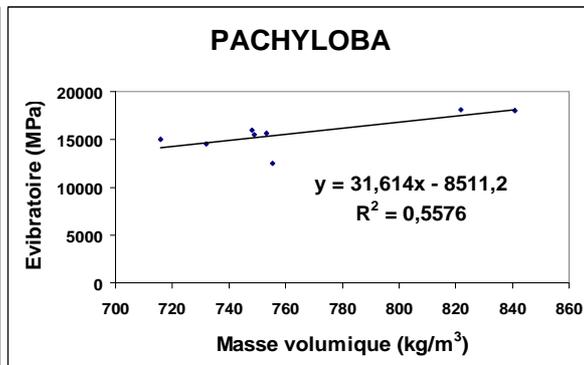
k)



l)

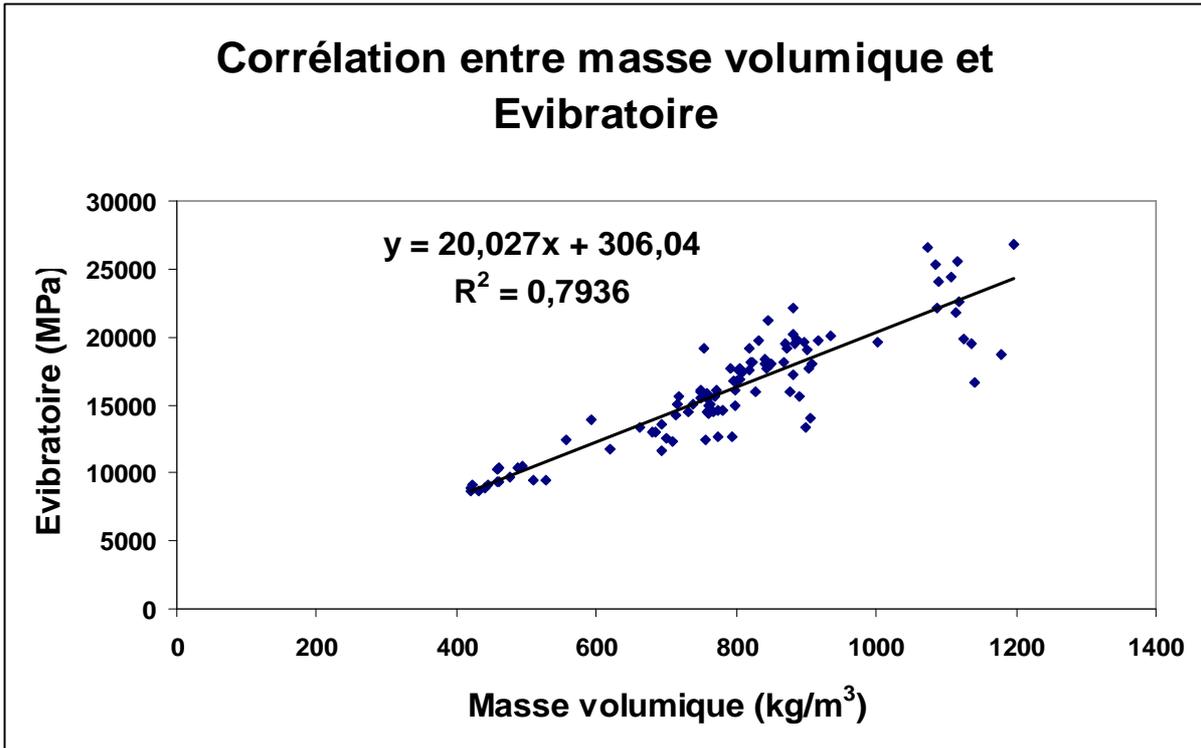


m)

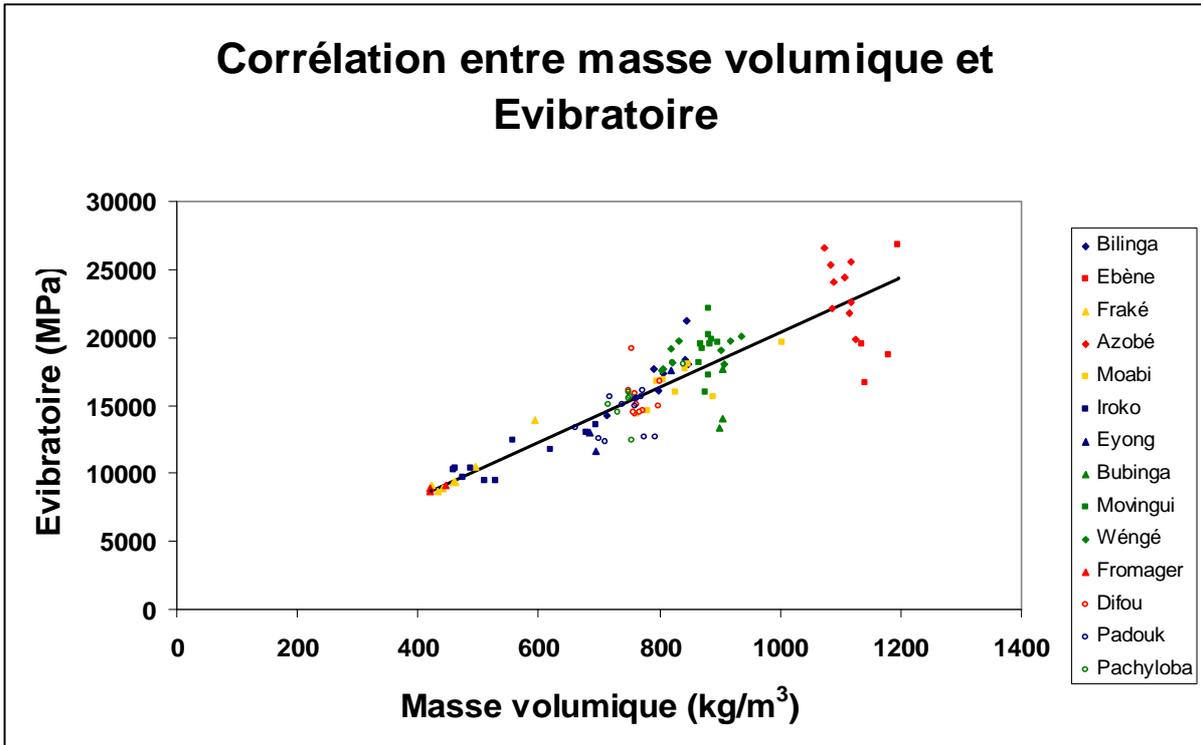


n)

Figures 3.27: Exemples de régressions linéaires de masse volumique en fonction du MOE vibratoire à 12% de taux d'humidité.



a)



b)

Figures 3.28: Corrélation entre Masse Volumique et MOE vibratoire pour tous les échantillons à 12% de taux d'humidité.

a) et b) représentent la même courbe ; en b) le jeu des couleurs et des figurines fait ressortir les noms des essences.

3.5.2 Analyse des résultats et discussions.

La masse volumique est corrélée plus ou moins étroitement avec au module d'élasticité longitudinal vibratoire. La dispersion augmente avec la masse volumique. Autrement dit, cette corrélation est moins bonne pour des essences de grande densité.

Parce qu'il est plutôt bien corrélé aux principales propriétés physique et mécanique, le module d'élasticité longitudinal vibratoire apparaît comme une propriété indicatrice pertinente pour le regroupement.

3.6 Regroupement des essences.

Au cours de la première campagne du LMMC qui s'est étalé sur 18 mois, 1900 échantillons dont 100 par essence ont préalablement subi tous un séchage sous abri avant les essais en série. Ainsi conditionnées, les éprouvettes atteignent un taux d'humidité voisin de 14%. Puisque les investigations nous ont conduits à admettre que le module vibratoire n'est très influencé par l'humidité, il nous a semblé superfétatoire d'être précis sur ce plan. Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes sans défaut de dimensions 20x20x400 mm³.

3.6.1 Présentation des résultats de la campagne d'essais.

Les résultats exhaustifs de cette campagne d'essais sont consignés dans le *Tableau 3.6*. Le *Tableau 3.7* présente des valeurs moyennes du module vibratoire et de l'écart type ainsi qu'une comparaison aux valeurs bibliographiques (Gérard et al., 2004).

Une comparaison entre ces valeurs expérimentales obtenues par une méthode d'évaluation non destructive basée sur l'analyse spectrale des vibrations naturelles de l'éprouvette et celles données par le CIRAD Forêt (Gérard, 2004), et l'ATIBT (1986) ressort sur la *Figure 3.29* où l'abscisse de chaque point est la moyenne du MOE vibratoire d'une essence et son ordonnée le MOE de la même essence par rapport à une banque de données bibliographique.

A ce jour, aucune base de données n'est exhaustive ; le difou (*Morus mesozygia*), par exemple, ne figure pas dans la base de données de l'ATIBT.

Les différences observées entre les bases de données entre elles d'une part, les bases de données et les résultats de nos investigations d'autre part, s'expliquent, en partie, par le protocole d'échantillonnage et le mode opératoire. Les données de la plupart des banques de données des bois tropicaux concernent des essais statiques sur des bois arrivés à maturité. Ces résultats peuvent varier de façon notable selon la provenance et les conditions de croissance des bois.

Nos investigations tiennent compte de la variabilité du bois en terme d'usage local et sont donc plus appropriées pour le regroupement et le calcul des valeurs caractéristiques des essences bois dans leur utilisation en structure.

Tableau 3.6: Résultats de la campagne d'essais relative au MOE vibratoire (en MPa)

N°	AYOUS	BIBOLO	EBENE	SAPELLI	FRAKE	BILINGA	MOABI	ROKO	TALI	EYONG	AZOBE	BUBINGA	MOVINGUI	WENGE	FROMAGER	BETE	DIFOU	PADOUK	PACHYLOBA
1	5410	14765	18833	12906	9181	16638	15655	10859	12402	17576	25953	15802	18275	17743	7873	14933	15655	16089	12471
2	11459	11428	19012	12171	9307	16282	15244	15180	20329	12956	28953	23287	16654	19094	7705	16406	15605	15129	14525
3	6355	9664	26255	13959	8910	16115	15921	15465	17638	11647	25853	13832	18806	20834	8115	15177	17500	13692	18052
4	8531	11722	13442	12084	8647	17278	16247	9751	17561	17876	25853	18966	20814	19956	7573	16737	15036	12181	15471
5	7849	10886	10450	11053	13868	18611	16879	9959	17580	13256	25653	17543	19144	20955	7405	17180	19021	16789	15655
6	6400	10806	18892	12184	10476	19759	18924	10277	20122	11447	24890	13653	19651	17735	9115	17206	15604	15685	15027
7	5858	14865	16598	10222	9304	15395	21217	11103	19300	17478	25553	13488	18094	18055	9273	13658	15638	15575	18133
8	8885	11528	26808	13126	9481	17370	16484	14739	18984	12856	25553	23302	19493	18096	9105	15792	14836	15646	15933
9	10416	9964	19516	8763	9607	19818	17474	13075	15080	11547	25100	22615	19632	17611	9515	16053	14338	15106	12371
10	8258	11822	18633	11991	9210	14221	17437	10370	15875	17776	25000	18852	20239	19209	8973	16827	19153	15470	14425
11	7058	10986	18812	11934	8947	18998	16860	9570	17291	13156	24908	14729	20250	19021	8805	19024	14917	12656	17952
12	8632	10906	26055	13206	14168	19245	16165	12948	17400	11847	24890	13965	17242	19700	6415	14342	14437	16089	15371
13	9081	14565	13242	12471	10776	12895	16216	7357	19576	18078	24808	15209	19122	19713	5873	15489	15909	14941	15555
14	6378	11228	10250	14259	9604	14159	17842	9743	18928	13456	24800	12160	16013	20086	5705	15384	16749	12687	14927
15	5967	9664	18492	12384	9081	16885	19325	10172	19098	12147	24441	16603	19843	18043	6115	15583	14644	12594	18033
16	8557	11522	16398	11353	9207	17715	17213	9483	12702	18376	24441	16363	19552	19394	9573	14996	14458	13379	15833
17	7315	10886	26808	12484	8810	15572	14224	11081	20629	13756	24400	9753	22154	21134	5405	15383	15039	12283	12721
18	7577	10506	19316	10522	8547	18978	16230	8071	17938	12447	24341	11025	17975	20258	5815	14633	16128	15969	14775
19	6876	14865	18833	13426	13768	16128	17109	10340	17851	17976	24341	10412	16354	21255	5973	16106	15465	15029	18302
20	8000	11328	19112	8263	10376	11966	12014	9169	17800	13355	24340	13710	18506	18035	5895	14877	15505	13492	15721
21	8646	9784	26255	12291	9204	14552	11517	10165	20422	12047	24308	14966	20514	18355	8215	16437	17450	12081	16905
22	8074	11622	13542	12234	9381	17481	8330	11485	19600	18275	24240	20367	19844	18398	5873	16880	14936	16889	15277
23	7829	10786	10550	12806	9507	21044	13128	9198	19284	13656	24208	15945	19351	17911	5605	16906	18212	15585	18383
24	6354	10706	18792	12071	9110	15629	19238	10799	15380	12347	24141	18995	17794	19509	9250	13358	15504	15475	16183
25	4415	15065	16998	13859	8847	19822	12617	12676	16175	17378	24141	10259	19193	19321	9858	15492	15638	15546	12621
26	7090	11728	26908	11984	14068	17119	17908	10819	17591	12756	24041	16832	19332	20000	9690	15753	14736	15008	14675
27	6514	10164	19616	10953	10676	18331	13303	15922	17700	11447	24041	9769	19839	20013	10100	16627	14238	15370	18202
28	7113	12022	18733	12084	9504	17341	18231	9067	19876	17676	24040	18347	19950	20386	9568	18724	19063	12556	15621
29	5944	11186	18812	10122	9681	15553	13225	10779	19228	13056	24440	11109	16942	17643	9390	14042	14817	15869	15805
30	7058	11106	26155	13026	9807	21184	15415	12540	19398	11747	23998	18970	18822	18994	9800	15189	14337	14841	15177
31	5875	15165	13342	8663	9410	17978	15399	9812	12302	12726	23998	19327	15713	20734	9958	15084	15809	12587	18283
32	7009	11828	10350	11891	9147	20566	17744	10957	20229	12656	23898	12399	19543	19856	8855	15283	16649	14244	16083
33	6727	10264	18592	11834	14368	16098	17934	7504	17538	11347	23898	13820	19252	20855	9285	14696	14544	12799	12271
34	6109	12122	16498	13106	10976	14296	16657	9664	17451	17576	23739	30218	21854	17635	8723	15083	14356	12183	14325
35	6836	11286	26708	12371	9804	17711	17706	14380	17480	12956	23707	12427	18375	17955	8555	15033	14939	16369	17852
36	7399	11206	19416	14159	9981	16238	17134	10578	20022	11647	23698	18970	16754	17966	8965	16506	16026	15429	15271
37	6905	14865	18433	12284	10107	15882	17704	13465	19200	17876	23698	18172	18906	17511	8423	15277	15885	13892	15455
38	6843	11528	18612	11253	9710	15715	16558	13939	18884	13256	23647	13513	20914	19109	8255	16837	15905	12481	14827
39	5103	9964	25855	12384	9447	16878	11577	12301	14980	11947	23607	15091	19244	18921	8740	17280	17850	17089	17933
40	8603	11822	13042	10422	14668	18211	13654	14831	15775	18176	23098	19584	19751	19600	8198	17306	15336	15985	15733
41	7634	10396	10050	13326	11276	19359	17680	15903	17191	13556	23098	13898	18194	19613	8030	13758	20221	15875	17171
42	6846	10306	18292	8963	10104	14995	12565	9437	17300	12247	23047	22704	19593	19986	8440	15892	15904	15946	14225
43	5653	14865	16198	12191	9581	18970	17800	11515	18476	17778	23014	11552	19732	17943	8598	16183	15638	15405	17752
44	5510	11628	26408	12134	9707	18418	13287	10847	18828	13156	22989	15003	20339	19294	8430	17027	15136	15770	16175
45	11559	10064	19116	13406	9310	13821	22558	14210	18988	11847	23207	20330	20350	21034	8385	19124	14638	12956	15355
46	8455	11922	18233	12671	9047	18598	22388	14160	12602	18076	22889	18519	17342	20158	7823	14442	19453	16389	14727
47	6631	11086	18412	14459	14268	18845	18311	11320	20529	13456	22847	14057	19222	21155	7655	15589	15217	15241	17833
48	7949	11006	25855	12584	10876	12495	11957	9659	17838	12147	22807	13375	16113	17935	8065	15484	14737	12387	15633
49	8500	14365	12842	11953	9704	13759	18907	12480	17751	17976	22764	17645	19943	18255	8023	15683	16209	13894	12521
50	5958	11028	9850	12684	9881	16885	16547	10776	17780	13356	22747	14889	19652	18296	7855	15096	17049	13679	14575
51	8985	9464	18092	10722	10007	17315	19629	13616	20322	12047	22689	15902	22254	17811	8285	15483	14944	12583	18102
52	10516	11322	15998	13626	9610	15172	12627	14783	19500	18276	22864	23387	18075	19409	7723	14733	14758	16269	15521

