

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEUR

D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

D'EBOLOWA

DEPARTEMENT DE D'INGENIERIE

DU BOIS



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace - Work - Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TECHNICAL TEACHER

TREINING COLLEGE OF

EBOLOWA

DEPARTMENT OF OF WOOD

ENGINEERING

**Filière
MÉTIERS BOIS**

**CARACTERISATION MECANIQUE DU BOIS LAMELLE
COLLE
CONSTITUE DE BILINGA ET PADOUK**

Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention du Diplôme de Professeur d'Enseignement
Technique et
Professionnel de 2e grade (DIPET II)

Par : NJIKAM Mounirou

Sous la direction de

Pr. Dr. Ing. NJANKOUO Jacques Michel

Maitre de Conférences à l'Université de Yaoundé 1

M. MBANG A NGON Ousman Emmanuel

Technicien Métiers Bois

Année Académique : 2019 - 2020



FICHE DE CERTIFICATION DE L'ORIGINALITE DU TRAVAIL

Je soussigné **NJIKAM Mounirou**, atteste que le contenu du présent mémoire de fin de formation à l'école normale supérieure d'enseignement technique (ENSET) de l'Université de Yaoundé 1 à Ebolowa, est le fruit de mes propres travaux effectués au sein du Centre d'Apprentissage Ousman Bois Décor, Menuiserie Générale et du Laboratoire de Mécanique et de Modélisation des Systèmes Physiques de l'Université de Dschang sur le thème « DETERMINATION DE LA PERFORMANCE MECANIQUE CARACTERISTIQUE ET ETUDE RHEOLOGIQUE DU MATERIAU D'INGENIERIE CONSTITUE DE *Nauclea diderrichii* Merrill (BILINGA) ET *Pterocarpus soyauxii* Taub (PADOUK) ».

Ce travail a été effectué sous l'encadrement technique de Monsieur **MBANG A NGON Ousman Emmanuel**, directeur du Centre d'Apprentissage Ousman Bois Décor, Menuiserie Générale et sous l'encadrement académique de Professeur **NJANKOUO Jacques Michel**.

Ce mémoire est de ce fait authentique et n'a fait l'objet d'aucune soutenance en vue de l'obtention d'un quelconque grade universitaire.

Signature et Noms de l'Auteur

Date

Visa du superviseur

Visa du chef de département

Date :

Date ;

Dédicace

A ma très grande famille et en particulier à :

Ma mère : **YOUNGNOM Kaintouma,**

Mon père : **NJIKAM Chouaibou,**

Tous mes grands frères et sœurs, tous mes petits frères et sœurs

Remerciements

C'est une très grande joie de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Ainsi, j'aimerais remercier sincèrement mon encadreur de mémoire : **Professeur NJANKOUO Jaques Michel** qui m'a initié et supervisé ce travail de recherche.

Je remercie aussi **M. MBANG A NGON Ousman Emmanuel** : Directeur du Centre d'Apprentissage Ousman Bois Décor Menuiserie Générale, qui m'a accordé de faire le stage durant mon parcours académique jusqu'à la réalisation de ce mémoire de fin de formation.

Je remercie également tous les techniciens de ce Centre qui m'ont toujours transmis directement ou indirectement la technique.

Je n'oublierai pas de remercier le doctorant **M. FOUOTSA WOUTSOP Christian Martial** qui m'a toujours assisté de près au laboratoire sans relâche jusqu'à la rédaction de ce mémoire.

Je remercie tous les enseignants et personnels d'appuis de l'ENSET d'Ebolowa pour leurs apports moraux. Sans oublier tous les doctorants qui sont au département de mécanique de l'Université de Dschang en général et **M. KOUEFOUET Hervice** en particulier.

Je tiens à remercier également tous mes camarades qui sont devenus des nouveaux membres proches de la famille.

Je remercie ma mère et mon père pour tous leurs soutiens moraux et financiers, tous mes grands frères et sœurs, petits frères et sœurs pour tous leurs efforts fournis.

Je remercie aussi **M. DIEUDONNE** avec toute sa famille pour les efforts fournis.

SOMMAIRE

Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	x
Liste des abréviations.....	xi
Résumé.....	xiii
Abstract.....	xiv
INTRODUCTION GENERALE	1
Objectifs Généraux	2
Objectifs Spécifiques	2
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE.....	3
1.1 Généralités sur le Bois.....	3
1.1.1 Formation du bois	3
1.1.2 Structure du bois.	3
1.1.2.1 Echelle macroscopique.	4
1.1.2.2 Echelle microscopique.....	5
1.1.3 Paroi cellulaire	6
1.2 Séchage du Bois	8
1.2.1 L’hygroscopicité	8
1.2.2 L’hystérèse de sorption d’humidité	9
1.3 Matériaux Composites.....	10
1.3.1 Les matrices	11
1.3.2 Les renforts	11
1.4 Matériau Bois Lamellé Collé	12
1.4.1 Composition du matériau bois lamellé collé.....	13

1.4.1.1	Les colles	13
1.4.2.2	Les essences couramment utilisée pour la fabrication des BLC.	14
1.4.3	Fabrication du bois lamellé collé	15
1.4.4	Mode de collage des lamelles	15
1.4.5	Quelques formes de BLC.....	16
1.5	Caractérisation Mécanique du Bois au Laboratoire	16
1.5.1	Les dispositifs d'essai : cas de la traction axiale.....	16
1.5.2	Les dimensions des éprouvettes.....	17
1.5.3	Cas de la flexion statique quatre points	17
1.6	Rhéologie sur le matériau bois lorsqu'il est sollicité en traction, compression parallèle aux fibres.....	18
CHAPITRE 2 MATERIELS ET METHODES		20
2.1	Usinage et Réalisation du Bois Lamellé Collé Panaché	20
2.1.1	Approvisionnement en bois	20
2.1.2	Usinage du bois en lamelle	20
2.1.3	Collage des lamelles du bois.....	21
2.1.4	Usinage du bois lamellé collé	22
2.1.5	Tronçonnage du BLC.....	22
2.2	Réalisation des Différents Essais sur les Dispositifs et Collecte des Données.	24
2.2.1	L'essai de flexion statique quatre points.....	24
2.2.2	Essai de compression axiale.....	26
2.2.2.1	Principe.....	26
2.2.2.2	Mode opératoire.....	26
2.2.3	Essai de traction axiale.....	27
2.2.3.1	Principe	27

2.2.3.2	Mode opératoire.....	27
2.2.4	Séchage des éprouvettes	28
2.2.4.1	Principe.....	28
2.2.4.2	Mode opératoire.....	28
2.3	Traitement des Données.....	29
2.3.1	Cas de la compression.....	29
2.3.2	Cas de la flexion.....	30
2.3.3	Cas de la traction.....	30
2.4	Détermination de l'Humidité des Eprouvettes.....	30
2.5	Vérification du Choix du Nombre d'Eprouvette.....	31
2.6	Analyse Rhéologique du Matériau Bois.....	31
2.6.1	Comportement des éprouvettes lors des essais	31
2.6.2.1	Cas des éprouvettes de traction / compression	31
2.6.3	Les matériaux composites.....	36
2.6.3.1	Expression de la fraction volumique du composite.....	36
2.6.3.2	Expression de la masse volumique du composite	37
2.6.3.3	Composite sollicité en résistance parallèle aux fibres	37
2.6.3.4	Expression de la Contrainte du composite	38
CHAPITRE 3	RESULTATS ET DISCUSSION	40
3.1	Présentation des Résultats	40
3.1.1	Choix du nombre d'échantillon	48
3.1.2	Expression finale des résultats	55
3.1.2.1	Cas de la contrainte intermédiaire $\sigma_{T \text{ int}}$:.....	55
3.1.2.2	Cas de la contrainte de traction σ_T	55
3.1.3	Analyse rhéologique des éprouvettes de traction.....	58

3.1.3.1	Domaine de la déformation élastique réversible	58
3.1.3.2	Domaine de la déformation plastique inhomogène ou striction	58
3.2	DISCUSSION	59
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		61
➤	CONCLUSION GENERALE.....	61
➤	PERSPECTIVES	62
BIBLIOGRAPHIE		63
ANNEXES		65
1	Mécanique :	65
2	Le bois lamellé collé:	66

Liste des figures

Figure 1: Tabourets en Louis xiv marquetés et assortis d'un guéridon central	1
Figure 1.1: Différentes échelles d'observation d'un bois de résineux	4
Figure 1.2: Coupe transversale d'un tronc d'arbre	5
Figure 1.3: Structure du bois : (a) Plans de symétrie naturelle du matériau bois ; (b) Plan ligneux typique d'un feuillus ; (c) Celui d'un résineux.	6
Figure 1.4 : Différentes couches de la paroi cellulaire et angle des micro-fibrilles	7
Figure 1.5 : Humidité d'équilibre du bois d'arable à sucre en fonction de l'humidité relative de l'air à 21 0c	10
Figure 1.6 : Types de matrice	11
Figure 1.7: Type de renfort	12
Figure 1.8: Lamellé-collé horizontal (a) et vertical (b).....	15
Figure 1.9 : BLC à inertie constante.	16
Figure 1.10: BLC à inertie variable	16
Figure 1.12: Epreuve de traction la longueur initiale entre repères L0 est normalisée	17
Figure 1.13 : Epreuve sollicitée en flexion quatre points	18
Figure 2.1 : Bois lamellé panaché (à gauche) et Bois lamellé collé séré (à droite).....	22
Figure 2.3: Epreuves de traction axiale (à droite) et Epreuves de compression axiale (à gauche).....	23
Figure 2.4 : Coupe schématique d'une épreuve en flexion quatre points.....	24
Figure 2.5 : Pose d'Epreuve de flexion sur la presse hydraulique.....	25
Figure 2.6: Epreuve sollicitée en compression axiale	26
Figure 2.7 : Rupture de l'épreuve de traction	27
Figure 2.8 : Epreuve sur balance	28
Figure 2.10: Diagramme charge-allongement d'une épreuve en traction.	34

Figure 2.11: Eprouvettes sollicitées en traction (1) et en compression (2).....	35
Figure 2.12: Composite bois et colle.	36
Figure 2.14: Module d'élasticité du composite monté en parallèle	37
Figure 3.1 : Courbe de fréquence de la contrainte de flexion des éprouvettes testées sur parement.....	41
Figure 3.2 : Courbe de fréquence de la contrainte de flexion des éprouvettes testées sur champs des lamelles.....	43
Figure 3.3 : Courbe de fréquence de la contrainte des éprouvettes de compression	45
Figure 3.4 : Courbe de fréquence de la contrainte des éprouvettes de traction intermédiaire ..	46
Figure 3.5 : Courbe de fréquence de la contrainte de traction axiale	48
Figure 3.6 : Courbe de fréquence de la contrainte de flexion des éprouvettes testées sur parement.....	50
Figure 3.7: Courbe de fréquence de la contrainte de flexion des éprouvettes testées sur champ des lamelles.....	51
Figure 3.8 : Courbe de fréquence de la contrainte des éprouvettes de compression	53
Figure 3.9: Courbe de fréquence de la contrainte des éprouvettes de traction intermédiaire...	54
Figure 3.10: Courbe de fréquence de la contrainte de traction axiale	55
Figure 3.11 : Courbe de la contrainte de traction σ et de la déformation ϵ	58
Annexe 1 : Comportement de l'éprouvette de flexion sollicitée.	66
4 : Illustration de quelques machines utilisées pour l'usinage du bois.	69

Liste des tableaux

Tableau I: Essences couramment utilisées pour la fabrication des poutres en BLC	14
Tableau II : Premiers résultats de flexion statique quatre points testé sur face des lamelles. ..	40
Tableau III : Premiers résultat des éprouvettes de flexion statique quatre points testées sur champ des lamelles.	42
Tableau IV: Premiers résultats des éprouvettes de compression axiale	44
Tableau V: Premiers résultats intermédiaires des éprouvettes de traction axiale.....	45
Tableau VI: Premiers résultats des éprouvettes de traction axiale	47
Tableau VII : Seconds résultats de flexion statique quatre points testé sur face des lamelles.	49
Tableau VIII : Seconds résultats de flexion statique quatre points testé sur champ des lamelles.	50
Tableau IX : Seconds résultats des éprouvettes de compression axiale	52
Tableau X: Seconds résultats intermédiaires des éprouvettes de traction axiale.....	53
Tableau XI: Seconds résultats des éprouvettes de traction axiale	54
Tableau XII: Les résultats issus de ce travail sont les suivants	57
Tableau XIII: Ensemble des résultats (BLCc et bois massif) présenté clairement.	59
Tableau XIV : Les domaines intéressés par la mécanique.	65
Tableau XV : Quelques avantage du BLC.....	66

Liste des abréviations

BLC	Bois lamellé collé
BLCc	Bois lamellé collé combiné ou panaché
CIRAD-	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le
Forêt	Développement
cm	centimètre
cm ²	centimètre carré
<i>E</i>	est l'erreur estimée à 5%
<i>E</i>	est aussi le module d'Young
<i>F</i>	est la force de rupture en N
FASA	Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles
FMBEE	Filière des Métiers du Bois de l'Eau et de l'Environnement
<i>H</i>	Humidité du bois
<i>H_{eq}</i>	humidité d'équilibre
HR	Humidité relative
kg	kilogramme
<i>L</i>	Longueur finale de l'éprouvette
<i>L₀</i>	Longueur initiale de l'éprouvette
m	mètre
m ²	mètre carré
m ³	mètre cube
<i>m_H</i>	est la masse en gramme de l'éprouvette avant dessiccation
mm	millimètre
mm ²	millimètre carré
mm ³	millimètre cube
<i>m_o</i>	est la masse en gramme de l'éprouvette à l'état anhydre
<i>m_t</i>	Masse totale du composite
<i>m_b</i>	Masse du bois
<i>m_c</i>	Masse de la colle
<i>n</i>	est le nombre d'éprouvettes testées
<i>n'</i>	est le nombre d'éprouvettes à déterminer

R_e	Résistance élastique
R_m	Résistance maximale
R_r	Résistance à la rupture
S_c	est la surface de la colle
S_b	est la surface du bois
S_1	est la variance sur la pièce 1
S_2	est la section de l'éprouvette
S_1	est la surface de la colonne d'air dans le piston de la presse
V	est le volume du composite
V_b	Volume du bois
V_c	Volume de la colle
$\bar{\bar{x}}$	est la moyenne des moyennes
σ	est la contrainte appliquée progressivement
σ_1	est la pression envisagée en barre
σ_n	est l'écart type de la série
σ_{ij}	est le tenseur des contraintes
ε	est la déformation de l'éprouvette.
ε_e	est la déformation élastique
ε_v	est la déformation viscoélastique
ε_p	est la déformation plastique
ε_{ij}	est le tenseur des déformations
ε_0	est la déformation élastique instantanée
σ_c	est la contrainte de rupture
δ_{ij}	est l'échelle du repère
$z_{\alpha/2}$	est l'intervalle de confiance
η	Coefficient de Poisson
ρ_t	Masse volumique du composite

Résumé

Ce mémoire a pour objectif principal la détermination des propriétés mécaniques caractéristiques du bois lamellé collé combiné (BLCc) constitué des essences bilinga (*Nauclea diderrichii* Merrill) et padouk (*Ptérocarpus xoyausii* Taub) toutes des essences feuillues tropicales, en vue d'une comparaison entre celles-ci et celles du bois massif utilisé. Cet objectif fait appel d'une part à la réalisation des éprouvettes à l'atelier de menuiserie après approvisionnement en bois et colle, et d'autres parts aux essais de compression/traction axiale et la flexion statique quatre points sur des éprouvettes au Laboratoire de Mécanique et de Modélisation des Systèmes Physiques de l'Université de Dschang. Les résultats obtenus après analyse des données sont les suivants : en compression $f_{c,g,0,k} = 87 \text{ MPa}$, en traction axiale $f_{t,g,0,k} = 214 \text{ MPa}$, en flexion statique $f_{m,g,0,k} = 118 \text{ MPa}$ d'une part et $f_{m,g,0,k} = 129 \text{ MPa}$ d'autres parts. Ses résultats montrent que le bois lamellé et collé déploie une performance mécanique considérable face à celle du bois massif pris individuellement. Cette science expérimentale justifie pratiquement la création des motifs en BLCc dans les différentes entreprises de seconde transformation du bois. A l'issue de ses résultats, une dernière partie (rhéologie) est évoquée pour comprendre le comportement du bois lorsqu'il est sollicité en service.