N°	AYOUS	BIBOLO	EBENE	SAPELLI	FRAKE	BILINGA	MOABI	ROKO	TALI	EYONG	AZOBE	BUBINGA	MOVINGUI	WENGE	FROMAGER	BETE	DIFOU	PADOUK	PACHYLOBA
53	8358	10486	26208	9263	9347	18578	16870	13159	19184	13666	22789	13932	16454	19221	7555	16206	15339	15329	15705
54	7158	10406	18916	12491	14568	15728	17651	13558	15280	12347	22664	19065	18606	19900	7965	14977	16426	13792	15077
55	8732	14465	18533	12434	11176	11506	14558	12855	16075	17876	22564	17643	20614	19913	8123	16537	15785	12381	18183
56	9181	11128	18712	13706	10004	14182	16743	10376	17491	13256	22880	15417	18944	20286	7955	16980	15805	16989	15983
57	6478	9564	25955	12971	9104	17081	18042	11778	17600	11947	22880	13588	19451	18243	8365	17006	17750	15885	12421
58	6067	11422	13142	14759	9281	20644	15957	9418	19776	18176	22780	23402	17894	19594	9223	13458	15236	15775	14475
59	6657	10586	10150	12884	9407	15229	14392	13586	19128	13556	22780	22715	19293	21334	9055	15592	20121	15846	19002
60	7415	10506	18392	11853	9010	19422	15588	12975	19298	12247	22580	18952	19432	20456	9465</				

Tableau 3.7: Résultats de la campagne d'essais (en gras) et comparaison aux mesures du CIRAD (Gérard et al., 2004).

Nom pilote de l'essence	Nom botanique de l'essence	MOE vibratoire (MPa)		MOE CIRAD (MPa)	
		Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Ayous	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	7035	1320	7260	1574
Sapelli	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	12151	1400	13960	2403
Tali	<i>Erythrophleum ivorense</i>	17913	2093	19490	3224
Azobé	<i>Lophira alata</i>	23179	2169	21420	3539
Moabi	<i>Baillonella toxisperma</i>	16225	2754	21040	2630
Iroko	<i>Chlorophora excelsa</i>	11357	2091	12840	2496
Ebène	<i>Diospyros crassiflora</i>	18457	4988	18457	3500
Movingui	<i>Distemonanthus benthamianus</i>	18808	1509	18808	3053
Bubinga	<i>Guibourtia tessmannii</i>	16262	4092	20180	5592
Bibolo	<i>Lovoa trichilioides</i>	11517	1591	10460	946
Bété	<i>Mansonia altissima</i>	15614	1238	13620	1224
Wengé	<i>Milletia laurentii</i>	19423	1134	21050	695
Difou	<i>Morus mesozygia</i>	15914	1581	18490	2100
Bilinga	<i>Nauclea diderrichii</i>	16987	2249	14660	1934
Padouk	<i>Pterocarpus soyauxii</i>	14500	1518	15870	1885
Fraké	<i>Terminalia superba</i>	10203	1706	11750	2480
Eyong	<i>Eribroma oblonga</i>	14516	2591	17110	1910
Fromager	<i>Ceiba pentandra</i>	7860	1406	5130	1462
Pachyloba	<i>Azelia pachyloba</i>	15691	1761	17020	2889

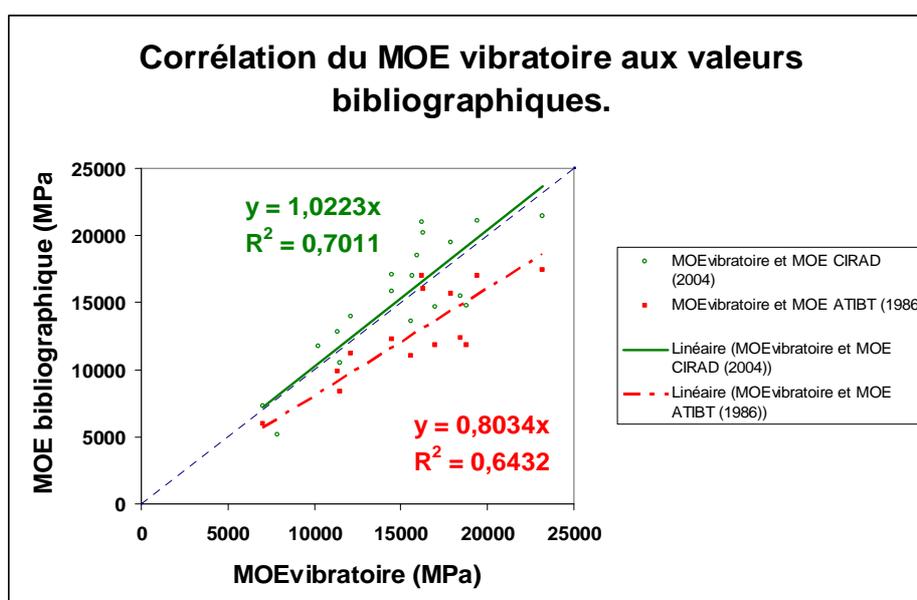


Figure 3.29: Corrélation MOE vibratoire expérimental à MOE ATIBT (rouge) et MOE CIRAD (vert).

3.6.2 Affectation des essences dans les groupes.

Conformément à la méthodologie mise au point (confère équation (2.16)), pour une essence de numéro d'ordre i , on calcule les quatre réels suivants :

$$d_{i,j} = \frac{\left(\begin{matrix} - \\ e_i - e_j \\ - \end{matrix} \right)}{\sqrt{\frac{s_i^2}{n_i - 1} + \frac{s_j^2}{n_j - 1}}}, \quad j \in \{1;2;3;4\}$$

L'un de ces trois réels est tel que : $|d_{i,j}|$ soit minimale. C'est ce réel qui fixe l'appartenance de l'essence de numéro d'ordre i au groupe G_j (Tableau 3.8).

Tableau 3.8: Affectation des essences dans l'un des trois groupes.

N° d'ordre	Essence	Ayous (G ₁)	Sapelli(G ₂)	Tali (G ₃)	Azobé(G ₄)	Décision
1	Ayous	d_{1,1} = 0	d _{1,2} = -26,5	d _{1,3} = -43,7	d _{1,4} = -63,3	∈ G ₁
2	Sapelli	d _{2,1} = 26,5	d_{2,2} = 0	d _{2,3} = -22,8	d _{2,4} = -42,6	∈ G ₂
3	Tali	d _{3,1} = 43,7	d _{3,2} = 22,8	d_{3,3} = 0	d _{3,4} = -17,4	∈ G ₃
4	Azobé	d _{4,1} = 63,3	d _{4,2} = 42,6	d _{4,3} = 17,4	d_{4,4} = 0	∈ G ₄
5	Moabi	d _{5,1} = 29,9	d _{5,2} = 13,1	d_{5,3} = -4,9	d _{5,4} = -19,7	∈ G ₃
6	Iroko	d _{6,1} = 17,4	d_{6,2} = -3,1	d _{6,3} = -22,0	d _{6,4} = -39,0	∈ G ₂
7	Ebène	d _{7,1} = 22,0	d _{7,2} = 12,1	d_{7,3} = 1,0	d _{7,4} = -8,6	∈ G ₃
8	Movingui	d _{8,1} = 58,4	d _{8,2} = 32,2	d_{8,3} = 3,5	d _{8,4} = -16,5	∈ G ₃
9	Bubinga	d _{9,1} = 21,4	d _{9,2} = 9,5	d_{9,3} = -3,6	d _{9,4} = -14,9	∈ G ₃
10	Bibolo	d _{10,1} = 21,6	d_{10,2} = -3	d _{10,3} = -24,2	d _{10,4} = -43,1	∈ G ₂
11	Bété	d _{11,1} = 47,2	d _{11,2} = 18,4	d_{11,3} = -9,4	d _{11,4} = -30,1	∈ G ₃
12	Wengué	d _{12,1} = 70,8	d _{12,2} = 40,1	d_{12,3} = 6,3	d _{12,4} = -15,3	∈ G ₃
13	Difou	d _{13,1} = 42,9	d _{13,2} = 18,2	d_{13,3} = -3,0	d _{13,4} = -19,7	∈ G ₃
14	Bilinga	d _{14,1} = 38,0	d _{14,2} = 18,2	d_{14,3} = -3,0	d _{14,4} = -19,7	∈ G ₃
15	Padouk	d _{15,1} = 36,9	d_{15,2} = 11,3	d _{15,3} = -13,1	d _{15,4} = -32,6	∈ G ₂
16	Fraké	d _{16,1} = 14,6	d_{16,2} = -8,8	d _{16,3} = -24,4	d _{16,4} = -46,8	∈ G ₂
17	Eyong	d _{17,1} = 25,6	d_{17,2} = 8,0	d _{17,3} = -10,1	d _{17,4} = -25,5	∈ G ₂
18	Fromager	d_{18,1} = 4,3	d _{18,2} = -21,5	d _{18,3} = -39,7	d _{18,4} = -59,0	∈ G ₁
19	Pachyloba	d _{19,1} = 39,1	d _{19,2} = 15,7	d_{19,3} = -8,1	d _{19,4} = -26,7	∈ G ₃

La convenance de regrouper les essences en quatre groupes autour des « leaders » en fonction du MOE a été adoptée. Les leaders sont quatre essences parmi les plus exploitées. En effet,

selon les statistiques, ayous, sapelli, tali, iroko, fraké et azobé sont six essences qui représentent à elles seules près de 84% de volume d'abattage total au Cameroun !

Puisque les valeurs du MOE de l'iroko, du fraké et du sapelli sont vraisemblablement voisines, il est sage de ne prendre qu'un leader parmi ces trois essences. C'est la raison pour laquelle on convient d'organiser le regroupement autour des quatre essences suivantes : ayous, tali, sapelli et azobé. En prenant comme chefs de groupes les essences les plus exploitées, le dessein est de proposer des substituts aux propriétés mécaniques essentielles similaires.

3.6.3 Valeurs caractéristiques au fractile 5% d'exclusion inférieure.

Le Tableau 3.9 est une application des formules (2.27), (2.39) et (2.44). Ceci n'est qu'un exemple pour appliquer la méthode.

Tableau 3.9: Valeurs caractéristiques au fractile 5% d'exclusion inférieure des essences et des groupes d'essences pour $\alpha = 0.05$, $\alpha_\lambda = 0.5$, et $n = 100$.