Mots clés : Bois, flexion, traction, compression.

Abstract

The main objective of this thesis is to determine the mechanical properties typical of variegated laminated wood (BLCC), consisting of the Bilinga species (*Nauclea diderrichii* Merrill) and Padouk (*Pterocarpus xoyausii* Taub), all tropical hardwood species, for comparison with the solid wood previously used. This objective involves, on the one hand, the production of the test specimens at the carpentry workshop after the supply of wood and glue, and on other parts to the compression / axial tensile tests and the four-point static flexion on specimens at laboratory of the University of Dschang. The results obtained after analysing the data was as follows. By compression $f_{c,g,0,k} = 87 \text{ MPa}$, by axial tensile $f_{t,g,0,k} = 214 \text{ MPa}$, by static flexion $f_{m,g,0,k} = 118 \text{ MPa}$ from one part to $f_{m,g,0,k} = 129 \text{ MPa}$ another part. Show that the laminated and bonded wood displays a considerable mechanical performance compared to that of the solid wood taken individually. This experimental science justifies practically the creation of patterns in BLCC in the various companies of secondary transformation of wood. At the end of its results, a last part (rheology) is evoked to understand the behavior of the wood when it is solicited in use.

Key words: wood, flexion, tensile, compression,

INTRODUCTION GENERALE

Pour une bonne gestion de déchet de sciage au sein de certaines entreprises de première transformation et au sein de certains ateliers de menuiserie, les chutes de bois sont sélectionnées, usinées et collées pour avoir des pièces ayant une surface importante pouvant servir à la place du bois massif. De même, certains menuisiers fabriquent les lamellés collés pour accroître la plus-value de leurs ouvrages du point de vue esthétique, en envisageant la marqueterie (incrustation d'essence de bois différents pour créer des motifs variés sur les meubles) ; c'est le cas de la figure 1.



Figure 1: Tabourets en Louis xiv marquetés et assortis d'une table centrale

Pour le cas des ouvrages ayant des portées mettant hors usage du bois massif tels que les ponts dont les poutres sont en arc, les charpentes industrielles dont l'entrait de la ferme principale dépasse déjà vingt mètres, les carcasses en arc (cas de la charpente de 1548), les portiques, le bois lamellé collé est dès lors envisagé. Ces matériaux nouvellement fabriqués (figure 1), font naître des interrogations à savoir : quelle est la résistance mécanique caractéristique (en compression axiale, flexion statique, traction axiale) de ses bois lamellés collés (BLCc) ? Comment se comportent-ils lorsqu'ils sont soumis à des contraintes ? Pour

essayer d'apporter des solutions à cette problématique, il est crucial de fabriquer les éprouvettes (échantillons) de bois lamellé collé panaché (BLCp) constitué d'essence *Nauclea diderrichii* Merrill (Bilinga) et de *Pterocarpus soyauxii* Taub (Padouk) puis tester leur performance mécanique. La fabrication des carottes est faite au Centre D'apprentissage Ousman Bois Decor Menuiserie Générale situé à Ebolowa derrière BUCA VOYAGE. Ce dernier a vu le jour en mai 2006. Il forme les jeunes en menuiserie et ébénisterie pendant deux ans dont deux mois de formation théorique et un an huit mois de pratique sur six machines d'atelier. La formation est clôturée avec une attestation de réussite aux récipiendaires, offerte par le Fond National de l'Emploi et de la formation professionnelle. Ce centre dispose des personnels suivants : un Directeur, un Conseillé, un Secrétaire, un Chef des travaux, Chef d'atelier, les Ouvriers. Pour le test des résistances, le Laboratoire de Mécanique et de Modélisation des Systèmes Physiques de l'Université de Dschang est sollicité. Il est coordonné par le chef du département de physique. Pour maintenir cette idée, plusieurs objectifs sont fixés à savoir :

❖ Objectif Général

Tester les propriétés mécaniques caractéristiques des éprouvettes du bois lamellé collé panaché constitué des essences bilinga (*Nauclea diderrichii* Merrill) et padouk (*Pterocarpus soyauxii* Taub), en vue d'une comparaison entre celles-ci et celles du bois massif antérieurement utilisé.

❖ Objectifs Spécifiques

- 1 Usinage et réalisation des lamellés collés panachés, suivi de leur acheminement au laboratoire de physique de l'université de Dschang,
- 2 Réalisation des différents essais (compression axiale, flexion statique quatre points et traction axiale) des éprouvettes sur les différents dispositifs et collecte des données.
- 3 Traitement des données et étude rhéologique du BLCc.

L'atteinte de nos objectifs fait appel à une revue de la littérature déjà développée dans le domaine abordé au chapitre un, les matériels utilisés ainsi que les méthodes adoptées au chapitre deux, une présentation des résultats et discussion au chapitre trois, une conclusion et perspective.

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE

La mécanique est la science qui étudie les forces, les lois de l'équilibre et du mouvement ainsi que l'action des machines.

La rhéologie est l'étude du comportement de la matière qui s'écoule en fonction de sa plasticité, de son élasticité et sa viscosité lorsqu'elle est soumise à des déformations, des contraintes et des pressions.

1.1 Généralités sur le Bois.

Le bois est la « matière ligneuse et cellulósique située entre la moelle et l'écorce d'un arbre ou d'un arbuste » (EN 844-1). Ce matériau se définit également comme étant un ensemble de tissu résultant de l'assise génératrice cambiale. Il a fait l'objet de nombreuses études et continue encore à attirer l'attention des chercheurs vu sa complexité et les nombreuses applications technologiques qu'il offre. Il serait nécessaire avant toute investigation, de faire une description générale de ce matériau.

1.1.1 Formation du bois

Le tissu vivant nommé "cambium" produit le bois qui est situé sous l'écorce. Dans les zones tempérées, ce tissu ne fonctionne qu'en printemps et en été (saison de végétation), et toute l'année pour les zones tropicales. Chaque année, il y a production d'une couche de bois appelée "cerne annuel de croissance". Cette dernière se compose de deux zones, l'une est claire (bois initial ou de printemps) et l'autre de couleur plus foncé (bois final ou d'été).

1.1.2 Structure du bois.

Le bois est un matériau bio-polymérique et composite. Sa structure est cellulaire, hiérarchique et structurée par niveau, chacune bien agencée. Ce matériau remplit ainsi plusieurs fonctions :

- Conduction de la sève brute ascendante allant des racines jusqu'à la cime ;
- Soutien et de résistance mécanique ;
- Stockage, restitution, élaboration et transformation chimique de substances.

De nature, le bois est hétérogène, hygroscopique, poreux, et fortement anisotrope. Ses propriétés physiques et mécaniques dépendent de la direction de sollicitation, ce qui lui confère le caractère d'anisotropie. Le bois conserve son anisotropie à toutes les échelles de sa structure : macroscopique, microscopique et nanoscopique. Les différentes échelles de la structure du matériau bois sont illustrées par la figure 1.1 (cas d'un résineux) (Harrington *et al*, 1998).

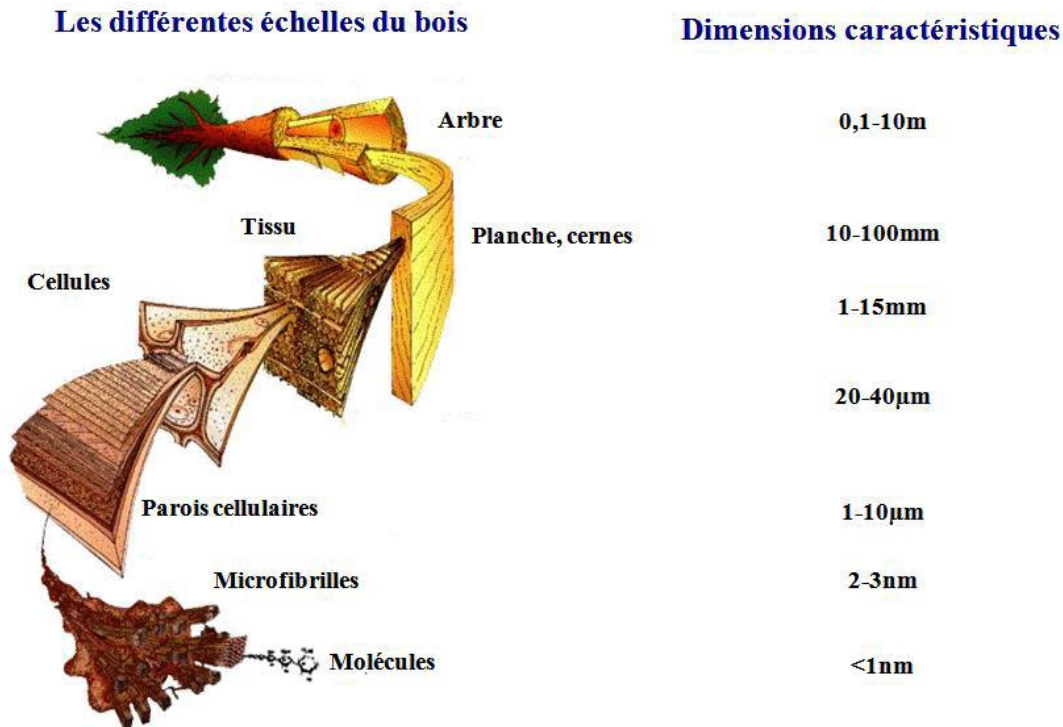


Figure 1.1: Différentes échelles d'observation d'un bois de résineux (Harrington et al, 1998).

Pour mieux cerner l'origine du comportement anisotrope (variation des propriétés optique, physique et mécanique selon les directions) du matériau bois, les paragraphes suivants présentent une description plus détaillée de sa structure à l'échelle macroscopique puis microscopique. Le passage entre ces différentes échelles met en relation l'anatomie du bois et ses propriétés physiques et mécaniques.

1.1.2.1 Echelle macroscopique.

La structure du matériau bois est étudiée à travers l'examen de ses trois sections orthogonales constituant les plans ligneux. Ces plans sont le plan transversal (RT) formé par la combinaison des deux directions radiale et tangentielle, le plan radial (RL) parallèlement à la direction de la tige en le traversant au centre et le plan tangentiel (TL) caractérisé par sa tangente aux cernes de croissance et parallèle à l'axe de la tige. Ainsi, le matériau bois peut être décrit semblablement à un matériau orthotrope. Il est structuré par des couches concentriques, chacune se compose de deux sous couches : une claire et l'autre foncée. L'aubier (partie sous l'écorce) a pour rôle la circulation de la sève brute. Le duramen dit aussi bois parfait ou adulte est constituée de cellules mortes, ayant pour fonction essentiellement le soutien mécanique. Généralement, le duramen se

distingue de l'aubier par sa couleur plus foncée suite à la sécrétion des extractibles favorisant la durabilité du bois (figure 1.2).

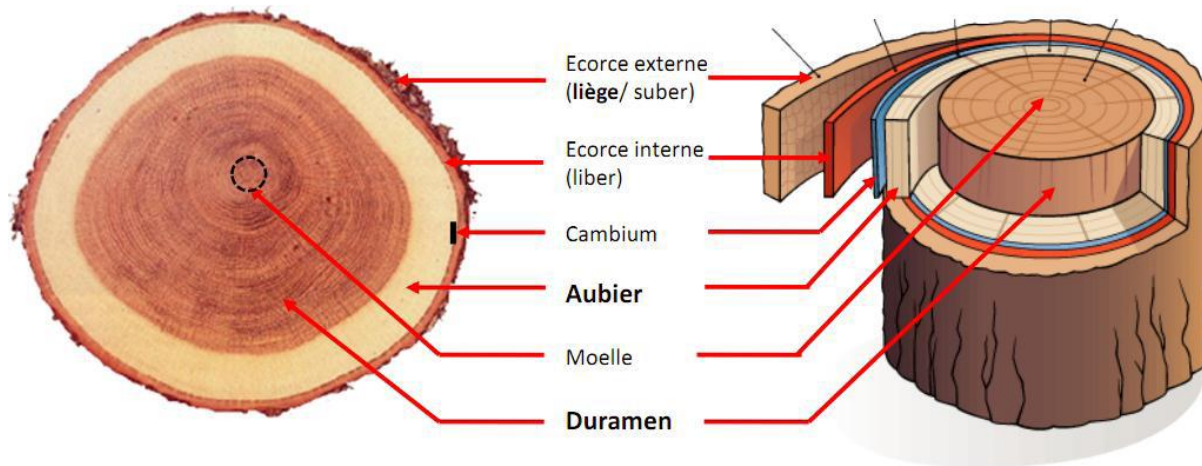


Figure 1.2: Coupe transversale d'un tronc d'arbre (Harrington et al, 1998).

1.1.2.2 Echelle microscopique

Pour les feuillus, chaque type de cellule assure une fonction particulière : les cellules, à paroi mince et au lumen pouvant atteindre jusqu'à plusieurs centaines de microns, constituant les éléments de vaisseaux assurent essentiellement la conduction. Tandis que les fibres formées de cellule à paroi épaisse et au lumen étroit assurent la fonction de soutien mécanique.

Dans le cas des résineux, un seul type de cellules dans la direction axiale, les trachéides, assure à la fois les rôles de conduction et de soutien. Seules la forme et l'épaisseur des parois vont évoluer pour favoriser plus de conduction (paroi fine et large lumen) ou plus de soutien (paroi épaisse et petit lumen). Le stockage et la restitution des réserves sont assurés par des cellules de parenchyme orientées suivant les directions radiale et axiale. La figure 1.3 ci-dessous illustre les plans ligneux et la structure anatomique aussi bien des feuillus que des résineux.

La structure cellulaire du bois à cette échelle est de type « nid d'abeilles » avec des cellules longitudinales qui sont principalement des trachéides (cas des résineux). Un cerne de croissance annuel est composé de deux types de bois différents : le bois initial et le bois final. Le bois initial, ou de printemps, est composé des cellules ayant un lumen de grand diamètre et une épaisseur de paroi cellulaire relativement réduite, ce qui explique son principal rôle de conduction. En revanche, le bois final, ou bois d'été, est composé de cellules ayant un lumen de

plus faible dimension et une épaisseur de paroi cellulaire plus importante, ce qui explique son principal rôle de soutien mécanique (Placet, 2006).

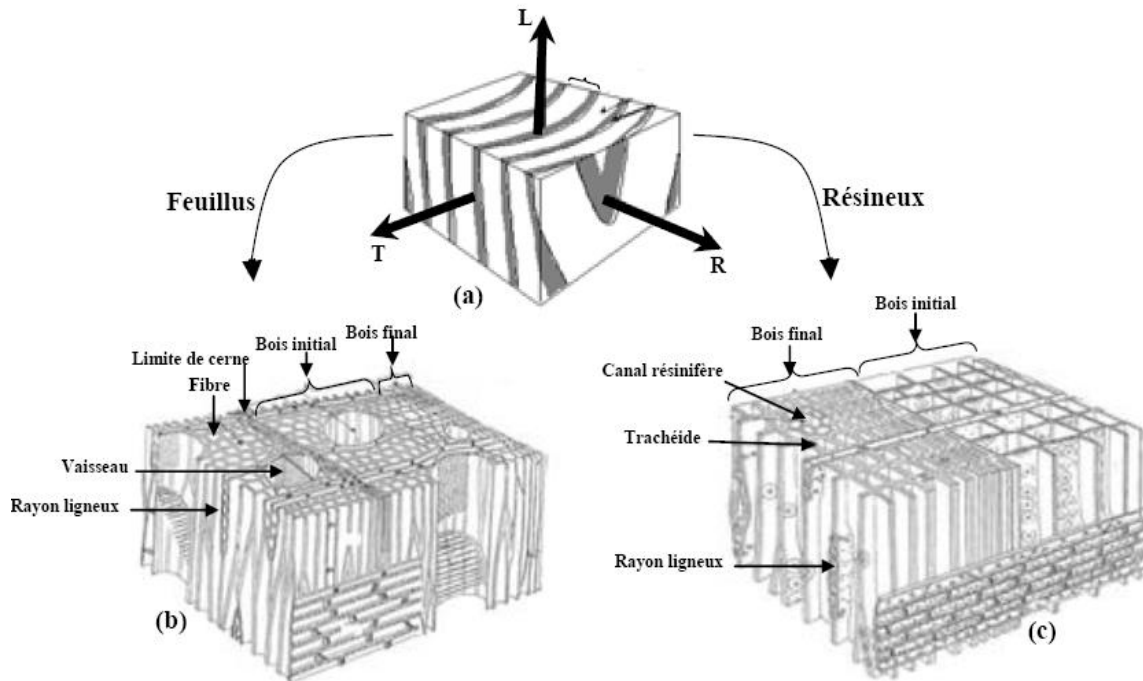


Figure 1.3: Structure du bois : (a) Plans de symétrie naturelle du matériau bois ; (b) Plan ligneux typique d'un feuillus ; (c) Celui d'un résineux (Placet, 2006).

Le bois initial apparaît à l'échelle macroscopique plus claire que le bois final car sa densité est plus faible. L'existence des plans caractéristiques : transverse, radial et tangentiel confère au bois, à cette échelle, un comportement quasi-orthotrope en coordonnées cylindriques aussi bien pour ses propriétés physiques que mécaniques.

1.1.3 Paroi cellulaire

La cellule ligneuse est une multicouche construite depuis l'extérieur vers l'intérieur. L'hétérogénéité est présente aussi à l'échelle de la paroi cellulaire. En effet, celle-ci est formée par un empilement de couches de composition comme illustré par la figure 5. En allant de l'extérieur vers l'intérieur de la cellule, nous trouvons en premier la lamelle mitoyenne (ML) qui assure le lien entre les cellules voisines, puis la paroi primaire (P1) et finalement la paroi secondaire qui est généralement composée de trois sous couches appelées S1, S2 et S3. La paroi primaire est la paroi initiale de la cellule vivante. La paroi secondaire est déposée au cours du développement de la cellule.

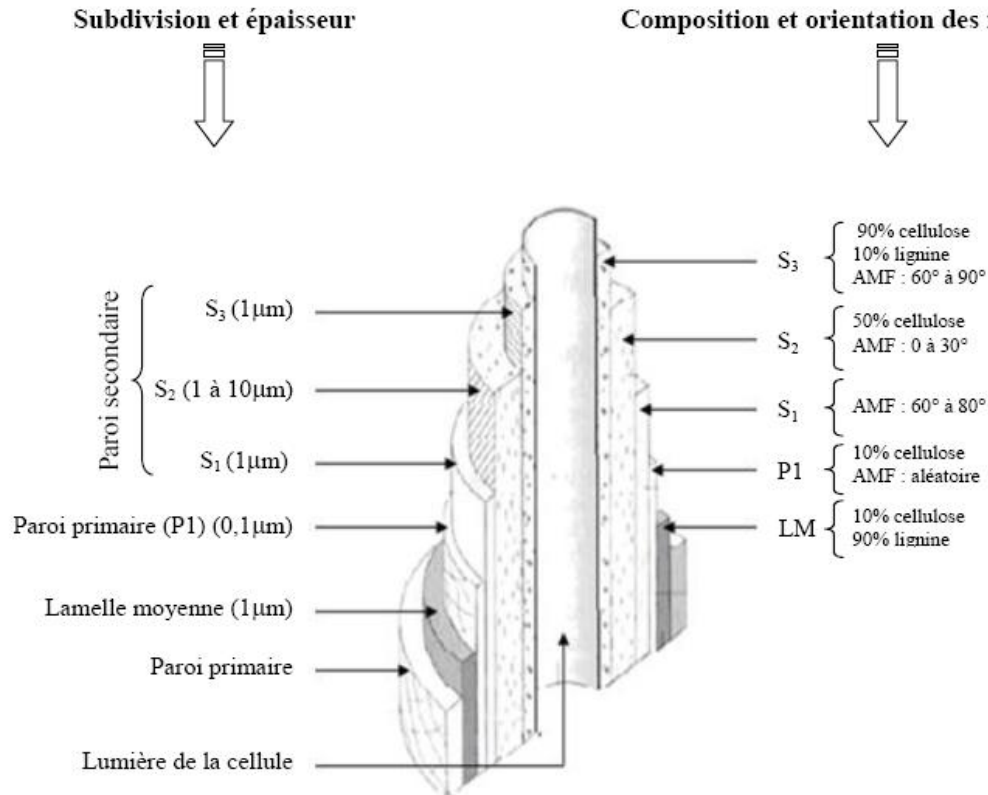


Figure 1.4 : Différentes couches de la paroi cellulaire et angle des micro-fibrilles (Chanrion, 2002). (AMF : angle des micro-fibrilles)

L'épaisseur de la lamelle mitoyenne est de l'ordre du micromètre, celle de la paroi primaire est encore plus faible, elle est de l'ordre d'un dixième de micromètre. La lamelle mitoyenne est principalement composée de pectines et de lignines qui sont des polymères amorphes. La paroi primaire est principalement structurée de lignine, d'hémicellulose et d'un réseau de micro-fibrilles de cellulose para-cristalline sans orientation particulière. La paroi secondaire représente la couche la plus épaisse et elle est composée de trois sous-couches de lignine, d'hémicellulose et de micro-fibrilles de cellulose cristalline disposées en hélice autour du lumen.

La première sous-couche S1 a une épaisseur faible (1 μm) et des micro-fibrilles qui font un angle variant de 60° à 80° avec l'axe longitudinal de la cellule. La deuxième sous-couche S2 est la couche la plus épaisse, son épaisseur pouvant varier de 1 à 10 μm. Elle constitue la majeure partie de la paroi cellulaire (jusqu'à 85% de l'épaisseur). Elle est composée d'environ (1/4) de lignine, (1/4) d'hémicelluloses et (1/2) de cellulose paracristalline. L'angle des micro-fibrilles dans celle-ci varie de 0° à 30°. Cette couche étant la plus épaisse avec la plus grande quantité de

cellulose et des microfibrilles quasi-alignées avec la direction longitudinale, elle est le déterminant principal des propriétés élastiques à l'échelle macroscopique. C'est pourquoi on relève usuellement son angle de micro-fibrilles. La troisième sous-couche S3 est une couche fine (1 μ m) où les micro-fibrilles sont arrangées de façon presque similaire à la couche S1 avec un angle allant de 60° à 90°.

Le comportement global de la paroi cellulaire est de type orthotrope cylindrique suivant l'axe de la cellule. Chacune des couches de la paroi secondaire a un comportement quasi-isotrope transverse avec comme première direction principale celle des micro-fibrilles de cellulose. Quel que soit l'essence, la matière ligneuse constituant la paroi cellulaire, est en première approximation, identique. C'est pourquoi il est possible de prédire le comportement élastique macroscopique orthotrope du bois à l'aide de relations empiriques dites de Guitard basées sur la densité du bois (quantité de matière ligneuse), le type de bois (feuillus ou résineux) et la teneur en eau (effet plastifiant de l'eau sur les polymères amorphes comme les hémicelluloses principalement) (Guitard, 1987).

1.2 Séchage du Bois

1.2.1 Généralités sur l'hygroscopicité

D'après Stamm (1964) et Kollmann et Côté (1968), les molécules d'eau sont retenues dans le bois sous trois formes: celles liées au niveau monomoléculaire, celles sorbées à titre polymoléculaire et enfin celles retenues dans les capillaires fins des membranes par action des forces de capillarité.

La distinction entre l'absorption et l'adsorption. Dans le cas de l'absorption, le liquide est retenu dans de gros capillaires d'un solide poreux par de forces de tension superficielle comme, par exemple, l'absorption de l'eau liquide par le bois au-dessus du PSF. Dans cette circonstance, les molécules d'eau sont faiblement retenues par la structure poreuse et ainsi son évaporation requiert peu d'énergie. D'autre part, l'adsorption peut avoir lieu sur des matériaux poreux, de la poudre fine et du gel gonflant. Les substances, en plus d'être sous forme liquide comme dans le cas de l'absorption, peuvent être sous forme de gaz et de vapeur. L'adsorbant retient l'absorbât par des forces d'attraction plus intenses que celles de cohésion du propre absorbât en soi

(Stamm, 1964). La désorption caractérise le phénomène inverse de l'adsorption, c'est-à-dire la perte de l'absorbât présent dans l'adsorbant (Stamm, 1964).

1.2.2 L'hystérèse de sorption d'humidité

L'humidité d'équilibre du bois ($H_{\text{éq}}$) est définie comme la teneur en humidité dans laquelle le bois ne gagne ni perd de l'eau, c'est-à-dire il existe un équilibre entre l'humidité du bois et l'humidité relative (HR) de l'air qui l'entoure (FPL, 2010). L'HR joue ainsi un rôle essentiel sur l'équilibre du bois, mais d'autres facteurs comme la température, l'état de sorption (adsorption ou désorption), les contraintes mécaniques, l'espèce, la densité et la teneur en extraits peuvent aussi l'influencer (Siau, 1995).

La façon dont l'équilibre est obtenue, soit à partir de l'adsorption ou de la désorption, fait que l'équilibre puisse être situé entre deux valeurs limites. Ce phénomène s'appelle hystérèse de la sorption d'humidité dans le bois (Goulet, 1967). Cela implique qu'à une HR donnée, l'équilibre en adsorption à partir de l'état anhydre sera toujours inférieur à celle atteinte à partir de la désorption. En d'autres mots, l'équilibre dépend des conditions auxquelles le bois fut soumis auparavant et non seulement des conditions actuelles. Une conséquence pratique de ce phénomène est qu'une certaine variation de l'HR peut entraîner, dans certaines limites, peu ou aucune variation de l'équilibre, ce qui est important pour la stabilité dimensionnelle des produits du bois lors d'un changement de l'air ambiant (Schniewind, 1956). La figure 1.5 montre l'humidité d'équilibre du bois d'érable à sucre en fonction de l'HR de l'air à 21°C.

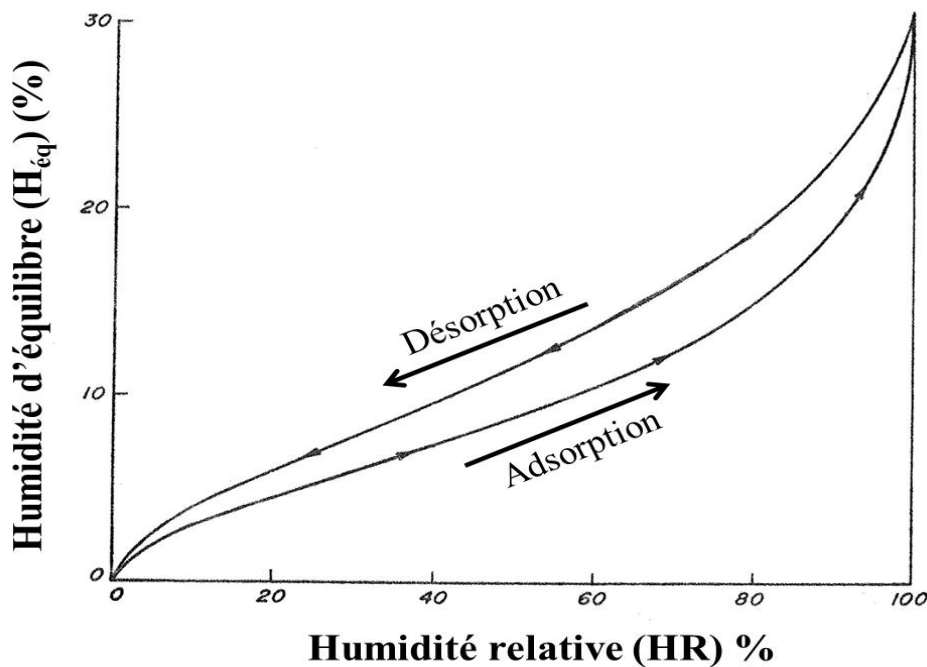


Figure 1.5 : Humidité d'équilibre du bois d'arable à sucre en fonction de l'humidité relative de l'air à 21 0c (adapté de Goulet, 1968)

1.3 Matériaux Composites

1.3.1 Généralités

Selon Gornet (2008), un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Nous étudions plus particulièrement les matériaux composites à renfort fibre longue continue utilisés dans l'industrie nautique, automobile, aéronautique et spatiale. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée.

Nous présentons les différents types de matrices et renforts classiquement employés dans l'industrie. Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques.

1.3.2 Les matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200°C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure 1.6.

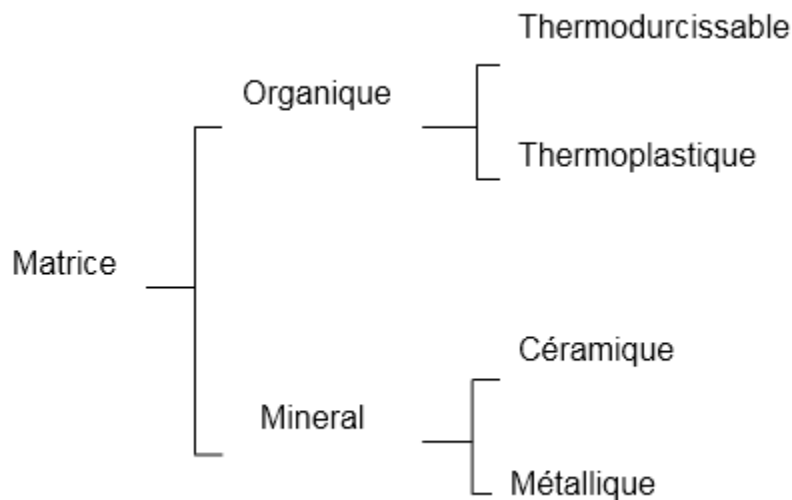


Figure 1.6 : Types de matrice (Gornet, 2008).

1.3.3 Les renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes :

linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 1.7.

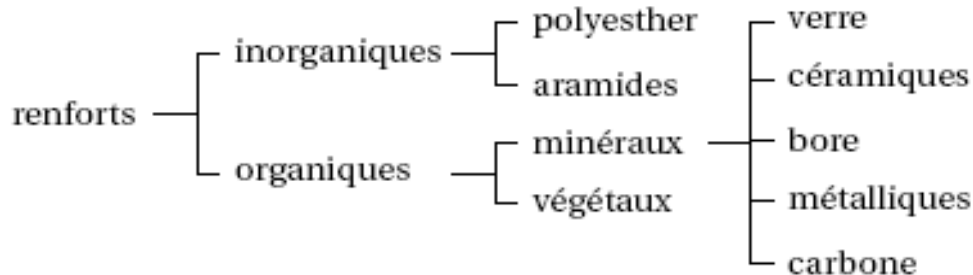


Figure 1.7: Type de renfort (Gornet, 2008).