Groupe d'essences	Nom pilote de l'essence	MOE Moyen (MPa)	Valeurs caractéristiques (MPa). Estimation :		
			simple $\hat{e}_{0,05} = e - 1,645s$	par intervalle $\hat{e}_{0,05} = e - 1,650s$	sans biais $\hat{e}_{0,05} = e - 1,649s$
Groupe 1	Ayous	7035	4864	4857	4858
	Fromager	7860	5547	5540	5542
Propriétés du groupe 1		7447	5205	5198	5200
Groupe 2	Sapelli	12151	9848	9841	9842
	Iroko	11357	7917	7907	7909
	Bibolo	11517	8900	8892	8893
	Padouk	14500	12003	11995	11997
	Fraké	10203	7397	7388	7390
	Eyong	14516	10254	10241	10243
Propriétés du groupe 2		12374	9386	9377	9379
Groupe 3	Tali	17913	14470	14460	14462
	Moabi	16225	11695	11681	11684
	Ebène	18457	10252	10227	10232
	Movingui	18808	16326	16318	16320
	Bubinga	16262	9531	9510	9514
	Bété	15614	13577	13571	13573
	Wengé	19423	17558	17552	17553
	Difou	15914	13313	13305	13307
	Bilinga	16987	13287	13276	13278
	Pachyloba	15691	12794	12785	12787
Propriétés du groupe 3		17129	13280	13268	13271
Groupe 4	Azobé	23179	19611	19600	19602
Propriétés du groupe 4		23179	19611	19600	19602

Ce calcul des fractiles ici a une option méthodologique, le principe pouvant s'appliquer à d'autres propriétés comme la résistance à la rupture et la densité *mutatis mutandis*. Car, dans les codes de calcul courants, les formules exigent les valeurs caractéristiques des résistances et des densités.

La *Figure 3.30* donne les histogrammes avec un calage par une courbe de la loi normale pour chaque groupe tandis que la *Figure 3.31* donne les fréquences cumulées du MOE de chacun des quatre groupes.

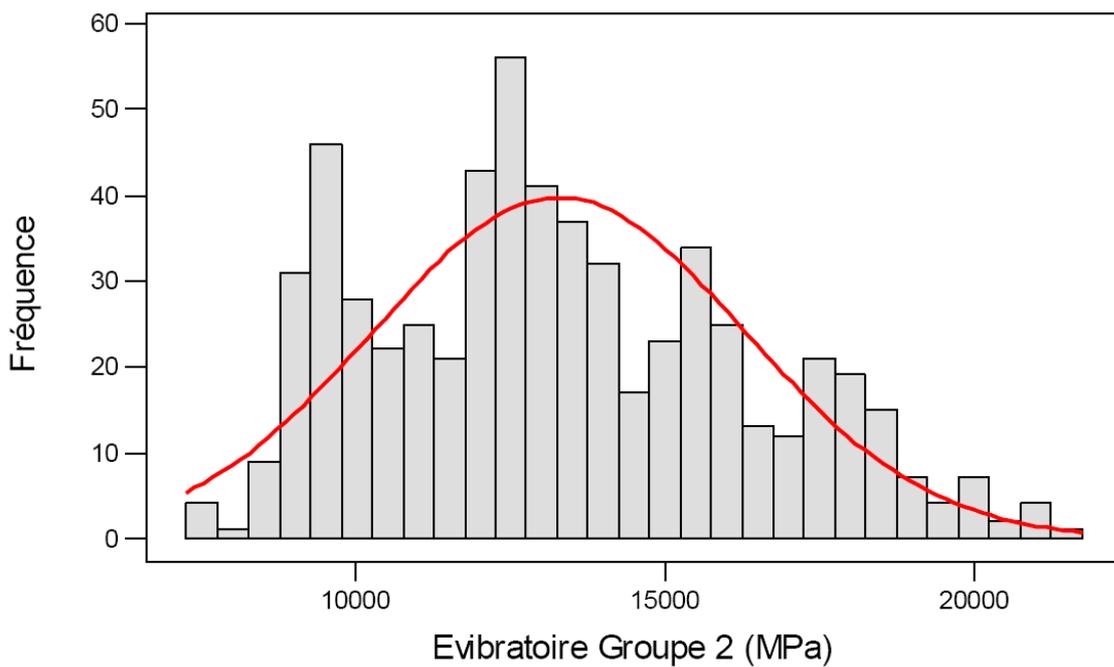
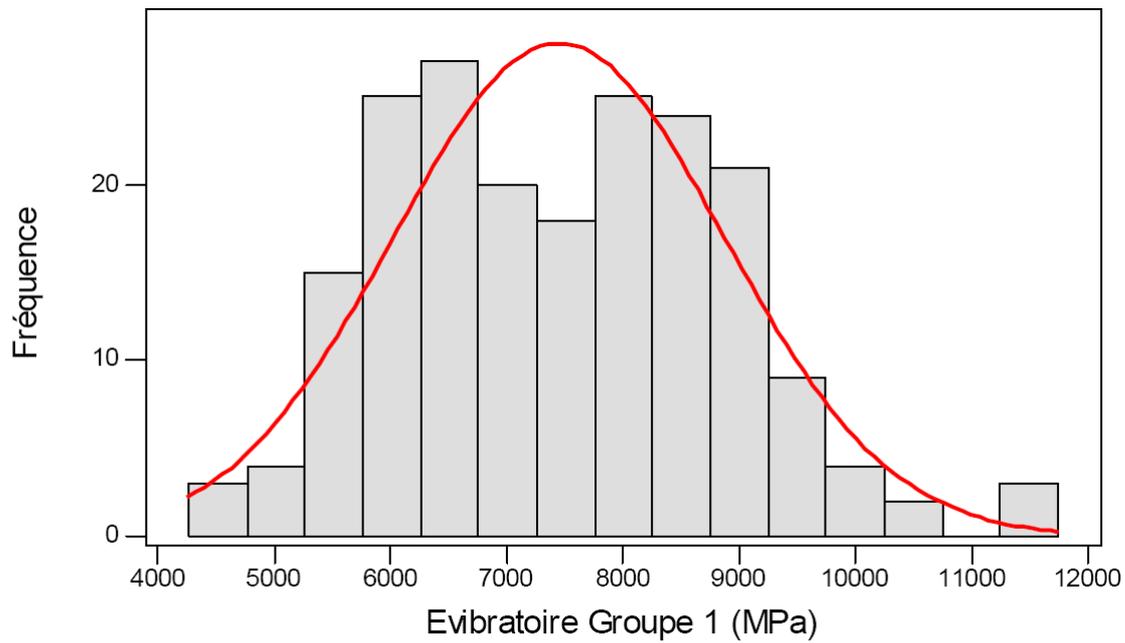


Figure 3.30: Histogrammes avec un calage par une courbe de la loi normale pour chaque groupe.

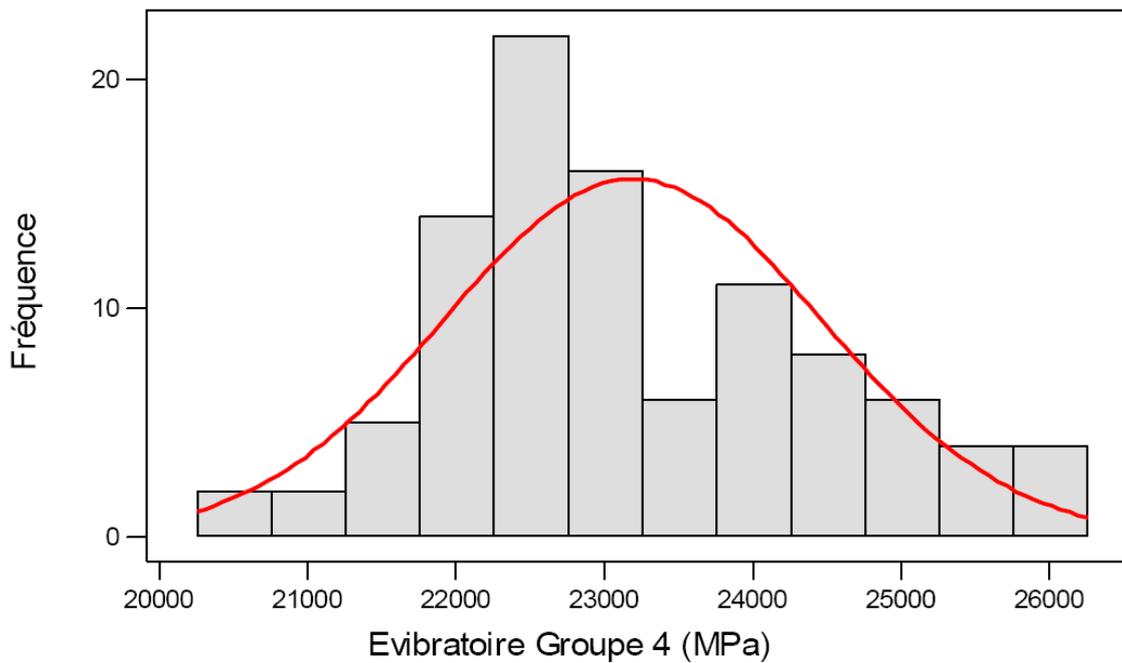
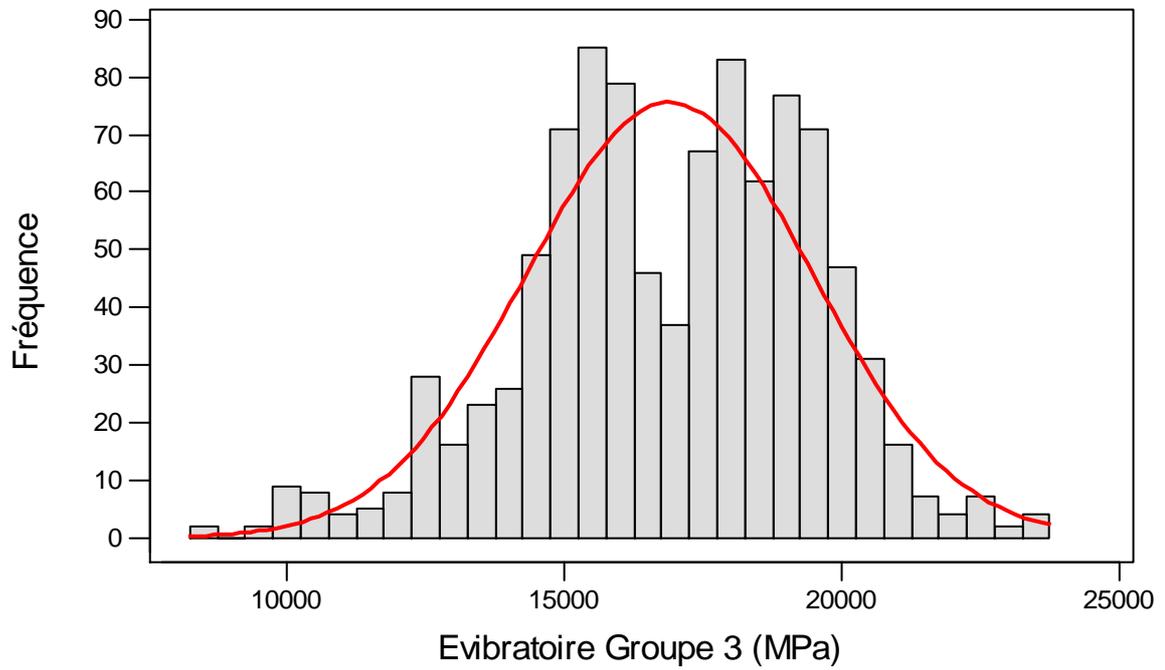


Figure 3.30: Histogrammes avec un calage par une courbe de la loi normale pour chaque groupe.

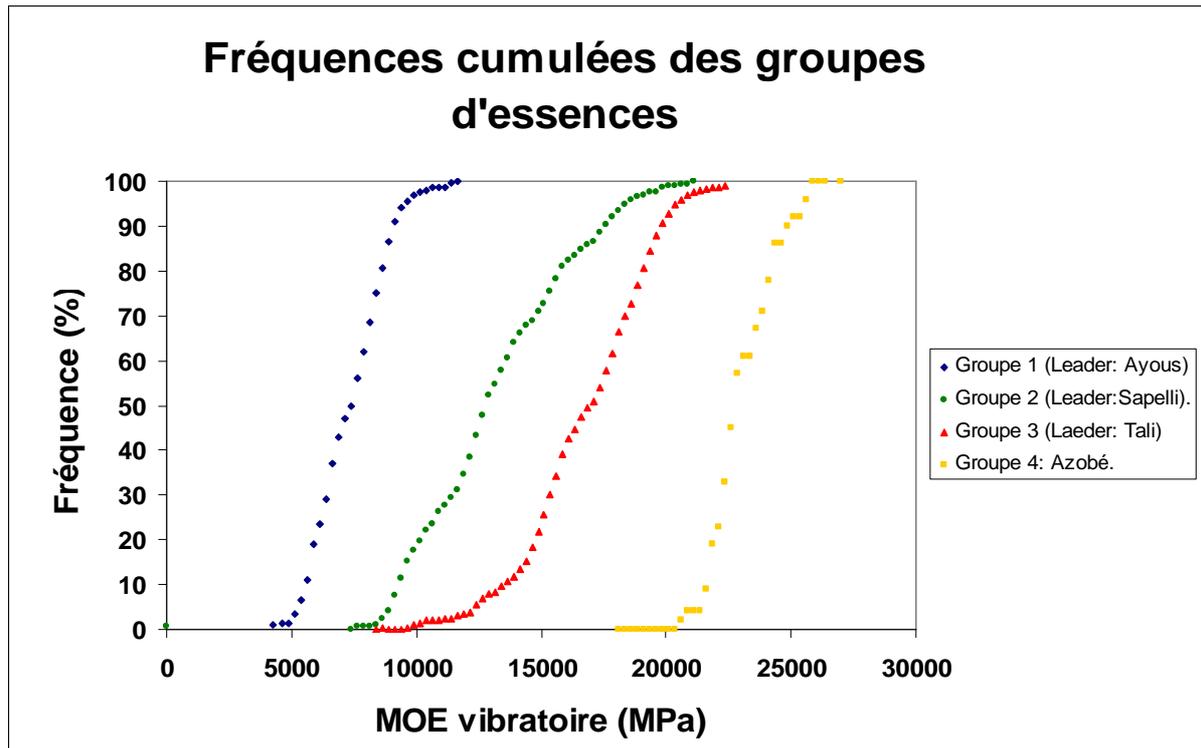


Figure 3.31 Fréquences cumulées du MOE expérimental de chacun des quatre groupes d'essences.