1.4 Matériau Bois Lamellé Collé

1.4.1 Généralités

Le bois est un matériau traditionnel qui, encore aujourd’hui, est utilisé dans un grand nombre d’applications, principalement dans les maisons individuelles et les maisons jumelées, les crèches, les écoles et d’autres bâtiments de petite et de moyenne taille, mais aussi les gymnases ou encore les entrepôts. Si le bois est toujours autant utilisé, ce n’est pas seulement pour des raisons de tradition mais aussi pour ses propriétés techniques exceptionnelles. Le bois possède des propriétés de résistance exceptionnelles pour un poids relativement faible.

En outre, le bois est un matériau léger et facile à traiter et la sylviculture durable pratiquée en Allemagne permet d’obtenir un bois de qualité, disponible en grandes quantités. Ces dernières décennies, des innovations dans les produits du bois ont permis d’élargir considérablement le champ d’application dans la construction. En ce qui concerne les applications de surface, les matériaux en panneaux comme le contre-plaqué, les panneaux de particules et depuis peu les panneaux OSB (panneaux de grandes particules orientées) s’imposent. En ce qui concerne les applications de construction, le bois lamellé collé se distingue en particulier, tout comme le bois massif de construction, le bois lamellé et, depuis peu, des matériaux en bois homogénéisé (bois d’ingénierie). Les matériaux en bois que nous venons de citer se caractérisent par une stabilité dimensionnelle et par une élasticité et une résistance élevées et calculables. Ces matériaux peuvent donc aussi être utilisés pour construire de très grandes constructions en bois, par exemple des ponts ou des hangars. Au-delà de ces avantages techniques en termes d’ingénierie, les paragraphes suivants vont vous démontrer, à partir de l’exemple du bois lamellé collé, que les

nouveaux matériaux de construction en bois possèdent aussi des propriétés écologiques remarquables et qu'ils peuvent être parfaitement éliminés après leur usage, conformément à la loi [allemande] sur la gestion du recyclage et les déchets de 1996.

1.4.2 Composition du matériau bois lamellé collé

Le bois lamellé collé est constitué de planches de bois aboutées par entures multiples puis collées les unes aux autres. On utilise de préférence des lamelles de bois de pin, mais il est aussi possible d'utiliser d'autres bois de conifères. L'épaisseur de ces lamelles est généralement de 33 ou 42 mm, mais cette épaisseur peut varier de 20 à 45 mm selon les besoins. Les lamelles séchées à une humidité moyenne de 10% sont collées avec de la colle agréée par des entreprises qui doivent posséder un agrément technique de collage, et forment ainsi le bois lamellé collé. Ainsi, plusieurs types de colles sont envisagés :

1.4.2.1 Les colles

Les colles agréées doivent appartenir aux types de liant suivants :

- colle de résine d'urée et colle de résine de mélamine ;
- colle de résine de résorcine phénolique ;
- colle polyuréthane.

Les colles de résine d'urée sont particulièrement bien adaptées aux zones soumises à une faible humidité (température 50° C), par exemple dans les espaces intérieurs. Les autres colles sont également adaptées à des applications en extérieur. Les propriétés technologiques du bois lamellé collé sont régies par la norme DIN 1052. Au-delà de ces exigences générales obligatoires, le bois lamellé collé est un matériau de qualité supérieure qui respecte les conditions du label RAL pour les constructions en bois lamellé collé. Pour certaines applications, le bois lamellé collé doit également respecter les exigences particulières en matière de préservation du bois et de protection contre le feu. Les développements modernes dans le secteur de la construction ont cependant conduit à ce que les exigences soient mises en application, en premier lieu, par des mesures de construction et, en second lieu, par des traitements chimiques. Le traitement du bois lamellé collé et le prétraitement des lamelles avec des substances chimiques protectrices représentent donc aujourd'hui une exception et sont réalisés, si cela est exigé, avec des substances dont la qualification en termes écologiques et sanitaires doit être

démontrée par le fabricant. L'agrément pour ces substances est délivré par le Deutsches Institut für Bautechnik de Berlin , pour le cas de l'Allemagne

La recherche d'innovation dans le bâtiment est permanente, dans le domaine du bois, en 1980 est apparu le lamellé-collé de placages sur chant : le lamibois. Dimensions des panneaux

- Longueur jusqu'à 23 m maximum.
- Hauteurs– standard : 200 – 225 – 260 – 300 – 360 – 450 –600 – 900 mm : toutes largeurs jusqu'à 1800 mm.
- Epaisseurs standard : 27 – 33 – 39 – 45 – 51 – 57 – 63 – 69 – 75 mm (Marutzky, 2002).

1.4.2.2 Les essences couramment utilisée pour la fabrication des BLC.

Le tableau suivant indique pour les essences de bois utilisées en France pour la fabrication de poutre en bois massifs reconstitués, la technique de collage, la classe d'emploi maximum des lamelles pouvant être atteinte avec traitement de préservation adapté, ou sans traitement mais en purgeant l'aubier du bois, et la résistance naturelle de l'essence à l'attaque de Termites :

Tableau I: Essences couramment utilisées pour la fabrication des poutres en BLC (CTBA, 2007).

Essence de bois	collage	Avec traitement	Sans traitement	termites
Châtaignier	Spécial	3	3	moyenne
Chêne	Spécial	4	3	Non
Douglas	courant	3	3	Non
Epicéa	courant	3		Non
Mélèze	courant	3	3	Non
Pin sylvestre	courant	4	3	Non
Pin maritime	courant	4	3	Non
Robinier	Spécial		4	Bonne
Sapin	courant	3		Non
Western Red Cedar	courant	3	3	Non
Doussié, Merbau, Moabi, Padouk	Spécial	4	4	Bonne
Tatajoubá	Spécial	4	4	Moyenne
Iroko	Spécial	3	3	Bonne

1.4.3 Fabrication du bois lamellé collé

Les étapes de fabrication sont les suivantes :

- Réception et tri des bois ;
- Séchage ou stabilisation en humidité ;
- Purge des lamelles ;
- Aboutage si nécessaire et mise à longueur ;
- Rabotage ;
- Encollage des lames ;
- Pression et stabilisation sur banc ;
- Rabotage pour mise à section finale ;
- Finition /préservation.

1.4.4 Mode de collage des lamelles

Lamellé-collé horizontal :

Les plans de collages sont perpendiculaires à la plus grande des dimensions de la section transversale.

Lamellé-collé vertical :

Les plans de collages sont perpendiculaires à la plus petite des dimensions de la même section.



Figure 1.8: Lamellé-collé horizontal (a) et vertical (b) (ABC, 2007).

1.4.5 Quelques formes de BLC

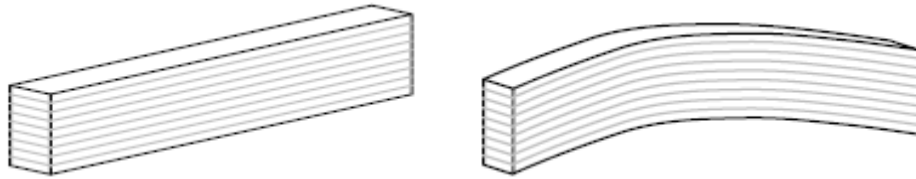


Figure 1.9 : BLC à inertie constante (ABC, 2007).

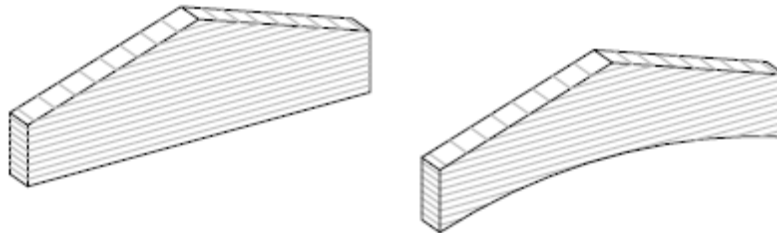


Figure 1.10: BLC à inertie variable (ABC, 2007).

1.5 Caractérisation Mécanique du Bois au Laboratoire

1.5.1 Les dispositifs d'essai : cas de la traction axiale

Un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort. Le résultat est visualisé sur un écran ou une table traçante via un système d'acquisition de données.



Figure 1.11 : Machine d'essais de traction (euro-norme, 10002)

1.5.2 Les dimensions des éprouvettes

Les éprouvettes de traction sont normalisées ($\varnothing = 4\text{mm}$ ou $e=3\text{mm}$...).

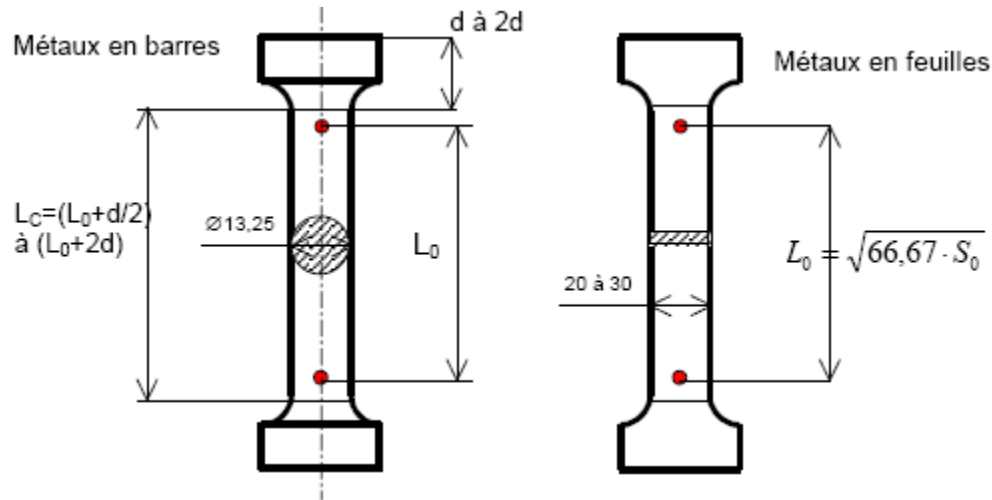


Figure 1.12: Eprouvette de traction la longueur initiale entre repères L_0 est normalisée (euro-norme, 10002)

On note : S_0 : section initiale en mm^2 S_u : section minimale après rupture
 L_0 : longueur initiale entre repères L_u : Longueur ultime après rupture
 L_C : longueur de la partie calibrée

1.5.3 Cas de la flexion statique quatre points

Principe :

La méthode que nous avons adoptée pour mener cette étude consiste à mesurer la déformation dans la zone de contrainte maximum d'un certain nombre d'éprouvettes grâce à des jauges de contrainte résistive. La mise sous contrainte du bois est réalisée à partir d'une presse (0-10 t) travaillant en flexion selon la figure suivante :

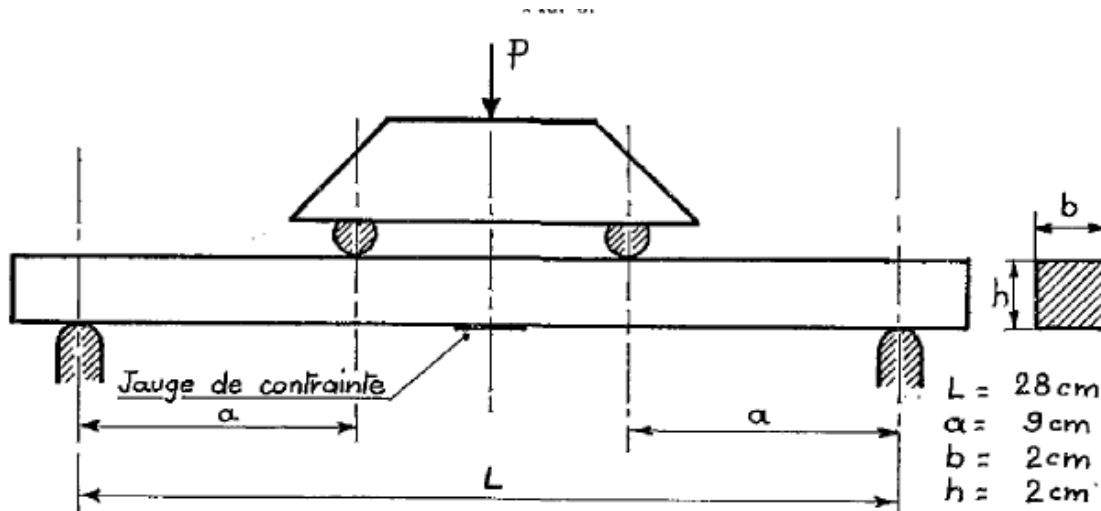


Figure 1.13 : Eprouvette sollicitée en flexion quatre points (Sales, 1977)

1.6 Rhéologie sur le matériau bois lorsqu'il est sollicité en traction, compression parallèle aux fibres

Les équations d' élasticités : elles sont fonction des paramètres comme, la Loi de Hooke et la relation de Young,

Selon Jean-Claude Charmet, à partir de la définition de E et de η , la relation contrainte déformation s'écrit :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \frac{\sigma_1}{E} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\eta & 0 \\ 0 & 0 & -\eta \end{bmatrix}$$

Tout état de contrainte se réduisant à un état triaxial dans ses axes principaux, le principe de superposition permet de le décomposer en trois états de contraintes uni axiaux orthogonaux, de calculer pour chacun la déformation résultante puis de sommer ces trois déformations pour obtenir le tenseur des déformations associées. Cette relation tensorielle, établie dans le repère principal, est intrinsèque. Elle s'écrit dans un repère quelconque sous la forme de l'équation de Young :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} (\text{trace } \sigma_{ij}) \delta_{ij} \quad (1.1)$$

A l'issu de cette spécialité, le domaine de la détermination de la performance mécanique débuté aura des directives notoires. C'est ainsi que les activités liées à ce domaine doivent commencer dans le chapitre 2.

CHAPITRE 2 MATERIELS ET METHODES

Ce chapitre présente un détail d'une part sur l'achat du bois, la réalisation des lamelles à l'atelier de menuiserie, le collage des lamelles et le tronçonnage des éprouvettes. D'autres parts, une dernière partie à savoir : la rhéologie, développe le comportement du bois lorsqu'il est soumis à des contraintes. Les méthodes dont nous allons utiliser ici sont celles de l'Association Française de Normalisation de 1985 (AFNOR, 1985). Les matériels interviendront au fur et mesure dans la rédaction.

2.1 Usinage et Réalisation du Bois Lamellé Collé Panaché, Suivi de leur Acheminement au Laboratoire de Mécanique et de Modélisation des Systèmes Physiques de l'Université de Dschang

Plusieurs étapes importantes sont envisagées, parmi lesquelles :

2.1.1 Approvisionnement en bois

➤ Cas du padouk rouge, de son nom vernaculaire Mbel et de sa dénomination scientifique (*Pterocarpus soyauxii* Taub : Famille des Fabacées) : ce bois est acheté à la scierie située au quartier cinq clous à Ebolowa. D'après les informations récoltées lors de l'achat du bois, ce dernier est exploité à bipindi. Trois pièces de section $3,5 \times 10 \text{ cm}^2$ et 3,5 m de longueur ont été achetées auprès de cette scierie : soit un volume de $0,37 \text{ m}^3$ de padouk qui a généré une dépense de 2000 francs.

➤ Cas du bilinga de son nom vernaculaire Akondoc et de son nom scientifique (*Nauclea diderrichii* Merrill ou *Nauclea gillettii* Merrill ou *Nauclea xanthoxylon* Aubrév : Famille des Rubiacées) : son achat a eu lieu au dépôt du bois de bilon quartier de la ville d'Ebolowa. Nous avons sélectionné un basting de section $23 \times 4,5 \text{ cm}^2$ et de 2,20 m de longueur soit un volume de $0,23 \text{ m}^3$ de bilinga. Une dépense de 2000 francs est générée.

La remarque ici est que pour tout le bois acheté, le débitage appliqué lors du sciage est le débit sur maille ou par quartier. Car, les cernes se voient sous forme de lignes droites sur parement. De plus, ces bois sont du bois parfait (duramen ou encore la partie morte de l'arbre) sans singularité. Le bois acheté, est transporté pour le centre d'apprentissage Ousman Bois Décor Menuiserie Générale.

2.1.2 Usinage du bois en lamelles

Une fois l'arrivée du bois à l'atelier, l'usinage débute par le dégauchissage. Les pièces du bois sont dressées chacune une face et un champ appelé champ et face de référence notés (R_1 et

R₂). Ensuite, les pièces sont portées à la main pour la deuxième machine qui est la raboteuse. A travers son volant, la table est réglée à 4 cm par rapport à l'outil de coupe. La machine est démarrée et le bois est poussé sur la table de celle-ci en passant par son outil de coupe. La deuxième face de chaque pièce du bois est ainsi rabotée. C'est la troisième face de référence notée R₃. L'épaisseur du bois est obtenue à 40 mm. Puis ces dernières pièces sont en fin portées par les ouvriers et amenées à la scie circulaire à table sur laquelle, son guide est réglé à 20 mm de la lame et le bois est passé. Puis les lamelles sont obtenues à une section des 20×40 mm² et 2000 mm de longueur ; cas de la figure 2.1. Toutes les machines utilisées sont illustrées en annexe.

Les pièces usinées passent 24 heures de temps à l'atelier pour libérer au maximum la tension interne. Ensuite, s'ensuit le collage.

2.1.3 Collage des lamelles du bois

D'après la norme française NF EN 302 (NF T 76-152) : Adhésifs pour structures portantes en bois - Méthodes d'essai, la colle utilisée est la colle sader car elle est fabriquée à base de résines synthétiques en dispersion. Celle-ci est achetée à la quincaillerie Franc prix située en face de l'institut technique Don Bosco d'Ebolowa, au prix de 1550 francs la boîte. Sur une face d'une lamelle du bois qui forme la paire, une couche de colle est appliquée uniformément. Puis les lamelles sont posées pièce sur pièce en paire de deux et l'ensemble est serré à l'aide de presse à pompe, serre-joint à visse : l'ensemble est illustré par la figure 2.1.



Figure 2.1 : Bois lamellé panaché (à gauche) et Bois lamellé collé serré (à droite)

Le lamellé collé qui est serré, passe 48 heures de temps sous presse. Après, les serres joints sont enlevés et les paires des lamellés panaché sont obtenues.

2.1.4 Usinage du bois lamellé collé

Cette phase de transformation vise à obtenir une section de $20 \times 20 \text{ mm}^2$. Sur la scie radiale illustrée en annexe, le guide est réglé à 3 cm de la lame de scie. Sur l'interrupteur d'allumage, la machine est démarrée. Pour chaque lamellé collé, une face et un champ sont successivement passés à l'outil de coupe. Puis, le guide est réglé à nouveau à 2 cm de l'outil de coupe, les autres champs et faces restant sont également passés. Les pièces obtenues sont de $20 \times 20 \text{ mm}^2$ de section, 2000 mm de longueur puis s'ensuit le tronçonnage.

2.1.5 Tronçonnage du BLC

Conformément à la norme française (NF B51-007), régissant l'essai de compression axiale, 19 éprouvettes de $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ sont tronçonnées. Ces éprouvettes sont illustrées sur la figure 2.3.

Selon le CIRAD-Forêt, les éprouvettes d'essai de flexion statique quatre points ont chacune un volume de $20 \times 20 \times 340 \text{ mm}^3$. Trente (30) éprouvettes sont envisagées pour deux types de flexion dont l'une est appliquée sur parement des lamelles et l'autre sur champs des lamelles : ces éprouvettes sont représentées sur la figure 2.2.

En accord avec la norme française (NF B51-010), régissant l'essai de traction axiale, les éprouvettes ont une forme complexe dont leurs dimensions sont de $10 \times 40 \times 170 \text{ mm}^3$, et $10 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$ au niveau de la zone de striction. Mais dans le cadre de ce travail, les dimensions utilisées sont de $10 \times 20 \times 170 \text{ mm}^3$ et $5 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$ au niveau de la zone de striction. Après avoir tronçonné ses éprouvettes à la scie circulaire mobile, la scie sauteuse est utilisée pour chantourner les voutes. Ces éprouvettes sont illustrées sur la figure 2.3.

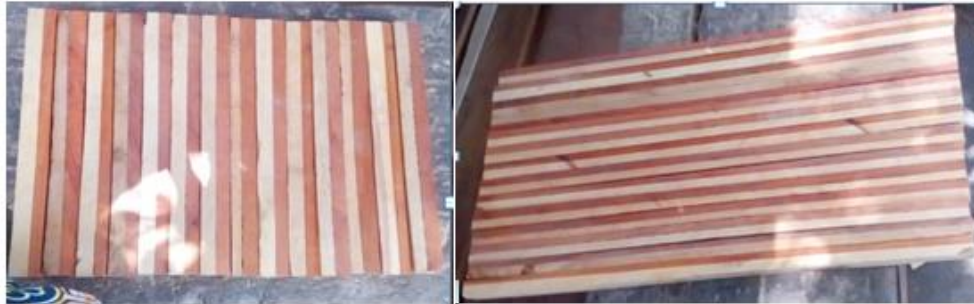


Figure 2.2 : Eprouvettes de flexion statique



Figure 2.3: Eprouvettes de traction axiale (à droite) et Eprouvettes de compression axiale (à gauche)

Après la réalisation de différentes éprouvettes, ces dernières sont emballées dans le plastique puis introduit dans le carton et transportées pour le Laboratoire de Mécanique et de Modélisation des Systèmes Physiques de l'Université de Dschang. Puis, s'ensuivent les différents essais.

2.2 Réalisation des Différents Essais sur les Dispositifs et Collecte des Données.

En prologue, cette partie vise à déterminer la valeur maximale de résistance que peut atteindre le BLCc en *Nauclea diderrichii* et *Pterocarpus soyauxis* lorsqu'il est sollicité pour différentes contraintes qui seront appliquées.

D'emblée, lorsque les éprouvettes sont arrivées au laboratoire, la première phase est la numérotation en chiffre de tous les échantillons grâce à un marqueur de couleur noir. Ensuite intervient le traçage qui concerne uniquement les éprouvettes de flexion. Pour ce traçage, les éprouvettes ont 34 cm de long. 2 cm de part et d'autres de chaque extrémité de l'éprouvette sont mesurés à la règle graduée et pointés à l'aide du stylo habille bleu. Puis s'ensuit le traçage par l'utilisation d'équerre des menuisiers et le même stylo. Deux tracés de 10 cm sont effectués pour les 30 cm restant. Après cette étape, s'ensuivent les différents tests parmi lesquels :

2.2.1 L'essai de flexion statique quatre points

La machine utilisée est la presse hydraulique à cerveau commandé, assistée par une pompe.

Mode opératoire

Sur les deux appuis du banc de flexion, l'éprouvette est placée de façon que la charge soit appliquée perpendiculairement aux fils du bois selon les indicateurs de la figure 3.4 ou $a = 100$ mm, $l = 300$ mm. Et une plaque ayant deux têtes cylindriques de chargement est posée sur la face supérieure de la pièce ; cas de la figure 2.4.

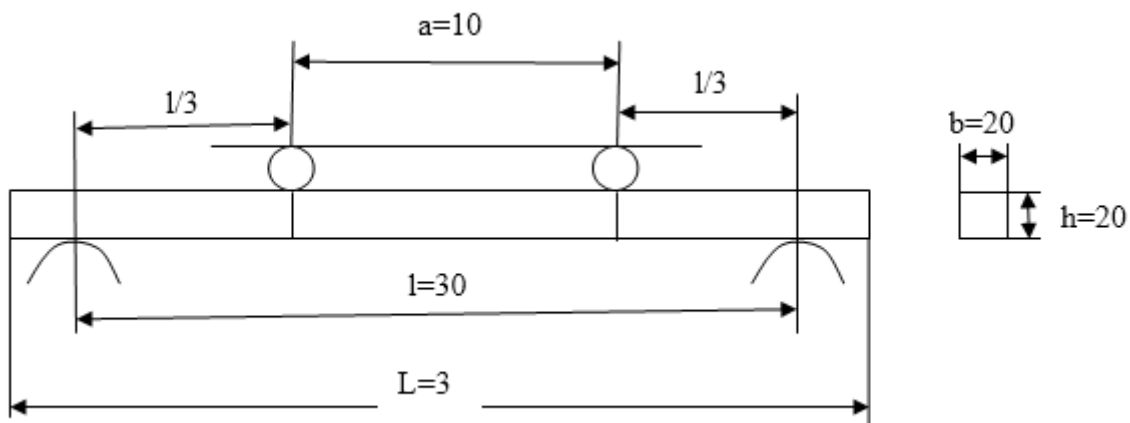


Figure 2.4 : Coupe schématique d'une éprouvette en flexion quatre points

Ensuite, la machine est démarrée par son bouton de démarrage. Grâce au levier de l'appareil, le manipulateur augmente la contrainte de flexion à vitesse constante du déplacement relatif de la traverse par rapport au banc de flexion jusqu'à atteindre la rupture : cas de la figure 2.5.

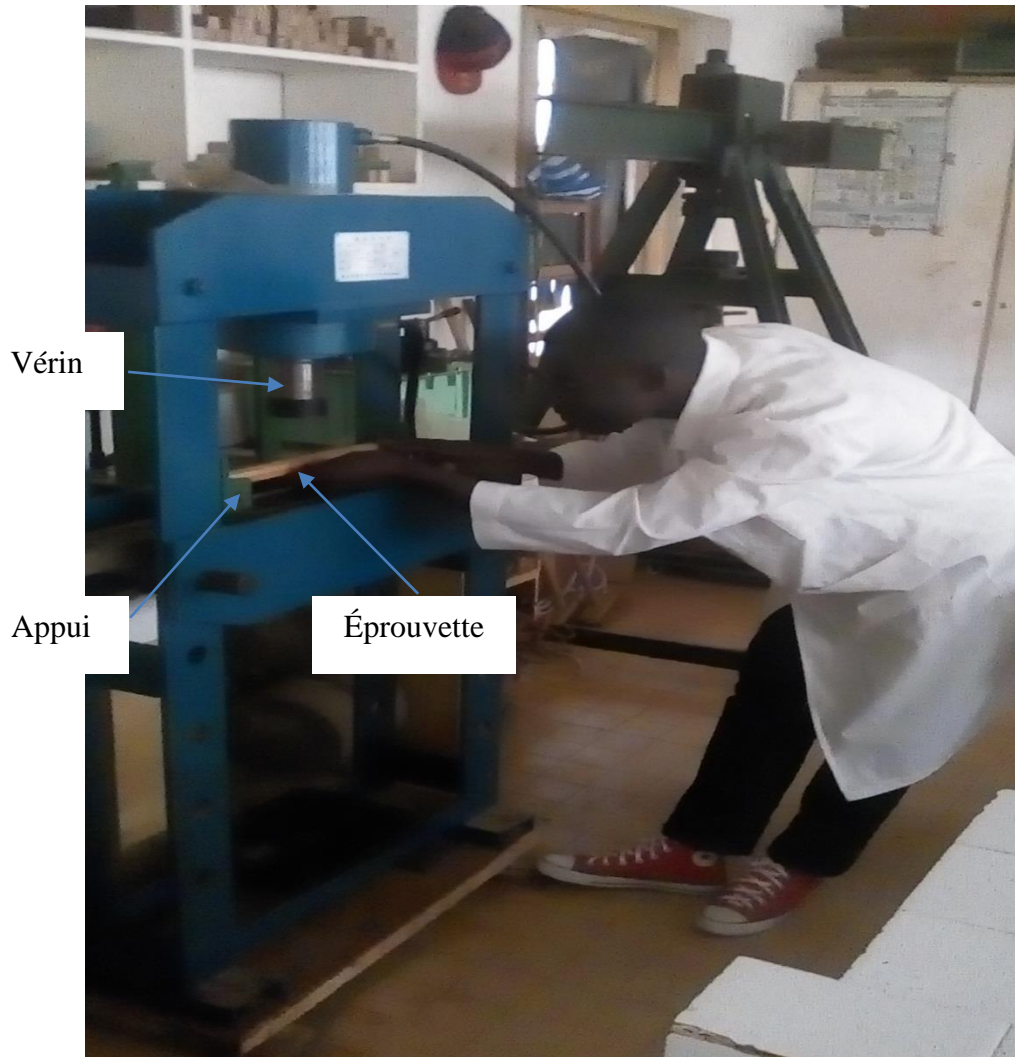


Figure 2.5 : Pose d'Éprouvette de flexion sur la presse hydraulique

Après la rupture, la contrainte lue sur le manomètre est dès lors enregistrée dans le tableau qui se trouve sur la fiche de collecte des données. Après avoir cassé toutes les éprouvettes de flexion et enregistré leurs contraintes, les éprouvettes sont ensuite pesés sur la balance électronique. Leurs masses (masse à l'état humide) sont aussi enregistrées. Puis s'ensuit un autre essai.

2.2.2 Essai de compression axiale

2.2.2.1 Principe

Il s'agit de la détermination de la contrainte de rupture sous un effort de compression, progressivement croissant, exercé parallèlement aux fils d'éprouvettes sans défaut

2.2.2.2 Mode opératoire

L'appareillage reste le même et le banc est remplacé par la plaque. L'éprouvette est placée sur la plaque d'acier, et au centre du dispositif d'application de la charge. Le vérin exerce l'effort de façon continue à la vitesse constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La contrainte maximale de rupture est enregistrée sur la fiche de collecte des données. Le montage expérimental est celui de la figure 2.6.

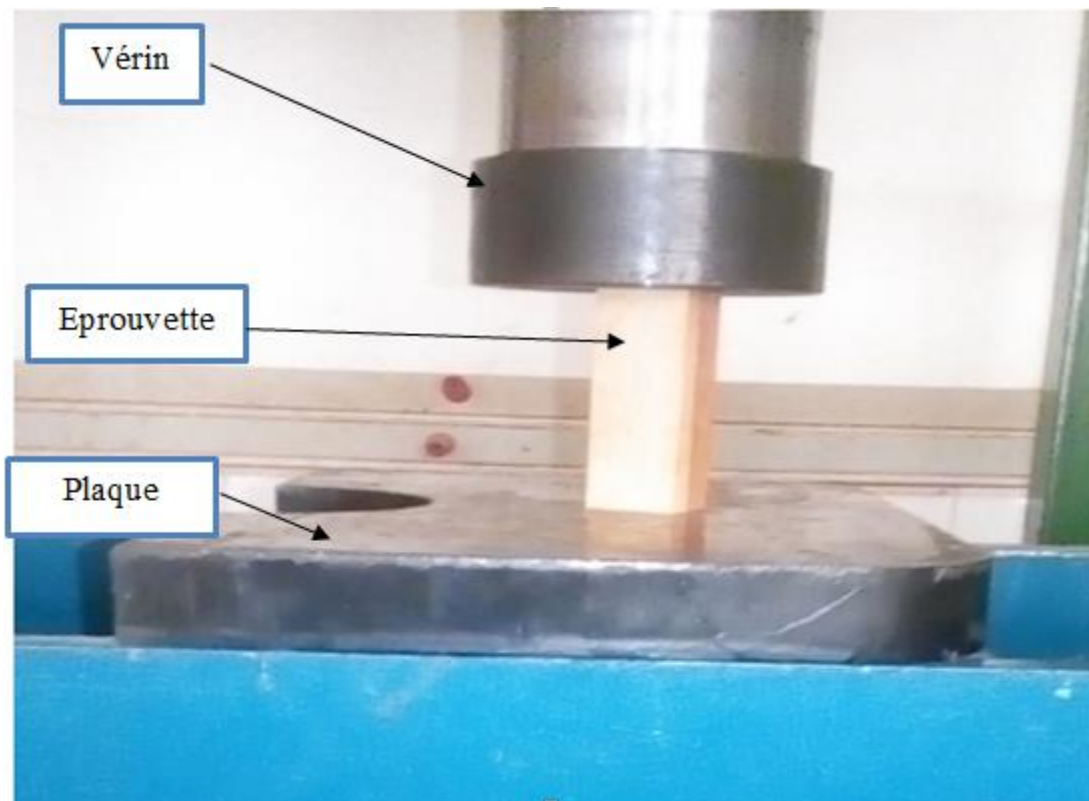


Figure 2.6: Eprouvette sollicitée en compression axiale

La durée de l'essai est comprise entre 1,5 et 2 min. Après avoir cassé toutes les éprouvettes de compression, elles sont pesées, et leurs masses sont également enregistrées. Le dernier essai est dès lors initié.