3.6.4 Analyse des résultats et discussions.

3.6.4.1 Commentaires.

La valeur caractéristique e_α du MOE d'un groupe d'essences est la limite supérieure telle qu'une proportion α des réalisations du MOE des essences de ce groupe soit inférieure à e_α . Par exemple, une limite supérieure e_α telle que $\alpha = 0.05$ décrit une situation où 5% de la population est au-dessous de e_α .

Les tailles des divers échantillons étant les mêmes, on admet que les valeurs caractéristiques d'un groupe donné sont les moyennes arithmétiques des valeurs caractéristiques des essences de ce groupe.

Les estimateurs simple, par intervalle et sans biais de la valeur caractéristique ne sont pas significativement différents. Ceci était prévisible. En effet, pour n augmentant indéfiniment et pour $\alpha_\lambda = 0.5$, les valeurs de λ et ε convergent vers $F_U^{-1}(0.05) = -1.645$ qui est le facteur de dans le cas d'une estimation simple.

La précision des valeurs caractéristiques peut être améliorée au fur et à mesure en augmentant la taille des échantillons tout en tenant davantage compte de la variabilité.

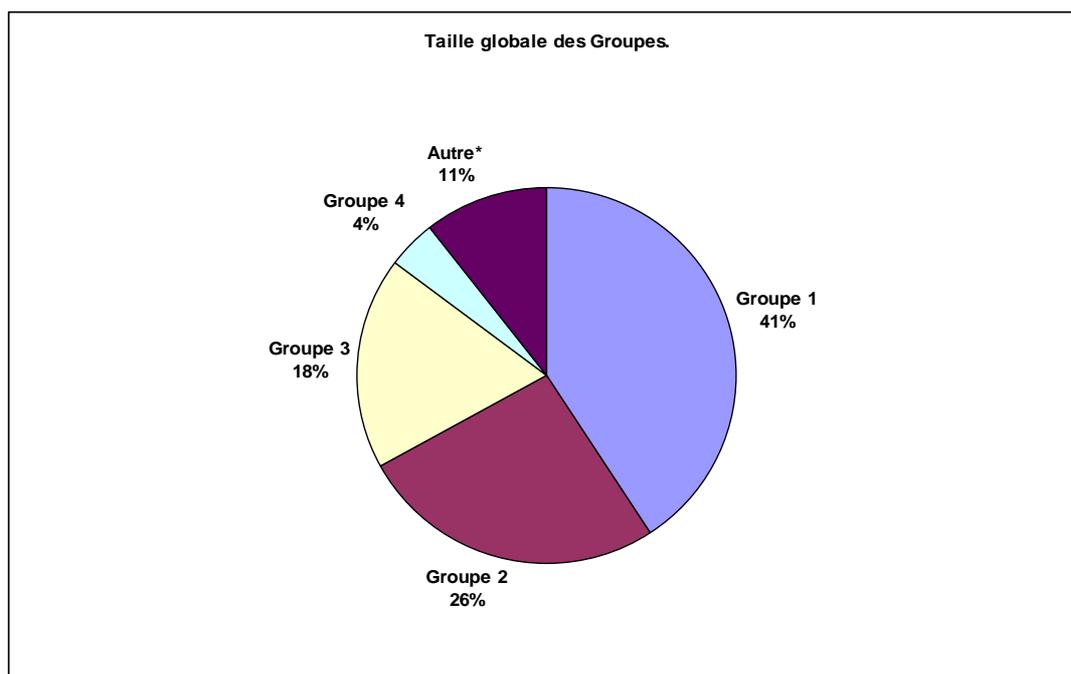


Figure 3.32 : Proportion actuelle des Groupes d'après les volumes d'exportation (ATIBT, 2003) des essences bois au port de Douala entre juillet 2001 et juin 2002.

*: Essences n'ayant pas encore été affectée dans un Groupe.

3.6.4.2 Valeurs caractéristiques de la résistance et de la densité de chaque groupe.

Dans les règles de calcul (DTU Règles CB 71), le caractère aléatoire des chargements et des caractéristiques mécaniques du bois conduit à adopter des coefficients de sécurité importants pour le dimensionnement. C'est le cas en particulier pour les contraintes admissibles où le niveau de sécurité est déterminé empiriquement. Ceci induit des pertes importantes de bois.

Dans le cas de l'Eurocode 5, les codes de calcul sont dits « aux états limites », les variables mécaniques sont modélisées par des valeurs caractéristiques qui sont :

- minimales pour la résistance : une contrainte caractéristique de 5% d'exclusion permet de s'assurer que dans 95% des cas, la résistance des pièces sera supérieure à cette valeur ;
- maximales pour les actions ;
- nominales pour les géométries.

Dans les Eurocodes, la justification de la sécurité est basée sur la notion de fiabilité des structures. L'objectif de la conception est d'atteindre une faible probabilité de rupture. Les valeurs des propriétés mécaniques des matériaux correspondent soit à la valeur moyenne, soit au fractile 5%.

En se référant aux divers modèles mathématiques livrés par nos différentes courbes de corrélation entre MOE vibratoire et MOR d'une part, et MOE vibratoire et Masse Volumique d'autre part, on peut dresser un tableau qui donne les contraintes admissibles de deux caractéristiques mécaniques et une caractéristique physique pour chaque groupe (Tableau 3.10).

Tableau 3.10: Récapitulatif des caractéristiques mécaniques et physiques de chaque groupe.

	EC 5 ^(*)	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Module d'élasticité (MPa)	$E_{0,moyen}$	7447	12374	17129	23179
	$E_{0,k}$	5205	9386	13280	19611
Contrainte à la rupture (MPa)	$f_{m,k}$	38	66	93	136
Masse Volumique (kg/m ³)	ρ_k	245	453	648	964

(*) :notations de l'Eurocode 5 avec :

- la moyenne du module d'élasticité : $E_{0,moyen}$
- le fractile 5% du module d'élasticité : $E_{0,k}$
- le fractile 5% de la contrainte à la rupture : $f_{m,k}$
- le fractile 5% de la masse volumique : ρ_k

3.6.4.3 Proposition d'un système de classes de résistance.

L'usage de la contrainte caractéristique $f_{m,k}$ s'explique par le calcul aux états limites des matériaux dans l'Eurocode 5, avec la prise en compte d'un indice de fiabilité des structures. Le module d'élasticité n'étant pas une grandeur critique pour la ruine d'un ouvrage, celui-ci est associé à la flèche et aux déformations des composants avec la prise en compte de sa valeur moyenne. Il est important de souligner que l'Eurocode 5 ne spécifie aucune règle de classement. La seule exigence est que les bois utilisés en structure soient classés, quelle que soit la méthode, pour connaître leurs performances mécaniques.

Au stade actuel de nos travaux, en remplaçant les groupes par les classes, **nous proposons un système de classes de résistance pour les bois tropicaux du bassin du Congo** (Tableau 3.11). Ces classes sont référencées par le préfixe « T » comme « Tropicque » suivie de la contrainte caractéristique de rupture associée.

Tableau 3.11: Proposition des classes de résistance pour le classement des bois du bassin du Congo.

		T38	T66	T93	T136
Contrainte à la rupture en flexion (MPa). ^(*)	$f_{m,k}$	38	66	93	136
Contrainte à la rupture en compression (MPa) ^(*)	$f_{c,0,k}$	20	43	56	81
Module d'élasticité (GPa) ^(*)	$E_{0,moyen}$	7,5	12,5	17	23
	$E_{0,05}$	5200	9400	13300	19600
Masse Volumique (kg/m ³) ^(*)	ρ_k	245	453	648	964

(*) :notations de l'Eurocode 5.

Remarque : Les valeurs numériques de $f_{c,0,k}$ sont issues de l'exploitation de la base de données Tropix 5.0 (Gérard et al., 2004).

Les classes de résistance vont de la classe la plus faible (T38) à la classe la plus élevée (T136).

Ceci peut déjà constituer une base pour classer les bois tropicaux. Celle-ci devra être complétée dans l'avenir. Car les machines de classement intègrent de plus en plus dans la propriété indicatrice un maximum de paramètres mécaniques, physiques et anatomiques, pour augmenter le coefficient de corrélation entre cette propriété indicatrice et la contrainte à la rupture. Notons toutefois que l'augmentation du nombre de paramètres mesurés n'améliore pas significativement le rendement du classement.

3.6.4.4 Classement individuel des sciages.

Les bois tropicaux sont très souvent mis en œuvre de façon empirique, et en recourant, lorsque des problèmes de sécurité se posent comme par exemple pour les ponts et les charpentes lourdes, à des surdimensionnements extrêmement importants.

Face aux exigences de compétitivité, il est nécessaire d'optimiser le choix du matériau et le dimensionnement de la structure. De plus, les contraintes de fiabilité et de sécurité sont actuellement pressantes dans le « village planétaire » et exigent une maîtrise des caractéristiques physiques et surtout mécaniques des structures. Il est nécessaire de concilier deux objectifs apparemment contradictoires : assurer la fiabilité et la sécurité des structures en bois et dimensionner rationnellement afin de ne pas trop alourdir les structures.

Le classement a pour objectif d'apporter une connaissance plus fine des comportements des bois en terme de résistance en vue d'une utilisation rationnelle qui tienne compte des solutions technico-économiques appropriées. Il vise à sélectionner les meilleurs matériaux possibles et à évaluer le prix de chaque planche à sa juste valeur. En effet, le bois coûte cher et les préjudices d'une utilisation ne tenant pas compte des exigences de sécurité et de fiabilité du bois peuvent être dramatiques. Vaut mieux classer les sciages. Le principe de fonctionnement des machines de classement est basé sur la détermination d'une propriété indicatrice mesurée sur les sciages. Cette propriété indicatrice est souvent une estimation d'un paramètre mécanique du matériau tel que le module d'élasticité, mais elle peut également être construite à partir d'une combinaison de paramètres physiques et anatomiques tels que la densité et la nodosité pour les bois des régions tempérées.

Pour chaque essence de bois, une base de données significative est constituée, regroupant les propriétés mécaniques et physiques de chaque pièce ainsi que la propriété indicatrice de la machine de classement. Un modèle de prédiction de la contrainte de rupture est établi sous la forme d'une régression entre la propriété indicatrice et la contrainte à la rupture des bois. L'objectif est de choisir une propriété indicatrice la mieux corrélée possible avec la contrainte à la rupture des pièces de bois. Souvent, l'addition de paramètres anatomiques à des mesures mécaniques ou physiques permet d'augmenter significativement cette corrélation.

Les résultats de nos investigations montrent que le module élastique vibratoire, grandeur non destructive s'obtenant rapidement, est relié à la contrainte de rupture par un modèle mathématique avec une bonne corrélation. Il peut être pris comme propriété indicatrice mesurée sur les sciages.

Une pièce est individuellement classée dans une classe en comparant la contrainte à la rupture prédite à partir du MOE vibratoire au seuil de la classe à prédire (exemple : T93). Si la contrainte à la rupture prédite est supérieure au seuil, la pièce est affectée à cette classe, sinon elle est affectée à la classe inférieure T66.

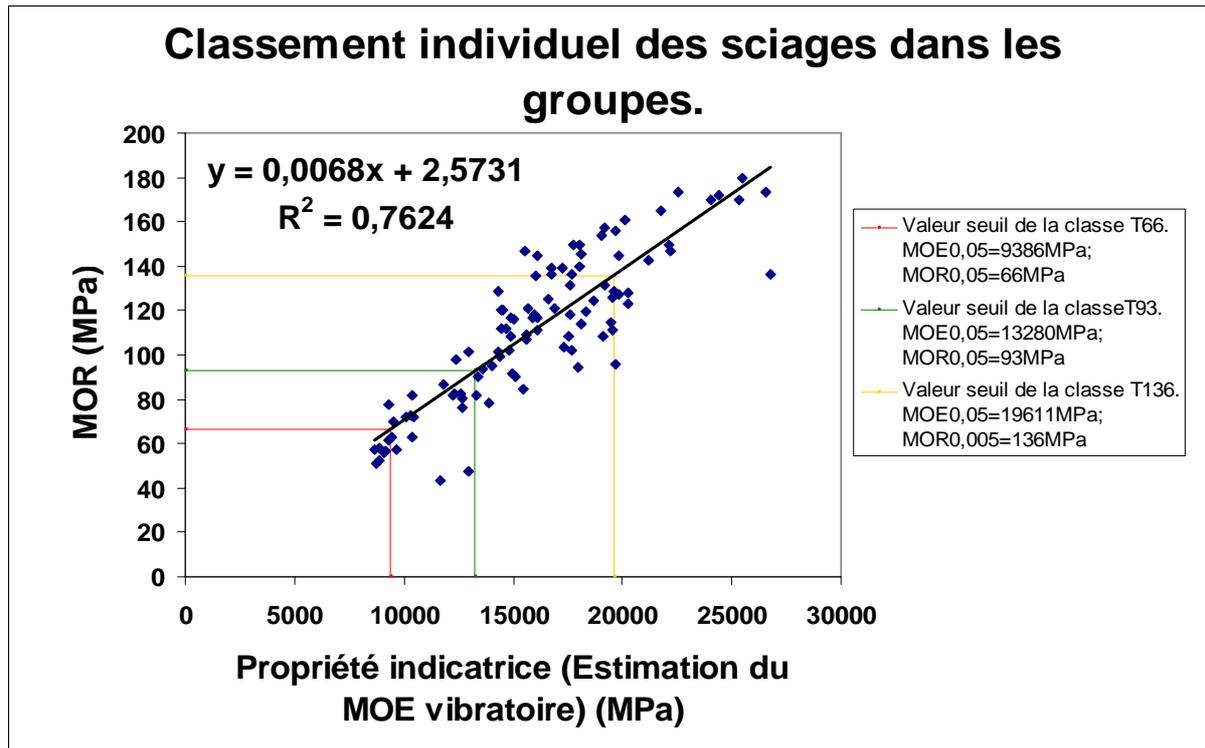


Figure 3.33: Valeurs seuils des classes.