2.2.3 Essai de traction axiale

2.2.3.1 Principe

Il s'agit de la détermination de la contrainte de rupture sous un effort de traction, progressivement croissant, exercé parallèlement aux fils des éprouvettes sans défaut.

2.2.3.2 Mode opératoire

L'éprouvette est intercalée entre les mores de la machine de traction (extensomètre). Puis les vices des mores sont serrés à l'aide de la clé 23. A l'aide du niveau à vue d'œil, la planéité est vérifiée et le système rotatif du bas est serré. Le plateau qui supporte les masses est accroché à l'échelle numéro 2 du bras de levier. Les masses sont posées progressivement jusqu'au premier bruit émis par l'éprouvette. La charge est évaluée et enregistrée. Puis les charges continuent à être posées jusqu'à la rupture comme indique la figure 2.7.

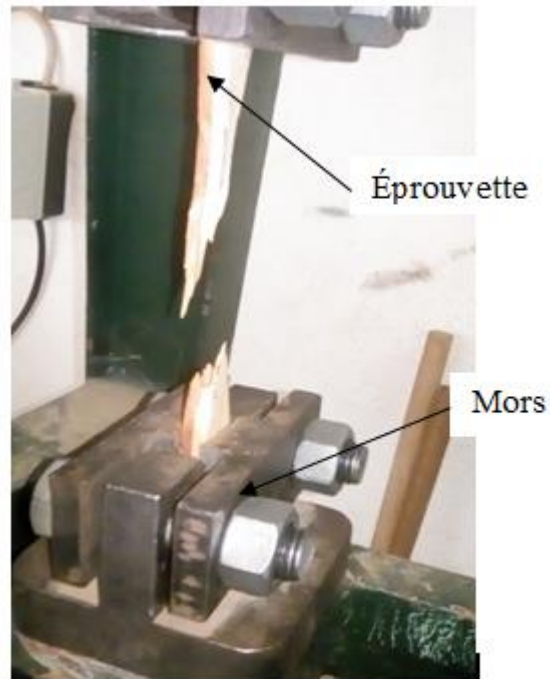


Figure 2.7 : Rupture de l'éprouvette de traction

Ensuite, l'ensemble de charge est donc évalué en kg et converti en newton puis enregistré sur la fiche de collecte des données. Après avoir cassé toutes les éprouvettes, les masses sont pesées et enregistrées également. Le séchage a été effectué lors de nos essais.

2.2.4 Séchage des éprouvettes

2.2.4.1 Principe

C'est l'élimination de l'eau progressivement dans l'éprouvette d'un état à l'humidité H à un état anhydre, par séchage dans une étuve.

2.2.4.2 Mode opératoire

Les éprouvettes sont introduites à l'intérieur de l'étuve. La température est programmée à 50°C , puis 75°C après six heures de temps et à 103°C après six heures de temps également. Les éprouvettes ont passées 48 heures dans l'étuve.

Après le séchage, un fort constat est fait à savoir le non décollage du bois sous l'effet de la haute température élevée à 103°C .

Après les quarante-huit heures, les éprouvettes sont pesées chaque quatre heures et réintroduites dans l'étuve. La pesée est répétée jusqu'à obtenir les masses constantes entre deux pesées successives. Cette pesée est illustrée par la photo de la figure 2.8.



Figure 2.8 : Eprouvette sur balance

Puis les dernières masses sont enregistrées sur la fiche de collecte des données qui se présente sous forme de tableau. Pour les quatre essais effectués, les données sont collectées dans la fiche des collectes des données. Après cette étape de collecte des données, intervient la phase

d'analyse. En guise de souvenance, les données à la contrainte de compression et flexion sont en barre tandis que celles de la contrainte de traction sont en Newton.

2.3 Traitement des Données

Pour amorcer cette phase d'analyse, il s'avère important de commencer par la détermination des contraintes de rupture des différents essais.

2.3.1 Cas de la compression

$$\sigma_1 = \frac{F}{S_1}$$
$$\Rightarrow F = \sigma_1 \times S_1 \quad (2.1)$$

Où :

F : est la force de rupture ;

σ_1 : est la pression d'huile en barre indiquée par le manomètre ;

F : est la force de rupture en N ;

S_1 : est la surface de la colonne d'air dans le piston de la presse en mm^2 ; elle est définie par :

$$S_1 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.2)$$

Avec $D = 140 \text{ mm}$

Pour trouver donc la contrainte de rupture, la formule suivante va être appliquée :

$$\sigma_c = \frac{F}{S_2} = \frac{\sigma_1 \times S_1}{S_2} \quad (2.3)$$

Où :

σ_c : est la contrainte de rupture en MP_a

S_2 : est la section de l'éprouvette en mm^2

F : force de rupture (Norme française régissant la compression).

2.3.2 Cas de la flexion

$$\sigma_{FH} = \frac{3P(l - a)}{2bh^2} \quad (2.4)$$

Où :

σ_{FH} : est la contrainte de rupture en MPa

P : est la charge totale appliquée à la rupture de flexion en newton (N). Avec $P = \sigma_1 \times S_1$

l : est la distance mesurée en mètre entre les axes des appuis cylindriques ;

a : est la distance mesurée en mètre entre les axes des têtes de chargement ;

h : est la hauteur mesurée en mètre de l'éprouvette ;

b : est la largeur mesurée en mètre de l'éprouvette (Norme française régissant la flexion)

2.3.3 Cas de la traction

$$\sigma_T = \frac{P}{S} \quad (2.5)$$

Où

P : est la charge totale appliquée à la rupture de traction en newton

S : est la section de l'éprouvette en m^2 .

La conversion des unités suivante sera utilisée : $1Kg = 10N$. Ceci pour passer de Kilogramme en Newton.

2.4 Détermination de l'Humidité des Eprouvettes

Il s'agit ici de l'humidité du bois au moment de l'essai. Elle est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$H = \frac{m_H - m_o}{m_o} \times 100 \quad (2.5)$$

Où :

m_H est la masse en gramme de l'éprouvette avant dessiccation.

m_o est la masse en gramme de l'éprouvette à l'état anhydre.

L'humidité de chaque lot d'éprouvette (compression, flexion sur face et sur champ, traction) est égale à la moyenne arithmétique arrondi à 0,1% près des résultats obtenus sur chaque éprouvette.

2.5 Vérification du Choix du Nombre d'Eprouvette

Pour cette vérification, la formule suivante sera utilisée :

$$n' = \left(\frac{z_{\alpha/2} \times \sigma_n}{E \times \bar{x}} \right)^2 \quad (2.6)$$

n' : est le nombre d'éprouvettes à déterminer ;

\bar{x} : est la moyenne des moyennes (contrainte et humidité) ;

E : est l'erreur estimée à 5% ;

$z_{\alpha/2}$: est l'intervalle de confiance ;

σ_n : est l'écart type de la série. Il est défini par ;

$$\sigma_n = \sqrt{v} \quad (2.7)$$

v : est la variance sur la pièce ; elle est définie par ;

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2.8)$$

Ou :

x_i : est la contrainte de rupture de l'éprouvette i ;

\bar{x} : est la moyenne des contraintes des toutes les éprouvettes d'une même série testée.

2.6 Analyse Rhéologique du Matériau Bois

2.6.1 Comportement des éprouvettes lors des essais

Pour les trois sollicitations, la compression et la traction se comportent de la même manière à la seule différence que les déformations sont divergentes : raison pour laquelle un seul cas sera étudié. Alors que les éprouvettes de flexion se comportent plutôt autrement.

2.6.1.1 Cas des éprouvettes de traction / compression

En traction, l'éprouvette sollicitée se présente comme indique la figure suivante :

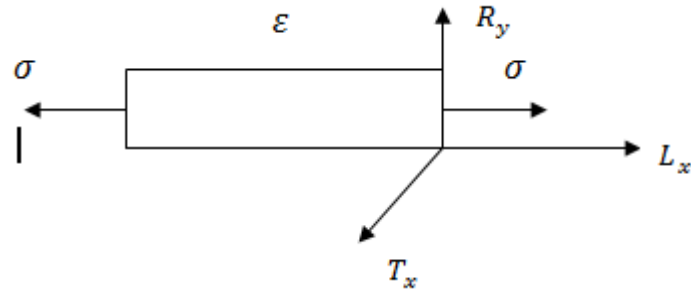


Figure 2.9: Eprouvette sollicitée en traction

Ou :

σ est la contrainte appliquée progressivement.

ε est la déformation dans les trois axes.

L_x, T_x, R_y Sont les axes de déformation suivis par l'éprouvette.

Selon eurocode 8, le bois est un matériau peu ductile. La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. La courbe de traction est donc constituée de trois parties qui caractérisent les étapes du comportement du matériau. La première partie est le domaine de la déformation élastique réversible. La deuxième est le domaine de la déformation plastique homogène et la troisième est le domaine de la déformation plastique inhomogène ou zone de striction.

➤ **Le domaine de la déformation élastique réversible**

Dans ce domaine de déformation, le matériau est soumis à la loi de Hooke à savoir :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.9)$$

Cette loi généralisée, est la suivante :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} (\text{trace } \sigma_{ij}) \delta_{ij} \quad (2.10)$$

$$\text{avec } \delta_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{pmatrix}$$

Où ε_{ij} et σ_{ij} sont des matrices 3×3 . E est le module d'élasticité et ν le coefficient de poisson. δ_{ij} est l'échelle du repère. ε_{ij} est le tenseur des déformations et σ_{ij} est le tenseur des contraintes. Les deux tenseurs sont symétriques et s'écrivent de la manière suivante :

$$\varepsilon_{ij} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} ; \quad \sigma_{ij} \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \text{ avec } \begin{cases} \text{trace} \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \\ \text{trace} \sigma_{ij} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \end{cases}$$

En remplaçant chaque déformation par sa contrainte et $\delta_{ij} = 1$ dans la formule (2.1), les expressions suivantes sont obtenues :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\sigma_{11}}{E} \\ \varepsilon_{22} &= -\frac{\nu}{E} \\ \varepsilon_{33} &= -\frac{\nu}{E} \end{aligned}$$

D'après ses trois résultats précédents, il en découle que la déformation est positive dans le sens de la longueur et se traduit par une augmentation de cette longueur. Les deux autres résultats négatifs montrent que pour les deux autres directions, la section diminue plutôt.

σ est la contrainte qui engendre une déformation relative. La déformation $\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$. La valeur absolue de la déformation reste faible de l'ordre de quelque dixième de pourcent à la fin de ce domaine. A partir d'une certaine contrainte, le matériau rentre dans un autre domaine à savoir.

➤ **domaine de la déformation plastique homogène**

Dans ce domaine, la valeur de la pente $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$ appelée tour de consolidation est bien inférieure à celle du module d'YOUNG du matériau et tend progressivement vers zéro au maximum de la courbe de traction. Dans ce domaine de la déformation plastique, la déformation est irréversible. Si la contrainte est supprimée, le matériau manifeste un certain retour élastique $A_p = \Delta L/L_0$ dans ce domaine, la déformation plastique est dite homogène car affecte l'ensemble de l'éprouvette qui a diminué de section. La section reste toute la même tout le long de l'éprouvette de traction. Une fois que le maximum de courbe de traction a été atteint, le constat fait est que la déformation se poursuit mais quelle se localise dans une région de l'éprouvette à savoir :

➤ **le domaine de la déformation plastique inhomogène**

Dans ce domaine de la déformation plastique inhomogène où zone de striction, la consolidation du matériau ne peut plus compenser l'augmentation de contrainte maximale. Il y'a stabilité et striction progressive.

Tous ses trois domaines évoqués se résument sur la courbe suivante :

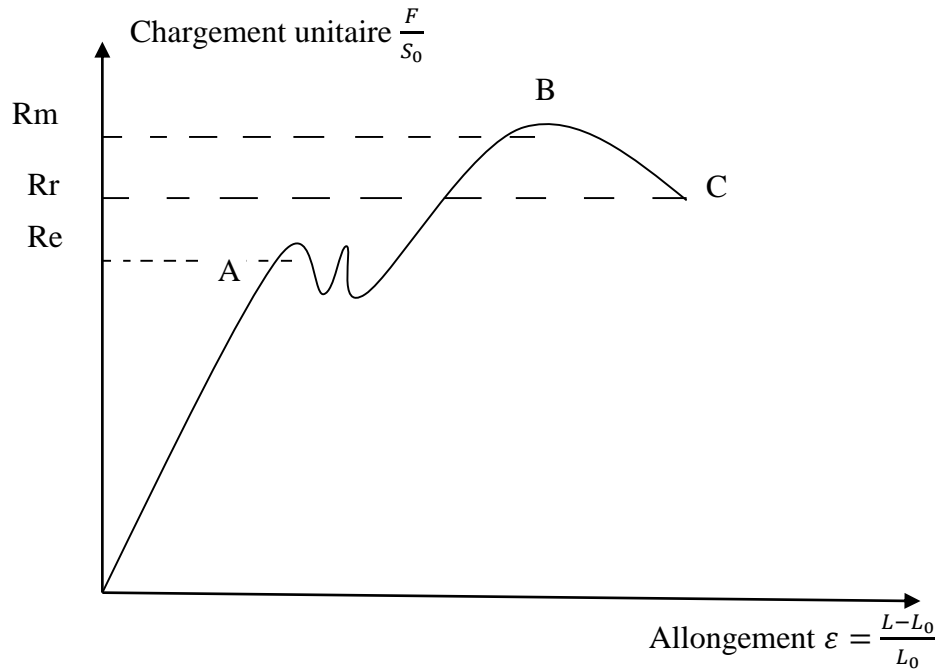


Figure 2.10: Diagramme charge-allongement d'une éprouvette en traction (Michel, J et al, 2004).

. Définitions :

Sur le diagramme charge-allongement, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes :

- en abscisse, l'allongement relatif $\Delta L/L_0$ de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure L_0 (L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette) ;

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.10)$$

- en ordonnée : la charge unitaire, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette S_0

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2.11)$$

Le point A est la limite d'élasticité (ou résistance élastique à la traction) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (2.12)$$

Le point B correspond à la charge maximale ; il est appelé résistance à la traction ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) ;

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (2.13)$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au-delà du point B. Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non-conformité géométrique. Le point C correspondant, lui-même, à la charge ultime.

Pour conclure cette partie, la traction et la compression se comportent de la même manière dont la seule différence se trouve au niveau de la déformation. Car en traction, la déformation est positive alors qu'elle est négative en compression; cas des schémas suivants :



Figure 2.11: Epruvettes sollicitées en traction (1) et en compression (2)

En traction, $\varepsilon > 0$ tandis qu'en compression, $\varepsilon < 0$

Comme le matériau caractérisé est un BLCc, le paragraphe suivant donne les expressions sur les différents constituants de ce dernier.

2.6.2 Les matériaux composites

Un matériau composite est tout alliage ou matériau comportant un renfort généralement filamenteux et une matrice. Dans le cadre ce travail, le renfort est le bois (bilinga et padouk) et la matrice assurant la liaison entre ses deux essences est la colle sader. Il est aussi important de signaler que le bois lui-même est un matériau composite naturel. Le composite fabriqué est un composite à fibre (bois). Pour les deux types qui se présentent à savoir : les composites unidirectionnels et les composites multidirectionnels, seuls les composites unidirectionnels (les fibres sont orientées suivant la même direction) sont utilisés.