L'établissement du seuil se déroule de la façon itérative en suivant la procédure suivante : Les sciages sont classés de façon décroissante par rapport à la contrainte à la rupture. Une partie de la population est prélevée dont les valeurs du MOE vibratoire sont supérieures à un seuil initialisé à une valeur de départ S_0 . Ces pièces correspondent aux pièces se situant dans le demi-plan d'équation $MOE \geq S_0$. Sur cette population, nous calculons la valeur du fractile à 5% de la contrainte de rupture. Si celle-ci est supérieure à la grandeur caractéristique de la classe (par exemple 66 MPa pour T66), le seuil est diminué. Le nouveau seuil S_1 définit une nouvelle population sur laquelle le fractile à 5% est calculé. Cette procédure est réitérée jusqu'à ce que le seuil critique $S_{critique}$ soit atteint, correspondant à une valeur caractéristique de la population égale à celle de la classe recherchée (T66 dans le cadre de l'exemple).

3.6.4.5 Comparaison avec le système de classes de résistance de la norme EN 338.

Tableau 3.12: Classes de résistance et valeurs caractéristiques pour les résineux et le peuplier (norme EN 338).

	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
N/mm^2									
$f_{m,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40
$f_{t,0,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24
$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$f_{c,0,k}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26
$f_{c,90,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3
$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
kN/mm^2									
$E_{0,moyen}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14
$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4
$E_{90,moyen}$	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47
G_{moyen}	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88
Kg/m^3									
ρ_k	290	310	320	340	350	370	380	400	420

Tableau 3.13: Classes de résistance et valeurs caractéristiques pour les feuillus (norme EN 338).

	D30	D35	D40	D50	D60	D70
N/mm^2						
$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
kN/mm^2						
$E_{0,moyen}$	10	10	11	14	17	20
$E_{0,05}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
$E_{90,moyen}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
G_{moyen}	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
kg/m^3						
ρ_k	530	560	590	650	700	900

avec :

$f_{m,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en flexion

$f_{t,0,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en traction axiale

$f_{t,90,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en traction transversale

$f_{c,0,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en compression axiale

$f_{c,90,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture en flexion compression transversale

$f_{v,k}$: fractile 5% inférieure de la contrainte de rupture au cisaillement

$G_{0,moyen}$: module moyen de cisaillement

$E_{0,moyen}$: moyenne du module d'élasticité

ρ_k : fractile 5% inférieure de la masse volumique.

La *Figure 3.34* montre que pour une valeur équivalente du MOE moyen, la valeur caractéristique de la résistance à la rupture décroît des bois tropicaux vers les résineux en passant par les feuillus. En d'autres termes, pour une même raideur, les bois tropicaux sont plus résistants que les feuillus des régions tempérées, eux-mêmes plus résistants que les résineux. Le décalage du « vert » au « bleu » serait dû à la présence plus marquée des singularités. Rares dans les bois tropicaux, les nœuds notamment sont plus considérables dans les résineux, un peu moins dans les feuillus.

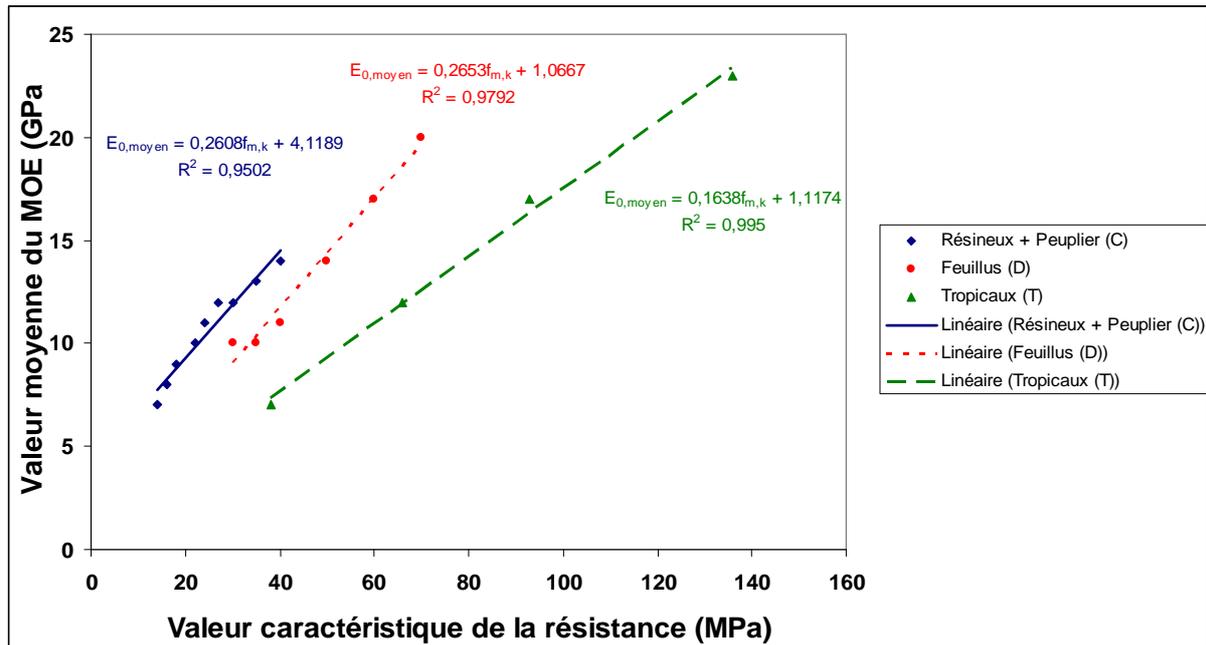


Figure 3.34: Corrélations de la valeur moyenne du MOE en fonction de la valeur caractéristique de la résistance pour les systèmes de classes C, D et T.

La *Figure 3.35* illustre qu'à des faibles valeurs de MOE, les résineux sont plus légers que les bois tropicaux, eux-mêmes plus légers que les feuillus des régions tempérées. Pour des valeurs plus grandes du MOE, les résineux sont inadaptés tandis que les bois tropicaux restent plus légers que leurs homologues feuillus.

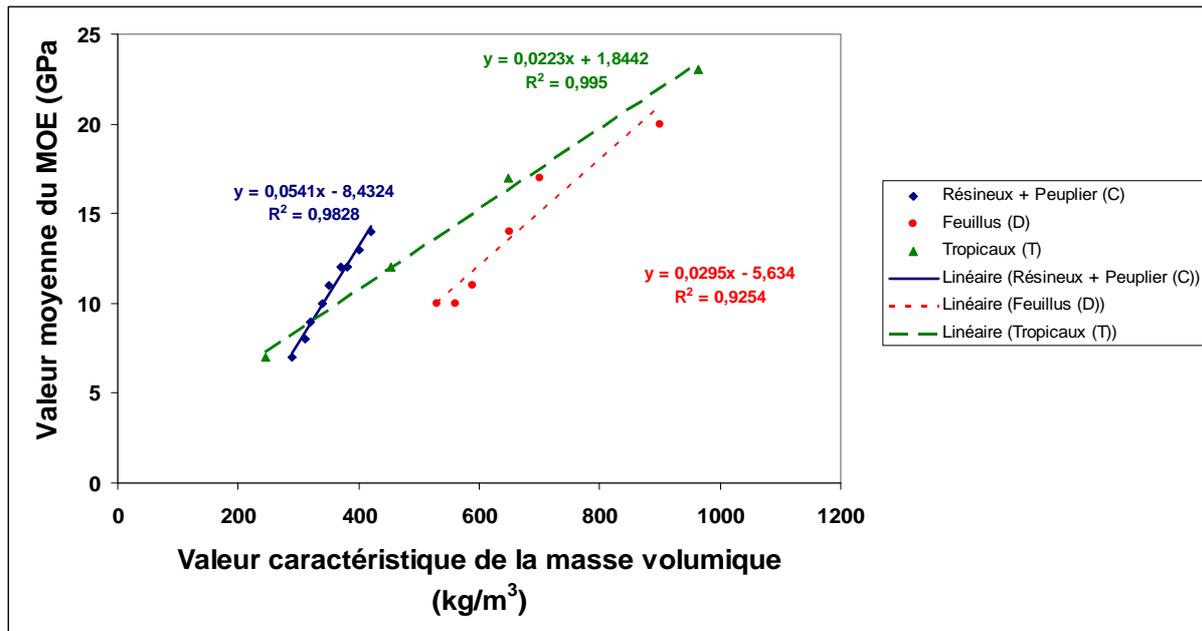


Figure 3.35: Corrélations de la valeur moyenne du MOE en fonction de la valeur caractéristique de la masse volumique pour les systèmes de classes C, D et T.

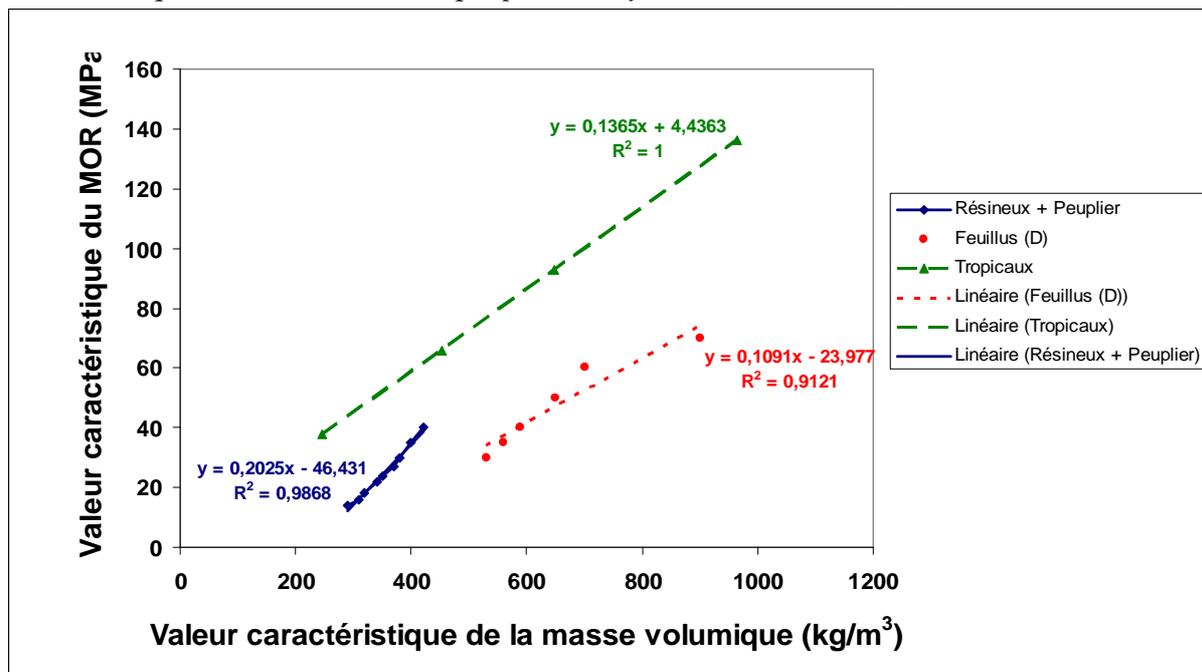


Figure 3.36: Corrélations de la valeur caractéristique de la résistance en fonction de la valeur caractéristique de la masse volumique pour les systèmes de classes C, D et T.

En génie civil, il est nécessaire de concilier deux objectifs apparemment contradictoires : assurer la fiabilité et la sécurité des structures en bois et dimensionner rationnellement afin de ne pas trop alourdir les structures. Les bois tropicaux assurent au mieux cette double exigence.

En général, l'utilisation d'une essence ne se limite pas seulement aux considérations purement mécaniques. En effet, même si certains critères tels que l'aspect, la couleur, le contre-fil et la stabilité d'une espèce sont moins importants en structure, ces facteurs restent déterminants pour le choix d'une essence. Le *Tableau 3.14* donne un exemple bibliographique de certaines caractéristiques non mécaniques.

Tableau 3.14: Caractéristiques non mécaniques des essences regroupées (Gérard, 2004).

Groupe de l'essence	Nom pilote	Retrait		Durabilité naturelle	Aspect (couleur)
		tangentiel	radial		
Groupe 1	Ayous	5.0%	2.9 %	Non durable	Blanc jaunâtre
	Fromager	6,3%	3,0%	Non durable	Blanc crème
Groupe 2	Sapelli	7.2 %	5.0 %	Moyenne	Brun cuivre
	Iroko	5.4 %	3.5 %	Très durable	Brun jaune
	Bibolo	5.8 %	3.7 %	Faible	Brun
	Padouk	5.0 %	3.2 %	Très durable	Rouge
	Fraké	6,1%	4,3%	Faible	Jaune clair
	Eyong	10,6%	4,6%	Faible	Jaune clair
Groupe 3	Tali	8.4 %	5.1 %	Très durable	Brun clair
	Moabi	8.7 %	6.5 %	Très durable	Brun rouge
	Ebène	11.0 %	7.0 %	Très durable	Noir
	Movingui	5.8 %	3.6 %	Moyenne	Jaune citron
	Bubinga	7.9 %	5.5 %	Durable	Brun rouge
	Bété	7.4 %	4.6 %	Très durable	Brun gris
	Wengué	9.1 %	5.9 %	Durable	Brun noir
	Difou	5.7 %	3.2 %	Très durable	Jaune citron
Bilinga	7.5 %	4.5 %	Très durable	Jaune doré	
Groupe 4	Azobé	10.3 %	7.3 %	Durable	Brun violacé

Conclusion.

Les essais réalisés montrent que la méthode dynamique, en plus d'être un bon moyen de classement en terme de module élastique, semble également être un outil de classement intéressant en terme de résistance.

Le regroupement mécanique des essences du bassin du Congo sur la base d'un test d'homogénéité de comparaison des moyennes des variables aléatoires E_i est initié dans ce travail. On aboutit à quatre groupes d'essences bien séparés.