Notation d'un composite :

Fibre: bois (b) b en indice, Matrice: colle (c) c en indice, Fraction volumique (f).

2.6.2.1 Expression de la fraction volumique du composite

Si V est le volume total du composite, V_b volume de la fibre et V_c volume de la matrice.

La fraction volumique F_b est donnée par :

$$F_b = \frac{V_b}{V} = \frac{V_b}{V_b + V_c} \quad (2.14)$$

$$F_c = \frac{V_c}{V} = \frac{V_c}{V_b + V_c}$$

$$F_b + F_c = 1 \Rightarrow F_c = 1 - F_b \quad (2.15)$$

Surface de la section : soit S la surface du composite :

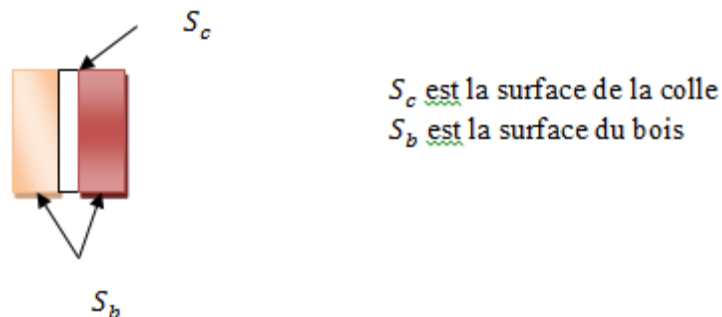


Figure 2.12: Composite bois et colle.

$$V = SL \quad (2.16)$$

$$V_b = S_b \times L$$

$$V_c = S_c \times L$$

$$F_f = \frac{V_f}{V} = \frac{S_b L}{SL}$$

2.6.2.2 Expression de la masse volumique du composite

Soit m_t : la masse du composite, m_b : la masse du bois et m_c : la masse de la colle. Avec les masses volumiques ρ_t, ρ_b, ρ_c

$$m_t = \rho_t V_t = m_b + m_c = \rho_b V_b + \rho_c V_c$$

$$\Rightarrow \rho_t = \frac{\rho_b V_b}{V_t} + \frac{\rho_c V_c}{V_t} = F_b \rho_b + F_c \rho_c$$

$$\rho_t = F_b \rho_b + (1 - F_b) \rho_c \quad (2.17)$$

2.6.2.3 Composite sollicité en résistance parallèle aux fibres



Figure 2.13: Composite sollicité en traction

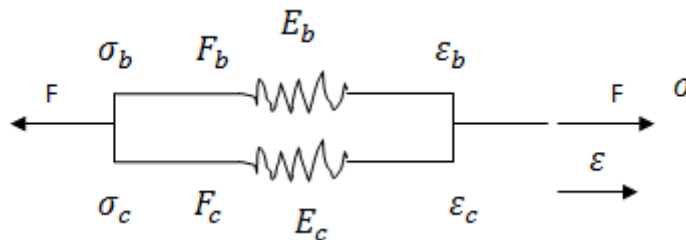


Figure 2.14: Module d'élasticité du composite monté en parallèle

S est la surface du composite, E_c est le module d'élasticité de la colle, E_b est le module d'élasticité du bois, F_b est la force du bois et F_c la force de la colle.

$$S = S_b + S_c \quad (2.18)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_c$$

$$F = F_b + F_c$$

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_c$$

$$E = E_b + E_c$$

2.6.2.4 Expression de la Contrainte du composite

$$\sigma_b = E_b \varepsilon \text{ et } \sigma_c = E_c \varepsilon \quad (2.19)$$

Force subie :

$$F_b = S_b \sigma_b \text{ et } F_c = S_c \sigma_c$$

$$F = F_b + F_c = \sigma_b F_b S + \sigma_c F_c S$$

$$\Rightarrow F = S(F_b \sigma_b + F_c \sigma_c)$$

$$\text{Or } F = \sigma S = S(F_b \sigma_b + F_c \sigma_c)$$

$$\Rightarrow \sigma = F_b \sigma_b + F_c \sigma_c$$

$$\sigma = F_b \sigma_b + (1 - F_b) \sigma_c \quad (2.20)$$

La contrainte σ est donc homogénéisée sur le composite tel que :

$$\sigma = \frac{F}{S} = F_b \sigma_b + F_c \sigma_c$$

$$\text{Or: } \begin{cases} \sigma_b = E_b \varepsilon \\ \sigma_c = E_c \varepsilon \end{cases}$$

$$\Rightarrow \sigma = F_b \sigma_b \varepsilon + F_c \sigma_c \varepsilon$$

$$\Rightarrow \sigma = E_t \varepsilon = (F_b E_b + F_c E_c) \varepsilon$$

$$\Rightarrow E_t = F_b E_b + F_c E_c$$

Le module de Young longitudinal s'en déduit et on a :

$$E_t = F_b E_b + F_c E_c$$

$$E_t = F_b E_b + (1 - F_b) E_c \quad (2.21)$$

C'est la loi des mélanges : cette loi est vérifiée pour la résistance du composite.

Condition de résistance du bois :

$$\sigma_b < R_{eb} \text{ avec } \sigma_b = E_b \varepsilon$$

$$\Rightarrow \sigma_b = \frac{E_b}{E_t} \sigma_t$$

Condition de résistance de la colle :

$$\sigma_c < Rec \text{ avec } \sigma_c = E_b \varepsilon$$

$$\Rightarrow \sigma_b = \frac{E_b}{E_t} \sigma_t$$

En générale, $E_b > E \gg E_c \Rightarrow \sigma_b > \sigma_t \gg \sigma_c$

A la sortie de cette partie d'analyse, les données collectées lors des activités menées, sont analysées d'après les méthodes de traitement adoptées. C'est ainsi que la quintessence de ce traitement donne lieu au chapitre 3.

CHAPITRE 3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Présentation des Résultats

Les méthodes qui nous ont permis de trouver les résultats sont celles de l'Association Française de Normalisation de 1985. La présentation des résultats débute par le constat fait lors des essais. Car, à la sortie de ces expériences au laboratoire, le constat fait sur les éprouvettes de flexion est que : le padouk (*Pterocarpus soyausii*) est moins cassant par rapport au bilinga (*Nauclea diderrichii*) qui est plus cassant. Pour un ouvrage ou l'association entre ces deux bois est incontournable, il est conseillé de recouvrir de préférence le bilinga avec le padouk pour limiter le caractère cassant du bilinga.

Après l'application des formules (2.1) à (2.8) aux valeurs obtenues sur les éprouvettes testées, la première partie des résultats est obtenue dans les tableaux suivants.

Tableau II : Premiers résultats de flexion statique quatre points testé sur face des lamelles.

N°	cf (br)	mH (g)	mo (g)	σ_F (Mpa)	variance	écartype	H%
1	2	117,45	103,64	115,395	19,56713	5,25	13,32497
2	1,9	94,44	82,13	109,6253	1,812456		14,98843
3	2	104,14	90,87	115,395	19,56713		14,60328
4	1,9	94,25	81,73	109,6253	1,812456		15,31873
5	1,8	89,21	78,07	103,8555	50,63781		14,26925
6	1,8	91,58	79,62	103,8555	50,63781		15,02135
7	2	102,02	88,6	115,395	19,56713		15,14673
8	2	102,52	88,83	115,395	19,56713		15,41146
9	2,1	105,43	91,94	121,1648	103,9018		14,67261
10	1,9	102,3	89,37	109,6253	1,812456		14,46794
11	2	102,01	98,43	115,395	19,56713		3,637103
12	1,9	101,66	88,5	109,6253	1,812456		14,87006
13	1,75	104,99	91,91	100,9706	100,018		14,23131
14	1,9	96,43	83,56	109,6253	1,812456		15,40211
15	1,9	99,52	87,24	109,6253	1,812456		14,07611
moyenne				110,9715	27,59372		13,96

Ce tableau II est constitué de huit colonnes dont la première contient le numéro et nombre d'éprouvette testé, la deuxième contient les contraintes de flexion enregistrée pendant l'essai pour toutes les éprouvettes de flexion testées sur face des lamelles. La troisième renferme la

masse en gramme des éprouvettes à l'état humide, la quatrième montre la masse en gramme des éprouvettes à l'état anhydre. La cinquième montre la contrainte de rupture des éprouvettes après analyse des résultats. La sixième colonne montre la variance de cette série statistique calculée sur les éprouvettes de flexion statique quatre points testées sur face des lamelles. La septième montre l'écart type de cette série qui est de **5,25**. La huitième montre l'humidité des éprouvettes au moment des essais. La dix-septième ligne de ce tableau présente la moyenne des : contraintes après traitement sur toutes les éprouvettes, qui est de **110,97 Mpa**, des variances de cette série qui est de **27,59**. Des humidités H% qui est de **13,96%**. D'après ce tableau, la courbe illustrant la fréquence des contraintes est tracée suivant quatre intervalles. Elle est la suivante :

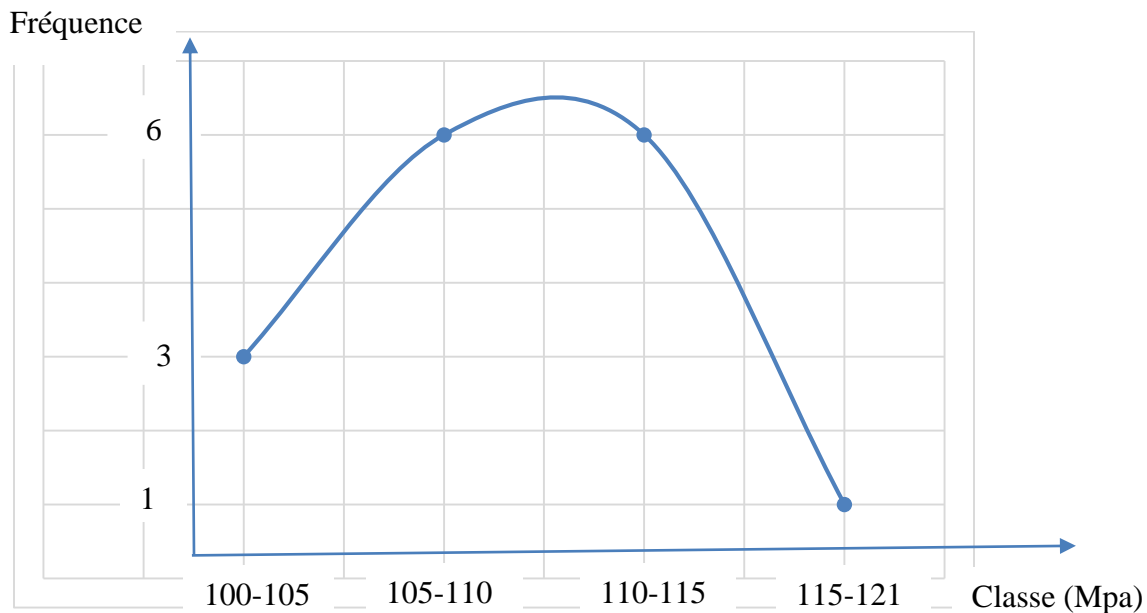


Figure 3.1 : Courbe de fréquence de la contrainte de flexion des éprouvettes testées sur parement

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 106-116 pour une fréquence probable de 12

**Tableau III : Premiers résultats des éprouvettes de flexion statique quatre points
testées sur champ des lamelles.**

Nº	cf (br)	mH (g)	Mo (g)	σ_F (Mpa)	variance	ecartype	H%
1	2	93,46	82,01	115,395	0,036989	10,97	13,96171
2	1,75	91,58	80,08	100,9706	202,5512		14,36064
3	2,4	102,01	88,87	138,474	541,5546		14,78564
4	2	108,37	95,11	115,395	0,036989		13,94175
5	1,9	88,91	77,93	109,6253	31,10767		14,08957
6	2	97,2	85,22	115,395	0,036989		14,05773
7	2,1	95,24	83,19	121,1648	35,54634		14,48491
8	2	93	80,89	115,395	0,036989		14,97095
9	2	99,87	87,22	115,395	0,036989		14,50355
10	1,5	89,58	78,06	86,54625	821,1907		14,75788
11	2,2	104,68	91,24	126,9345	137,6357		14,73038
12	2	96,7	84,79	115,395	0,036989		14,04647
13	2	109,98	96,63	115,395	0,036989		13,81559
14	2	90,96	78,77	115,395	0,036989		15,47543
15	2,1	106,8	93,86	121,1648	35,54634		13,78649
moyenne				115,2027	120,361899		14,38

Ce tableau III est tracé de la même façon comme le précédent à la seule différence au niveau de la moyenne. Car, la moyenne des contraintes de rupture après traitement est de $\sigma_F = 115,2 \text{ Mpa}$, celle des variances de cette série statistique est **120,4** et l'écartype est de **10,97**. La moyenne des humidités est de **14,4%**. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant quatre intervalles. Elle est la suivante.

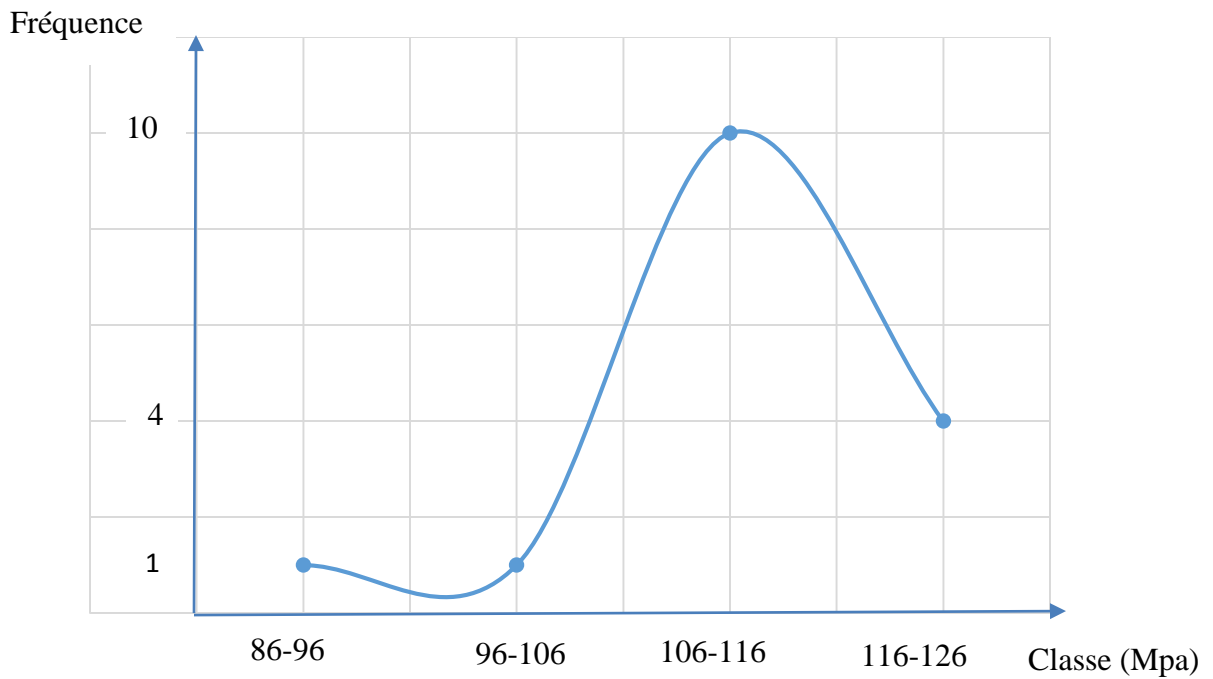


Figure 3.2 : Courbe de fréquence de la contrainte de flexion des éprouvettes testées sur champs des lamelles