Un calcul approprié permet d'affecter à chacun d'eux les valeurs caractéristiques des propriétés essentielles à prendre en compte pour une utilisation rationnelle dans le domaine du génie civil, en terme d'usage et de dimensionnement. Parce que l'Eurocode 5 exige que les bois utilisés en structure soient classés, quelle que soit la méthode, pour connaître leurs performances mécaniques, nous proposons, *in fine*, un système de classement des performances en structure des bois du bassin du Congo voué à une meilleure utilisation des forêts pour la conservation des écosystèmes forestiers et la satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme.

Cette étude contribue au développement durable du patrimoine exceptionnel qu'est le bassin du Congo. En effet, on catalyse la promotion et la valorisation des essences disponibles en terme de ressources sur pied. Le regroupement mécanique des essences du bassin du Congo est une étape préliminaire qui vise à doter lesdites essences des règles de classement de résistance.



**CONCLUSION
ET
PERSPECTIVES**

Conclusion générale

Au terme de ce travail, on peut affirmer que la coupe sélective des essences forestières est un danger qui pèse sur le massif forestier du bassin du Congo. Son intérêt écologique et socio-économique en fait un patrimoine exceptionnel et impose à tous les acteurs de cette région des comportements responsables dans le cadre du développement durable. Face à cette menace anthropique et sous la pression des ONG internationales, tous les acteurs impliqués dans l'exploitation du massif forestier s'engagent de plus en plus à œuvrer pour le développement durable. La demande de bois produit de manière plus écologique augmente.

Dès lors, le regroupement des essences apparaît comme une contribution à la gestion durable de cet écosystème par la promotion des essences disponibles en terme de ressources sur pied.

Le regroupement mécanique des essences du bassin du Congo sur la base d'un test d'homogénéité de comparaison des moyennes des MOE vibratoires a été élaboré dans ce travail avec le dessein de proposer un classement pour l'utilisation en structure des bois du bassin du Congo voué à une meilleure utilisation des forêts pour la conservation des écosystèmes forestiers et la satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme.

Collectées au moyen d'un échantillonnage original, plus de 2000 éprouvettes sans défaut de dimensions moyennes 20x20x400 mm³ représentant dix-neuf essences ont été testées à humidité contrôlée (12%). Pour organiser ce regroupement, nous avons adopté le module d'élasticité longitudinal du bois comme propriété indicatrice. Les essences ont été regroupées autour de quatre d'elles parmi les plus exploitées au moyen d'un test d'homogénéité de comparaison des moyennes du module d'élasticité vibratoire dont plusieurs essais ont montré qu'il est un bon prédicteur de la contrainte à la rupture. Concrètement, nous avons regroupé toutes les essences du bassin du Congo autour de quatre essences parmi les plus commercialisées, à savoir: ayous (*Triplochiton scleroxylon*), sapelli (*Entandrophragma cylindricum*), tali (*Erythrophleum suaveolens*) et azobé (*Lophira alata*). Ces quatre « leaders » représentent à eux seuls plus de 70% de volume d'abattage total au Cameroun (ATIBT, 2003). En prenant comme chefs de groupes les essences les plus exploitées, le dessein était de leur trouver rapidement des substituts aux propriétés mécaniques essentielles similaires. Ce regroupement mécanique des essences du bassin du Congo repose sur la pertinence d'une technique d'échantillonnage à moindre coût, le choix adéquat de la propriété indicatrice, les arguments en faveur du nombre de groupes, l'affectation exclusive d'une essence donnée dans un groupe, et la rigueur de l'exploitation statistique des résultats (Ayina, 2002).

S'inspirant des résultats livrés par le regroupement, un système de classes pour la structure des bois tropicaux du bassin du Congo est proposé.

Le classement a pour objectif d'apporter une connaissance plus fine des comportements des bois en terme de résistance en vue d'une utilisation rationnelle qui tienne compte des solutions technico-économiques appropriées pour une meilleure utilisation des forêts dans le cadre du développement durable. Pour aboutir à un système de classes, L'étude est menée sur les essences du Cameroun, écosystème représentatif du bassin du Congo.

Pour tenir compte de la variabilité inter essences et intra essence (Noack, 1972), des commandes d'éprouvettes ont été passées auprès de plusieurs scieurs et menuisiers de Yaoundé où parvient, dans sa diversité, le bois de la forêt dense du Cameroun. Par ailleurs, plusieurs sources d'approvisionnement ont été établies sur toute la zone forestière du Cameroun (est, centre et sud), par le biais des commandes inopinées de petites quantités de bois auprès des scieurs artisanaux et industriels. Cet échantillonnage tenait compte de la variabilité du bois en terme d'usage local et est donc plus appropriées pour le regroupement et le calcul des valeurs caractéristiques des essences bois dans leur utilisation en structure.

Dix-neuf essences ont été retenues pour appliquer la méthode de regroupement mise au point, avec le dessein de l'étendre plus tard à toutes les soixante essences commercialisées. Ces essences sont l'ayous, le sapelli, le tali, l'azobé, le moabi (*Baillonella toxisperma*), l'iroko (*Chlorophora excelsa*), l'ébène (*Diospyros crassiflora*), le movingui (*Distemonanthus benthamianus*), le bubinga (*Guibourtia tessmannii*), le bibolo (*Lovoa trichilioides*), le bété (*Mansonia altissima*), le wengé (*Milletia laurentii*), le difou (*Morus mesozygia*), le bilinga (*Nauclea diderrichii*), le padouk (*Pterocarpus soyauxii*), le fraké (*Terminalia superba*), l'éyong (*Eribroma oblonga*), le fromager (*Ceiba pentandra*) et le pachyloba (*Afzelia pachyloba*). Ces essences représentent près de 90% des volumes de bois exporté au port de Douala (Cameroun) entre juillet 2001 et juin 2002 (ATIBT, 2003).

Dans nos investigations, nous avons adopté le MOE vibratoire comme propriété indicatrice du regroupement mécanique des essences. En effet, avec un matériel approprié et peu onéreux, sa mesure est simple, rapide, reproductible, précise, et fiable (Gasagrande, 1998). Le choix de ce paramètre trouve sa justification dans la bonne corrélation entre celui-ci et les propriétés mécaniques et physiques essentielles. Le MOE vibratoire est un bon prédicteur de la résistance mécanique du bois.

Les résultats expérimentaux ont été obtenus à partir d'un modèle d'essais non destructifs basé sur l'analyse spectrale des vibrations naturelles d'une poutre sollicitée en flexion dynamique (Casagrande, 1998). L'estimation d'une valeur du MOE est basée sur le modèle de Bernoulli où la déformation due à l'effort tranchant (cisaillement) n'est pas prise en compte ($\frac{L}{h} \geq 20$).

Les essais effectués sur le moabi à diverses humidités n'ont pas montrés de différences significatives. La correction proposée par Guitard (1987), si elle semble s'accorder aux essais statiques normalisés, n'est pas extrapolable aux essais vibratoires.

$$E_H = E_{12} [1 - 0,015(H - 12)]$$

Le regroupement s'est effectué autour de quatre essences. L'affectation d'une essence donnée, de numéro d'ordre i (avec $i \in \{1; 2; \dots; 58\}$), dans un des quatre groupes G_j (avec $j \in \{1; 2; 3; 4\}$) s'est fait au moyen d'un test d'homogénéité (Mouchiroud, 2003) de comparaison des moyennes de la variable aléatoire E_i à chacune des variables aléatoires E_j (avec $j \in \{1; 2; 3; 4\}$).

Pour une essence de numéro d'ordre i , on a calculé les quatre réels suivants :

$$d_{i,j} = \frac{\left(\bar{e}_i - \bar{e}_j \right)}{\sqrt{\frac{s_i^2}{n_i - 1} + \frac{s_j^2}{n_j - 1}}}, \quad j \in \{1; 2; 3; 4\}.$$

L'un de ces quatre réels était tel que $|d_{i,j}|$ soit minimale. C'est ce réel qui a fixé l'appartenance de l'essence de numéro d'ordre i au groupe G_j .

Des corrélations entre le module d'élasticité vibratoire d'une part et le module d'élasticité statique, la contrainte de rupture et la masse volumique d'autre part, ont été effectuées.

Des essais sous humidité contrôlée (12%) ont été effectués sur 109 éprouvettes de divers essences tropicales (azobé, moabi, iroko, ébène, movingui, bubinga, wengé, difou, bilinga, padouk, fraké, éyong, fromager et pachyloba). Une éprouvette subissait successivement

l'essais vibratoire puis l'essais statique suivant la norme prEN 408 (2000). Le traitement des résultats a conduit au modèle mathématique suivant :

$$\text{MOE vibratoire} = 1,06 \text{ MOE statique}$$

avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9$. D'où la pertinence de l'essai vibratoire pour estimer la qualité du bois.

Les 109 éprouvettes susmentionnées ont été conduites à la rupture suivant la même norme. Le traitement des résultats a conduit au modèle mathématique suivant :

$$\text{MOR} = 0,007 \text{ MOE vibratoire} + 2,6 \quad (\text{MPa})$$

avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,8$. Le MOE vibratoire est un bon prédicteur du module de rupture (MOR). C'est donc un paramètre pertinent pour le regroupement des essences et, partant, leur classement.

Les 109 éprouvettes précédentes ont montré que :

$$\text{MOE vibratoire} = 20 \rho + 306$$

ρ est la masse volumique (en kg/m^3) ; MOE (en MPa), avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,8$.

Une comparaison aux valeurs bibliographiques (ATIBT, CIRAD, ITTO) montre que nos résultats sont d'excellente qualité.

Parce que le MOE vibratoire n'est pas très influencé par l'humidité et est très bien corrélé aux différentes propriétés mécaniques et physiques en général, et au MOR en particulier, il constitue un excellent indicateur de qualité du matériau bois.

Pour chacune des dix-neuf essences sélectionnées, nous avons fixé la taille de l'échantillon à 100 éprouvettes de dimensions $20*20*400 \text{ mm}^3$. Le séchage de ces éprouvettes s'est effectué pendant trois mois sous abri. Cette précaution était superflue, car MOE vibratoire est quasi-invariant avec l'humidité.

Le traitement statistique permet la répartition suivante :

- Groupe 1 : ayous et fromager ;
- Groupe 2 : sapelli, iroko, bibolo, padouk, fraké et éyong ;
- Groupe 3 : tali, moabi, ébène, movingui, bubinga, bété, wengé, difou, bilinga et pachyloba ;
- Groupe 4 : azobé.

Un calcul approprié a permis d'affecter à chacun des quatre groupes d'essences les valeurs caractéristiques des propriétés essentielles à prendre en compte pour une utilisation rationnelle dans le domaine du génie civil, en terme d'usage et de dimensionnement.

Au terme du regroupement et en remplaçant les groupes par les classes, nous avons proposé un système de classes de résistance (ou classement des performances en structure) pour les bois tropicaux du bassin du Congo voué à une meilleure utilisation des forêts. En effet, l'Eurocode 5 exige que les bois utilisés en structure soient classés, quelle que soit la méthode, pour connaître leurs performances mécaniques. Ces classes sont référencées par le préfixe « T » comme « Tropicque » suivie de la contrainte caractéristique de rupture associée. Autrement dit, le regroupement mécanique des essences du bassin du Congo a permis de doter lesdites essences d'une proposition de classement de résistance. Les classes de résistance vont

de la classe la plus faible (T38) à la classe la plus élevée (T136). La base présentée ici devra être complétée dans l'avenir car les machines de classement intègrent de plus en plus dans la propriété indicatrice un maximum de paramètres mécaniques, physiques et anatomiques, pour augmenter le coefficient de corrélation entre cette propriété indicatrice et la contrainte à la rupture. Parce que le classement apporte une connaissance plus fine des comportements des bois en terme de résistance en vue d'une utilisation rationnelle qui tienne compte des solutions technico-économiques appropriées, il concourt à une meilleure utilisation des forêts dans le cadre du développement durable.

Les essais réalisés ont montré que le MOE vibratoire est bien corrélé aux principales propriétés physiques et mécaniques du matériau bois. En d'autres termes, le module d'élasticité longitudinal vibratoire est un bon prédicteur de la résistance mécanique. Ainsi, la méthode vibratoire (non destructive), en plus d'être un bon moyen de classement en terme de module élastique, semble également être un outil de classement intéressant en terme de résistance. De nos investigations, il ressort que le module élastique vibratoire n'est pas très influencé par l'humidité. Cette quasi invariabilité du module vibratoire en fonction de la teneur en eau est un argument qui ajoute au pesant d'or de la méthode vibratoire. On peut alors admettre qu'une estimation du module d'élasticité longitudinal du bois même vert est un prédicteur de la résistance mécanique à 12% du taux d'humidité.

Une méthodologie du regroupement des essences a été mise au point. Une application est faite en regroupant des essences autour de quatre parmi celles plus exploitées. On peut ajouter au fur et à mesure toutes les autres essences, dans ce regroupement exclusif. Partant, on catalyse la promotion et la valorisation des essences secondaires souvent très disponibles en terme de ressources sur pied. Nous avons par ailleurs exposé de manière claire les principes théoriques qui président au calcul des valeurs caractéristiques. Une application qui concorde avec les normes est faite en estimant respectivement les valeurs simple, sans biais et par intervalle du fractile d'exclusion inférieur à 95% du module vibratoire de chaque groupe, la technique étant applicable à n'importe quelle propriété physique ou mécanique.

En général, l'utilisation d'une essence ne se limite pas seulement aux considérations purement mécaniques; même si certains critères tels que l'aspect, la couleur, le contre-fil et la stabilité d'une espèce sont moins importants en structure, ces facteurs restent déterminants pour le choix d'une essence.

PERSPECTIVES

La méthode vibratoire (non destructive), en plus d'être un bon moyen de classement en terme de module élastique, semble également être un outil de classement intéressant en terme de résistance. Des études plus appropriées devraient être mener pour comprendre davantage l'influence de l'humidité et autres paramètres en vue d'élaborer un cadre standard de l'essai vibratoire.

L'existence d'un certain nombre de connaissances scientifiques sur certaines essences du bassin du Congo favorise leur utilisation dans le cadre de la gestion durable des ressources forestières. Le large éventail de professionnels exploitant les ressources forestières, allant du scieur artisanal à des grandes scieries doivent s'engager dans la mise en place d'un processus original de labellisation, d'éco certification et de gestion durable des forêts.

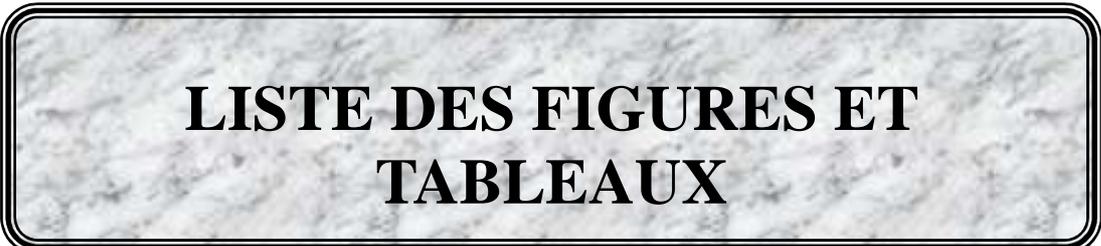
Les scieurs seront prêts à s'engager dans l'exploitation rationnelle des essences secondaires lorsqu'ils seront sûrs de pouvoir les vendre.

La forêt est un écosystème dynamique. Des essences doivent être exploitées de manière rationnelle pour le maintien de la biodiversité. D'autres devraient être cultivées afin que globalement la ressource forestière du bassin du Congo ne soit pas en constante régression.

L'ensemble des acteurs du bassin du Congo devrait être favorable à la création d'une structure de normalisation chargée de promouvoir une démarche particulière pour la conservation du patrimoine forestier.

Le regroupement mécanique des essences du bassin du Congo est une contribution dans la réflexion des solutions pertinentes le développement durable. Des investigations sur le système de classement structure des bois tropicaux que nous avons mis sur pied doit se poursuivre pour y intégrer davantage de paramètres.

Toutes ces pistes de valorisation de la ressource bois doivent être couronnées par une volonté politique.



**LISTE DES FIGURES ET
TABLEAUX**

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1.1: Situation géographique des pays du bassin du Congo.</i>	17
<i>Figure 1.2: Situation des forêts du bassin du Congo (France diplomatie, 2005).</i>	18
<i>Figure 1.3: Répartition des forêts dans le monde (FAO, 2000).</i>	19
<i>Figure 1.4: Statistiques des volumes d'exportation des essences bois au port de Douala (Cameroun) entre juillet 2001 et juin 2002 (d'après ATIBT, 2003).</i>	25
<i>Figure 1.5: Carte de répartition des aires protégées et des concessions forestières en cours d'aménagement dans le bassin du Congo (source ATIBT, 2003).</i>	27
<i>Figure 1.6: Paroi cellulaire schématisée par Tsoumis (1991)</i>	33
<i>Figure 1.7: La grume idéale.</i>	34
<i>Figure 1.8: Procédure générale de classement des bois.</i>	39
<i>Figure 1.9a: Choix qualitatifs d'aspect du Pin Maritime (Norme NF EN 1611-1).</i>	41
<i>Figure 1.9b: Méthode de classement visuel des bois sciés pour la structure.</i>	41
<i>Figure 1.9c: Correspondance entre classe visuelle et classe de résistance.</i>	42
<i>Figure 1.10: Configuration de chargement pour la machine de classement Cook Bolinder.</i>	42
<i>Figure 1.11: Module statique MOE_{stat} en fonction de la même grandeur déterminée par la méthode vibratoire. (Larsson et al., 1997).</i>	44
<i>Figure 1.12: Allure des différents types de vibrations (Casagrande, 1998).</i>	45
<i>Figure 1.13: Schéma d'une éprouvette, définition géométrique</i>	45
<i>Figure 1.14: Equilibre transverse d'un élément de poutre</i>	47
<i>Figure 1.15: Relations entre modules dynamiques et élancement l/h Relations entre E/KG et élancement, (Bordonné, 1989)</i>	54
<i>Figure 1.16: Relation entre modules apparents et facteur $\alpha = h^2/12l^2$, (Bordonné, 1989).</i>	54
<i>Figure 2.1: Méthodes de mesure, modes de vibration</i>	57
<i>Figure 2.2: Matériel (a) et quelques éprouvettes (b) pour l'essai vibratoire.</i>	59
<i>Figure 2.3: Exemple de spectre temporel traduisant un réglage approprié.</i>	60
<i>Figure 2.4: Exemple de modes propres (signature) obtenus par analyse spectrale des vibrations naturelles d'une poutre</i>	61
<i>Figure 2.5: Exemple de feuille de calcul Excel pour estimer la valeur du module d'élasticité vibratoire</i>	62
<i>Figure 2.6: Configuration des essais de flexion statiques.</i>	63
<i>Figure 2.7: Configuration des essais de flexion statiques</i>	63
<i>Figure 2.8: Rupture d'une éprouvette par essai de flexion statique</i>	64
<i>Figure 2.9: Dispositif d'essai statique piloté par ordinateur</i>	65
<i>Figure 2.10: Courbe d'étalonnage du capteur de déplacement LVDT.</i>	66
<i>Figure 2.11: Courbe effort-déplacement (a) et la partie linéaire de la même courbe (b) Pour une éprouvette de Wengé (Milletia laurentii)</i>	67
<i>Figure 2.12: Illustration de la notion de fractile d'exclusion inférieure.</i>	75
<i>Figure 2.13: Distribution statistique, modélisée en loi normale, d'une propriété indicatrice. Exemple de la masse volumique pour l'épicéa (Natterer et al, 2000)</i>	91
<i>Figure 2.14: Courbe de régression du MOR en fonction du MOE des essences du bassin du Congo d'après la base de données ITTO</i>	93
<i>Figure 2.15 : Exemple de traitement des données par le logiciel MINITAB</i>	94

<i>Figure 3.1 Matériel et appareil d'essai vibratoire: (la poutre est placée sur des supports élastiques , l'accéléromètre est fixé à une extrémité)</i>	<i>98</i>
<i>Figure 3.2: Essai de flexion quatre points (EN 408).</i>	<i>99</i>
<i>Figure 3.3: Fréquences cumulées du module vibratoire du Moabi à divers taux d'humidité</i>	<i>100</i>
<i>Figure 3.4: Fréquences cumulées du module vibratoire du Pin maritime à divers taux d'humidité.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 3.5: Fréquences cumulées du module vibratoire du pin maritime purgé (Pommier, 2006).....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 3.6 : Distribution cumulée du MOE_{vib} à différents taux d'humidité , lot 4.....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 3.7 : Distribution cumulée du MOE_{vib} à différents taux d'humidité , lot 5.....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 3.8 : Distribution cumulée du MOE_{vib} à différents taux d'humidité , lot 6.....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 3.9 : Distribution cumulée du MOR pour deux taux d'humidité obtenu suivant la norme EN 408, lot 6.</i>	<i>104</i>
<i>Figure 3.10 : Distribution cumulée du MOE pour deux taux d'humidité obtenu suivant la norme EN 408, lot 6.</i>	<i>105</i>
<i>Figure 3.11 : Corrélation entre MOE_{vib}. (taux d'humidité variable) et MOR_(12%), lot 3.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 3.12 : Complaisance élastique du matériau bois en fonction du temps de charge(échelle logarithmique).</i>	<i>107</i>
<i>Figure 3.13: Ressort schématisant le modèle de Hooke (élasticité parfaite).</i>	<i>108</i>
<i>Figure 3.14: Modèle de Newton (viscosité parfaite).....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 3.15: Modèle solide viscoélastique de Zener.</i>	<i>109</i>
<i>Figure 3.16 : 1+k_{creep} en fonction du taux d'humidité en flexion à 25°C (Huet et al., 1981).</i>	<i>112</i>
<i>Figures 3.17:Exemples de régression linéaire de MOE vibratoire en fonction de MOE statique.....</i>	<i>115</i>
<i>Figures 3.18:Corrélation entre MOE statique et MOE vibratoire pour tous les échantillons ayant subit l'essai de flexion statique.</i>	<i>118</i>
<i>Figure 3.19: Courbe des fréquences cumulées du rapport entre MOE vibratoire et MOE statique</i>	<i>117</i>
<i>Figure 3.20: Distribution des MOE_{vib}/MOE_{stat} pour du Lamellé-collé et du LVL (Casagrande, 1998).....</i>	<i>118</i>
<i>Figures 3.21:Exemples de régressions linéaires de la contrainte de rupture en fonction du MOE vibratoire.</i>	<i>121</i>
<i>Figures 3.22:Corrélation entre MOR et MOE vibratoire pour tous les échantillons ayant subit l'essai de flexion statique jusqu'à la rupture</i>	<i>122</i>
<i>Figures 3.23:Corrélation entre MOR et MOE à 12% d'humidité d'après la base de données du CIRAD(Gérard et al., 2004).....</i>	<i>124</i>
<i>Figures 3.24:Corrélation entre MOR et MOE à 12% d'humidité d'après la base de données de l'ATIBT(1986)</i>	<i>125</i>
<i>Figure 3.25:Corrélation entre MOR et MOE à 12% d'humidité d'après la base de données« Tropical Timbers Database »(ITTO, 2001)</i>	<i>126</i>
<i>Figure 3.26: Relation MOE / MOR pour du Pin maritime testé à l'état sec en dimension structurale d'après Dumail et Morlier (2004).....</i>	<i>127</i>
<i>Figures 3.27:Exemples de régressions linéaires de la masse volumique en fonction du MOE vibratoire.....</i>	<i>130</i>
<i>Figures 3.28:Corrélation entre Masse Volumique et MOE vibratoire pour tous les échantillons à 12% de taux d'humidité.</i>	<i>131</i>
<i>Figure 3.29: Corrélation MOE vibratoire expérimental à MOE ATIBT (rouge) et MOE CIRAD (vert)</i>	<i>134</i>

<i>Figure 3.30: Histogrammes avec un calage par une courbe de la loi normale pour chaque groupe.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 3.31: Fréquences cumulées du MOE expérimental de chacun des quatre groupes d'essences.....</i>	<i>139</i>
<i>Figure 3.32: Proportion actuelle des Groupes d'après les volumes d'exportation (ATIBT, 2003) des essences bois au port de Douala entre juillet 2001 et juin 2002.....</i>	<i>140</i>
<i>Figure 3.33: Valeurs seuils des classes.</i>	<i>143</i>
<i>Figure 3.34: Corrélations de la valeur moyenne du MOE en fonction de la valeur caractéristique de la résistance pour les systèmes de classes C, D et T.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 3.35: Corrélations de la valeur moyenne du MOE en fonction de la valeur caractéristique de la masse volumique pour les systèmes de classes C, D et T.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure 3.36: Corrélations de la valeur caractéristique de la résistance en fonction de la valeur caractéristique de la masse volumique pour les systèmes de classes C, D et T.</i>	<i>146</i>

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Perte de couvert forestier en Afrique Centrale entre 1990 et 2000 (FAO, 2005)	22
Tableau 1.2: Liste des essences couramment commercialisées au Cameroun.	23
Tableau 1.3: Statistiques des volumes d'exportation des essences bois au port de Douala (Cameroun) entre juillet 2001 et juin 2002 par ordre d'importance (D'après ATIBT, 2003).	24
Tableau 1.4: Paramètres fixes entrant dans les approximations linéaires des modèles de Bernoulli et Timoshenko.....	53
Tableau 2.1: $P[\hat{E}_\alpha < e_\alpha]$ pour quelques valeurs usuelles de n et de α	81
Tableau 2.2: Facteur de correction - λ pour un échantillon de taille n et les probabilités α_λ et $\alpha = 0.05$	83
Tableau 2.3: Facteur de correction - ε pour une estimation sans biais.....	85
Tableau 3.1: Taille et population des échantillons pour chaque campagne	96
Tableau 3.2: Résultats de la campagne d'essais du lot 1 (Moabi) donnant le module vibratoire (en MPa) en fonction du taux d'humidité.....	100
Tableau 3.3: Résultats de la campagne d'essais du lot 2 (Pin maritime) $E_{vib} = f(H)$	101
Tableau 3.4: Résultats statistiques du MOE_{vib}	104
Tableau 3.5: Comparaison des coefficients directeurs des courbes $MOR = f(MOE)$	126
Tableau 3.6: Résultats de la campagne d'essais relative au MOE vibratoire (en MPa).....	133
Tableau 3.7: Résultats de la campagne d'essais (en gras) et comparaison aux mesures du CIRAD (Gérard et al., 2004).....	134
Tableau 3.8: Affectation des essences dans l'un des trois groupes	135
Tableau 3.9: Valeurs caractéristiques au fractile 5% d'exclusion inférieure des essences et des groupes d'essences pour $\alpha = 0.05$, $\alpha_\lambda = 0.5$, et $n = 100$	136
Tableau 3.10: Récapitulatif des caractéristiques mécaniques et physiques de chaque groupe.	141
Tableau 3.11: Proposition des classes de résistance pour le classement des bois du bassin du Congo	141
Tableau 3.12: Classes de résistance et valeurs caractéristiques pour les résineux et le peuplier (norme EN 338).....	144
Tableau 3.13: Classes de résistance et valeurs caractéristiques pour les feuillus (norme EN 338).....	144
Tableau 3.14: Caractéristiques non mécaniques des essences regroupées (Gérard, 2004).	147

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

• Ouvrages, études, rapports, mémoires

[1] **ARISTEGUI C.** ; *Anisotropie élastique totale naturelle ou induite*. Thèse de Doctorat, Spécialité Mécanique, Université Bordeaux I, 1997.

[2] **BODIG J., JAYNE B.A.** ; *Mechanics of Wood and Wood Composites*, chp6, by Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1982.

[3] **BORDONNE P. A** ; *Module dynamique et frottement intérieur dans le bois - Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles*. Thèse de Doctorat, Spécialité Sciences du Bois, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989.

[4] **BRANCHERIAU L.**; *Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique*. Thèse de Doctorat. Spécialité mécanique. Université de la Méditerranée-Aix Marseille II, 2002.

[5] **CASAGRANDE S.**; *Evaluation non destructive par une analyse vibratoire des performances mécaniques de bois reconstitués*. Thèse de Doctorat, Spécialité Mécanique, Université de Bordeaux1, France, 1998.

[6] **CIRAD**; *Valorisation des produits forestiers*. Rapport annuel, CIRAD-Foret, campus international de Baillarguet, Montpellier, France, 1996.

[7] **DUDLEY N., JEANRENAUD J.P.** and **SULLIVAN F.**; *Bad Harvest ? The timber trade and the degradation of the world's forests*. WWF / Earthscan Publications Ltd. reprintedversion, 1996.

[8] **DUMAIL J.F.**; *Validation industrielle de nouvelles méthodes de classement non destructif des bois de Pin Maritime dans une scierie multi produits*. Rapport interne Xyloméca SARL et LRBB, 2004

[9] **EUROCODE 5**; *Conception et Calcul des Structures en Bois, Règles communes et règles pour les bâtiments*. Document CEN/TC 250/SC5 : N 195, 2000.

[10] **FAO**; *Evaluation des ressources forestières*. Rome, 2005.

[11] **FERRY, J. D.**, “Viscoelastic properties of polymers”, Wiley, New York, 1961

[12] **GERARD J. et al.**; *Caractéristiques techniques de 215 essences tropicales*. CIRAD TROPIX 5.0, Département Forêt du CIRAD, 2004.

[13] **GUITARD D.** ; *Mécanique du matériau bois et composites*. CEPADUES-Editions, 1987.

[14] **IUCN / The World Conservation Union**; *The Congo Basin / Le bassin du Congo*. Human and Natural Resources, mai 1998

- [15] **JOYET P. et al.** ; *Développement du classement mécanique des sciages de douglas*, Rapport intermédiaire, CTBA, décembre 2002.
- [16] **LEMAITRE et CHABOCHE** ; *Mécanique des matériaux solides*, ch VII, 2^{ème} édition 1985.
- [17] **MORLIER P.**, editor. ; *Creep in timber structures*. RILEM Report 8, E&FN SPON, 1994.
- [18] **NATTERER J., SANDOZ J.L., REY M.** . *Construction en bois*, Vol.13. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2000.
- [19] **NF B 52001**; *Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences de résineux et feuillus*. AFNOR, 1998.
- [20] **NF EN 338**; *Bois de structures – classes de résistance*. AFNOR, 1995.
- [21] **NF EN 384** ; *Bois de structure – Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*, AFNOR mai 1995.
- [22] **NF EN 408** ; *Structures en bois - Bois massif et bois lamellé-collé- Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques pour le calcul des structures*. AFNOR 1995.
- [23] **NF EN 1611**. *Méthode de classement d'aspect des bois sciés*. AFNOR, 2005.
- [24] **Norme Soviétique GOST n°16483.31** ; *Méthode de détermination à la résonance des modules d'élasticité et de cisaillement ainsi que des facteurs de pertes*, 1974.
- [25] **PLOUVIER D.**; *Promotion of sustainable forest management and certification in timber producing countries of West and Central Africa*. Final report. EC-project B7-5041/95.8/VIII. European Commission. Directorate General for Development. Unit Sustainable Development and Natural Resources. - World Wide Fund For Nature, June 1997.
- [26] **prEN 1194** ; *Structure en bois – Bois lamellé-collé – Classes de résistance et détermination des valeurs caractéristiques*. Etabli par le comité technique CEN/TC 124, 1995.
- [27] **RENAUDIN** ; *Approche probabiliste du comportement mécanique du bois de structure, prise en compte de la variabilité biologique*. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure de Cachan, 1997.
- [28] **RUEGG A.**; *Probabilités et statistique*, deuxième édition. Presses Polytechniques Romandes, 1988.
- [29] **SALENÇON J.**; *Viscoélasticité*. Cours de calcul des structures anélastiques, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1983.
- [30] **SCHMITT B.**; *Théorie de l'élasticité. Comportement mécanique des matériaux*. ADERA-ASTE Bordeaux, 1971.

[31] **THOMAS J.J.**; *Contrôle non destructif des matériaux et des structures par analyse dynamique non linéaire*. Thèse de Doctorat, Spécialité Mécanique, Ecole Polytechnique, 1995.

[32] **TSOUMIS G.**; *Science and technology of wood, Structure, properties, utilisation*. Van Nostrand Reinold. New York. USA, 1991.

[33] **TURK G., ZUPAN D.**; *Determination of unbiased estimates of characteristic values*. University of Ljubljana, Slovenia. Non référencé.

[34] **VIVIEN J. et FAURE J.J.**; *Arbres des forêts denses d'Afrique Centrale. Espèces du Cameroun*. Agence de Coopération Culturelle et Technique. Non référencé.

• Publications parues dans des journaux, des périodiques, des actes de congrès

[1] **ATIBT**; *Atlas des bois tropicaux*. Tome 1 – Afrique, 1986.

[2] **ATIBT** ; *Newsletter*, n° 16, 24, 2002.

[3] **ATIBT**; *Newsletter*, n° 18, 35-37, 2003.

[4] **ATIBT**; *Newsletter*, n° 20, 30-31, 2004.

[5] **AYINA O.**; *Commentaires*. Annales GC Bois, Vol.6, 19-20, 2002.

[6] **BOZHANG S., PELLERIN R.F.** ; *Nondestructive evaluation of the degree of deterioration in wood : stress wave frequency, spectrum analysis*. 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp99-114, Lausanne, Switzerland, 1996.

[7] **CASAGRANDE S., CASTERA P., MORLIER P.** ; *A simple method for evaluating creep limit in lumber*. International Conference of COST Action E8 Wood Mechanics, Theme : Wood-water relations, Copenhagen, Denmark, 1997.

[8] **CECOTTI A., NAKAI T., TOGNI M.** ; *Strength grading of structural timber by non destructive methods : a case study in Italy*. First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood, vol 2 pp443-456, Sopron, Hungary, 1994

[9] **DIVOS F., DANIEL I., HODASZ E., JARASI J.** ; *Experimental Investigation of thirteen Strength Predictor. Parameters of Coniferous Wood*. First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood, vol 2 pp341-349, Sopron, Hungary, 1994.

[10] **GERHARDS C.C.**; *Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects*. Wood Fiber 14(1) pp4-36, 1982.

- [11] **GLOS P.** ; *Technical and economical possibilities of timber strength grading in small and medium sized companies.* In : SAH - Bulletin 1983/1. Zürich : Schmeizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, 1983.
- [12] **GUITARD D, LIOT F, FOUJETA A** ; *Utilisation des vibrations transversales pour la caractérisation mécanique de poutres anisotropes.* 4^{ème} Colloque Sciences et Industries du Bois, Nancy, septembre 1996.
- [13] **HAINES D. W, LEBAN J. M, HERBE C** ; *Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods.* Wood Science and Technology, vol 30, pp253-263, 1996.
- [14] **HUET C.**, « Quelques aspects du comportement thermo-hygro-viscoélasticité du bois » Acte du Colloque Scientifique Européen du Groupement Scientifique Rhéologie du Bois, Bordeaux, France, 8–9 June 1988. Huet, C., 1998, « Quelques aspects du comportement thermo-hygro-viscoélasticité du bois » Acte du Colloque Scientifique Européen du Groupement Scientifique Rhéologie du Bois, Bordeaux, France, 8–9 June 1988.
- [15] **KOLLMANN F., KRECH H.** ; *Dynamische messung der elastischen holzeigenschaften und der dämpfung.* Holz als Roh - und Werkstoff, 18(2) :4154, 1960.
- [16] **LARSSON D., OHLSSON S., PERSTORPER M.** ; *Dynamic test as a tool for timber strength grading.* International Conference of IUFRO S5.02 Timber Engineering, Denmark, 1997.
- [17] **LE NAOUR F., MORLIER P.** ; *Le foramètre. Un outil de reconnaissance mécanique du bois.* Annales des Sciences Forestières, 48, pp47-61, 1991.
- [34] **LIN J.C., YANG T.H., ZHANG D.Z., WANG S.Y., LIN F.C.**, “Changes in the dynamic modulus of elasticity and bending properties of railroad ties after 20 years of service in Taiwan” The International Journal of Building Science and its applications, 2005
- [35] **LIOT F, GUITARD D, MORLIER P** ; *Non Destructive Evaluation of Wooden Elements in Bending : Beams, Poles or Logs.* First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood, vol 1 pp294-302, Sopron, Hungary, 1994.
- [18] **MADSEN B.** ; *Structural Behaviour of Timber.* Timber engineering ltd, Vancouver, British Columbia, Chp17, 1992.
- [19] **MORLIER P.** ; *Le classement des bois et des produits à base de bois, Outils, solutions,..., que choisir ?* Futurobois, Poitiers, 2005.
- [20] **MVOGO J.K., AYINA O., MORLIER P. & CASTERA P.** , *A new approach of grouping wood species and a proposal of a grading system of timber in Congo basin* (received No. 417). 10th World Conference on Timber Engineering, June 2-5, Miyazaki, Japan, 2008.
- [21] **MVOGO J.K., AYINA O., MORLIER P.** ; *Approche simplifiée pour l'échantillonnage des essences du bassin du Congo.* Séminaire sur les matériaux, Douala, juillet 2004.

- [22] **MVOGO J.K., AYINA O., CASTERA P., MORLIER J.**, *Bois du bassin du Congo: regroupement mécanique*. Bois et Forêts des Tropiques.
- [23] **NOACK D.**; *Evaluation des propriétés des bois tropicaux*. Revue Bois et Forêts des Tropiques, n° 144, 55-65, 1972.
- [24] **OHANDJA A., MVOGO J., MORLIER P.** ; *Mechanical grouping of structural timber species of the Congo basin forest*. 9th World Conference of Timber Engineering. Portland, OR, USA, august 2006.
- [25] **PERSTORPER M.** ; *Dynamic modal tests of timber - evaluation according to Euler and Timoshenko theory*. 9th International Symposium on Non destructive Testing of Wood, Madison, USA, 1994.
- [26] **PERSTORPER M.** ; *Strength and Stiffness Prediction of Timber using conventional and dynamic methods*. First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood, vol 2 pp321-330, Sopron, Hungary, 1994.
- [27] **POMMIER, R., ELBEZ, G.**, “Finger jointing green softwood – evaluation of the interaction between PUR adhesive and wood”, Journal of wood material science and engineering. 2006
- [28] **POMMIER R, MVOGO J., MORLIER P.**, *Non destructive grading of Maritime Pine Timber by vibration tests on green wood*. Wood Science and Technology. Date submitted by the author January 2008.
- [29] **POMMIER R**, Finger jointing on green maritime pine timber-evaluation of different adhesives and determination of resulting bending strength. International conference “Green gluing of wood”. Borås, Sueden. pp 46 51, 2005
- [30] **POMMIER R.** ; *Compréhension de l’aboutage du bois vert : Elaboration du procédé et principes physico-mécaniques appliqués au Pin maritime*. Thèse de Doctorat, Spécialité Mécanique, Université de Bordeaux1, France, 2006.
- [31] **RANTA-MAUNUS A.** ; *The viscoelasticity of wood at varying moisture content*. Wood Sci. Technol. 9, pp182-205, 1975.
- [32] **ROUGER F.**; *Classement du Bois pour un emploi en structures*. Communications : Design industriel, Architecture, Rhéologie du Bois, Bordeaux, mars 1997.
- [33] **Wang, S.Y., Lin, C.J., Chiu, C.M.**, “Evaluation of wood quality of Taiwania trees grown with different thinning and pruning treatments using the ultrasonic-wave method”, Wood Fiber Science 2005(2): 192–200. 2005.
- [34] **Wood Handbook**, “wood as an engineering material”, Forest product laboratory, forest service, US department of agriculture, 72., 1987

[35] ZUPAN D. et al.; *Characteristic value determination from small samples*. Proceedings of the International Conference on PRObabilistic Models in Timber Engineering. Tests, Models, Applications. Cost Action E24. Reliability Analysis of Timber Structures, 2005.

• Documents électroniques

[1] <http://www.greenpeace.org/france/campaigns/forets/afrique-forets-bassin-congo>

[2] <http://www.iucn.org/themes/ceesp/wcc/CPEES%20mandat%20fra.pdf>

[3] <http://www.onu.fr/doc/activite/sres.htm>

[4] [http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/pol_IndigPeoples_French/\\$FILE/OD420_French.pdf](http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/pol_IndigPeoples_French/$FILE/OD420_French.pdf)

[5] <http://www.ulb.ac.be/soco/apft/GENERAL/TEXTE/RESUME1.HTM>

[6] http://www.ramsar.org/key_guide_indigenous_f.htm

[7] <http://www.riddac.org/docs/traitecomifac.pdf>

[8] <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/glossaire-dd.pdf>

[9] http://www2.gtz.de/forest_certification/download/wp3f.doc.

[10] http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/x3030f/x3030f07.htm

[11] <http://www.congo-site.net/v4x/instit/home.php>

[12] <http://www.pdm-net.org>

[13] <http://www.gitpa.org//GITPA%20100-35.htm>

[14] <http://www.ifiasite.com/index.php?rub=Presse&langue=fr>

[15] <http://www.minef.cm>

[16] http://wwwcarpe.umd.edu/products/PDF_Files/FOCB_APrelimAsses_FR.pdf

[17] www.rainforestfoundation.org.uk

[19] <http://www.comifac.org/activites/activitesindex.htm>

[20] <http://WWW.comifac.org/accueilfr.htm>

[21] <http://www.fao.org/DOCREP/003/X6642F04.htm>

[22] <http://www.math.uah.edu/stat/point/index.html>, University