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 106-116 pour une fréquence probable de 10

Tableau IV : Premiers résultats des éprouvettes de compression axiale

Nº	σ_c (br)	mH (g)	Mo (g)	σ_C (Mpa)	variance	ecartype	H%
1	28	18,67	17,84	107,702	509,2304	9,5	4,652466
2	20	19,92	17,42	76,93	67,33625		14,35132
3	20	20,89	18,33	76,93	67,33625		13,96618
4	22	19,88	17,36	84,623	0,263032		14,51613
5	23	20,82	18,2	88,4695	11,11311		14,3956
6	21	18,37	16,03	80,7765	19,00408		14,59763
7	22	21,3	18,65	84,623	0,263032		14,20912
8	22	21,19	18,54	84,623	0,263032		14,29342
9	20	20,45	17,74	76,93	67,33625		15,27621
10	22	18,48	16,22	84,623	0,263032		13,93342
11	20	16,82	14,76	76,93	67,33625		13,95664
12	28	19,2	18,25	107,702	509,2304		5,205479
13	21	19,96	17,44	80,7765	19,00408		14,44954
14	21	18,34	16,01	80,7765	19,00408		14,5534
15	22	21,07	18,45	84,623	0,263032		14,20054
16	21	17,77	15,55	80,7765	19,00408		14,27653
17	20	18,7	16,34	76,93	67,33625		14,44308
18	18	17,89	15,67	69,237	252,774		14,1672
19	21	19,04	16,64	80,7765	19,00408		14,42308
moyenne				85,13587	90,2823478		13,10

Le tableau IV résultant l'essai de compression présente également en première colonne le numéro des éprouvettes ainsi que leur nombre, la contrainte de compression pendant l'essai, la masse des éprouvettes à l'état saturé, la masse des éprouvettes à l'état anhydre, la contrainte de rupture après la première phase du traitement qui a une moyenne de **85,14 Mpa**, la variance de cette série qui a aussi une moyenne de **90,3**. Puis l'écart type qui est de **9,5**. Dans la dernière colonne, se trouve les humidités des éprouvettes lors de l'essai, pour lesquelles la moyenne est de **13,1%**. Puis, pour finir cette série de la première partie des résultats. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant quatre intervalles. Elle est la suivante

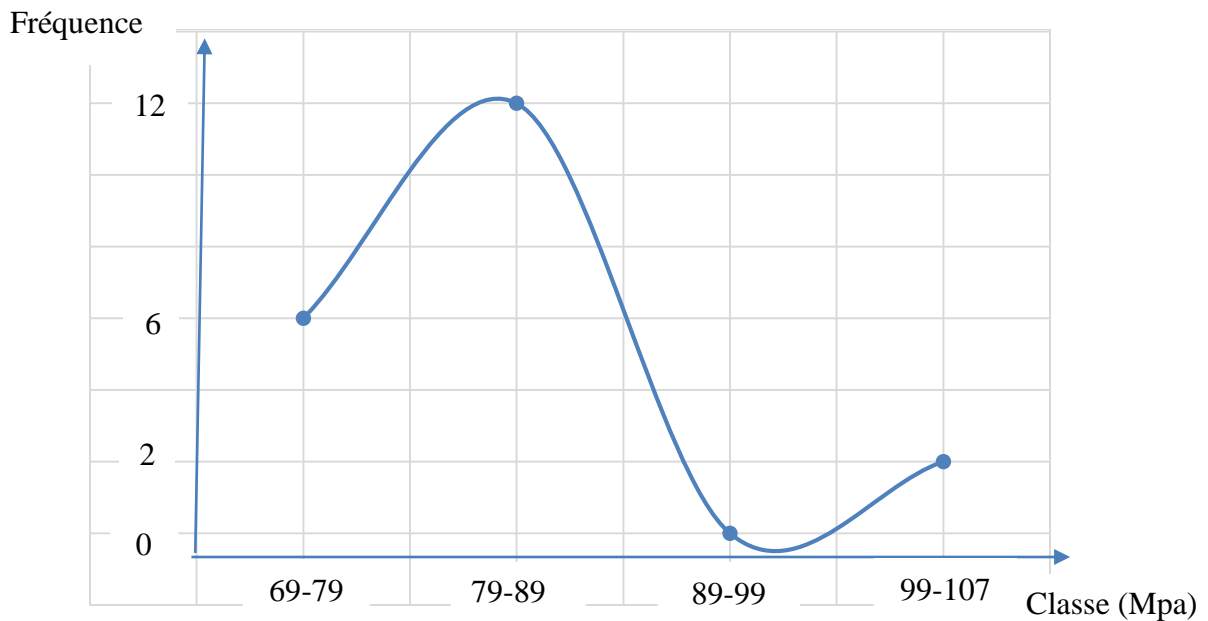


Figure 3.3 : Courbe de fréquence de la contrainte des éprouvettes de compression

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 79-89 pour une fréquence probable de 12

Tableau V: Premiers Résultats intermédiaires des éprouvettes de traction axiale

Nº	ct int (N)	mH (g)	Mo (g)	σT int (Mpa)	variance	ecartype	H%
1	1230	21,31	18,96	24,6	23,4256	3,5	12,39451
2	790	21,25	18,7	15,8	15,6816		13,63636
3	900	21,89	19,42	18	3,0976		12,71885
4	900	20,77	18,26	18	3,0976		13,74589
5	1060	22,38	19,69	21,2	2,0736		13,66176
6	790	21,63	19,02	15,8	15,6816		13,7224
7	1070	22,03	19,36	21,4	2,6896		13,79132
8	850	21,98	18,48	17	7,6176		18,93939
9	1070	22,27	19,69	21,4	2,6896		13,1031
10	1150	20,64	19,55	23	10,4976		5,575448
11	1280	23,39	20,59	25,6	34,1056		13,59883
12	960	22,11	19,41	19,2	0,3136		13,91036
13	900	20,34	17,92	18	3,0976		13,50446
14	1030	20,18	17,79	20,6	0,7056		13,43451
15	840	23,28	20,48	16,8	8,7616		13,67188
moyenne				19,76	12,13964		13,29

D'après ce tableau V, le numéro (N°) est réservé aux éprouvettes testées. La contrainte intermédiaire notée σT_{int} est la contrainte enregistrée après avoir compris le premier bruit émis par l'éprouvette lors d'essai. mH est la masse de l'éprouvette à l'état humide tandis que m_o est la masse de l'éprouvette à l'état anhydre. La contrainte intermédiaire notée σT_{int} obtenue après analyse, a une moyenne de **19,76 Mpa**. La variance calculée est de **12,14** avec un écart type de **3,5**. La moyenne des humidités au moment des essais est **13,3%**. Cette contrainte intermédiaire va nous servir dans l'étude rhéologique. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant quatre intervalles. Elle est la suivante

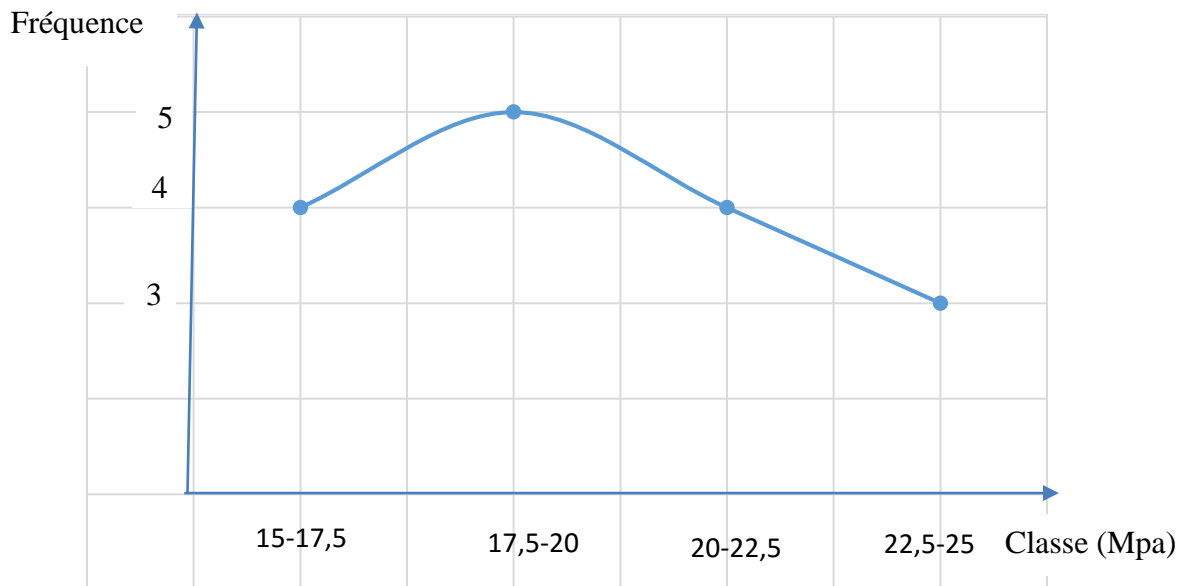


Figure 3.4 : Courbe de fréquence de la contrainte des éprouvettes de traction intermédiaire

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 17,5-20 pour une fréquence probable de 5

Tableau VI : Premiers Résultats des éprouvettes de traction axiale

Nº	ct (N)	mH (g)	Mo (g)	σ_T (Mpa)	variance	ecartype	H%
1	1590	21,31	18,96	31,8	49,5616	4,71	12,39451
2	1040	21,25	18,7	20,8	15,6816		13,63636
3	940	21,89	19,42	18,8	35,5216		12,71885
4	1160	20,77	18,26	23,2	2,4336		13,74589
5	1370	22,38	19,69	27,4	6,9696		13,66176
6	1050	21,63	19,02	21	14,1376		13,7224
7	1390	22,03	19,36	27,8	9,2416		13,79132
8	890	21,98	18,48	17,8	48,4416		18,93939
9	1390	22,27	19,69	27,8	9,2416		13,1031
10	1490	20,64	19,55	29,8	25,4016		5,575448
11	1650	23,39	20,59	33	67,8976		13,59883
12	1240	22,11	19,41	24,8	0,0016		13,91036
13	940	20,34	17,92	18,8	35,5216		13,50446
14	1340	20,18	17,79	26,8	4,1616		13,43451
15	1090	23,28	20,48	21,8	8,7616		13,67188
moyenne				24,76	22,1984		13,29

Dans le tableau VI, les valeurs des masses humide et anhydre sont les même ainsi que l'humidité des éprouvettes au moment des essais. La différence se situe au niveau des contraintes. Car, la contrainte de rupture ici notée σ_T a une moyenne de **24,76 Mpa**. Avec une variance dont la moyenne est de **22,2** et un écart type de **4,71**. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant quatre intervalles. Elle est la suivante.

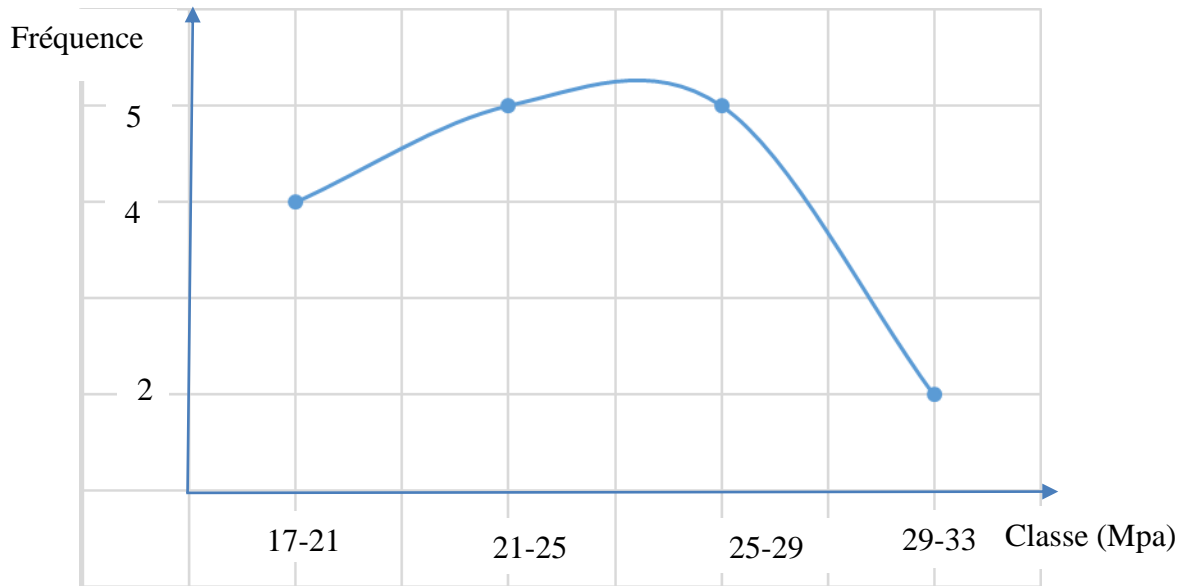


Figure 3.5 : Courbe de fréquence de la contrainte de traction axiale

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 21-25 pour une fréquence probable de 5

Après l'obtention de ses premières valeurs, une interrogation s'est posée sur le choix du nombre d'éprouvette à savoir : pourquoi choisir quinze éprouvettes au lieu de cinq ou trente ? La réponse à cette préoccupation découle de l'application numérique des formules (2.7) et (2.8) développées dans le chapitre 2. L'application des celles-ci aux éprouvettes de flexion statique quatre points testées sur face des lamelles donne les résultats suivants :

$n=15$; $\bar{x}=62,46$; $z_{\alpha/2}=2$ pour une erreur estimée à 5% ; $\sigma_n=5,25$

Application de la formule (2.6)

$$n' = \left(\frac{z_{\alpha/2} \times \sigma_n}{E \times \bar{x}} \right)^2 \quad (2,6)$$

$$\Rightarrow n' = \left(\frac{2 \times 5,25}{0,05 \times 62,46} \right)^2 = 11,30 \approx 11$$

3.1.1 Choix du nombre d'échantillon

$n' = 11$ Éprouvettes. Après cette analyse justificative, le nombre exact d'éprouvette pour cette expérience est de **11**. Ceci part dans le même sens que les travaux menés par Sales (1977). Qui, a réalisé 14 essais en utilisant chacun 10 éprouvettes avec un total de 140 valeurs. Dans le cadre de

ce travail, les 11 éprouvettes qui se sont bien comportées pour chaque essai sont sélectionnées et classées dans les tableaux suivants :

Tableau VII : Seconds résultats de flexion statique quatre points testé sur face des lamelles.

Nº	cf (br)	mH (g)	mo (g)	σ_m (Mpa)	variance	ecartype	H%
1	2	117,45	103,64	115,395	4,401985	3,7	13,32497
2	1,9	94,44	82,13	109,6253	13,48108		14,98843
3	2	104,14	90,87	115,395	4,401985		14,60328
4	1,9	94,25	81,73	109,6253	13,48108		15,31873
5	2	102,02	88,6	115,395	4,401985		15,14673
6	2	102,52	88,83	115,395	4,401985		15,41146
7	2,1	105,43	91,94	121,1648	61,90292		14,67261
8	1,9	102,3	89,37	109,6253	13,48108		14,46794
9	2	102,01	98,43	115,395	4,401985		3,637103
10	1,9	101,66	88,5	109,6253	13,48108		14,87006
11	1,9	96,43	83,56	109,6253	13,48108		15,40211
moyenne				113,2969	13,7562046		13,80

Il en ressort de ce tableau VII que la moyenne des contraintes de rupture de flexion testée sur face des lamelles est de $\sigma_m = 113,3$ Mpa. La moyenne des variances est de **13,76**. L'écart type est de **3,7**. L'humidité moyenne des éprouvettes est **13,8%**. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant trois intervalles. Elle est la suivante :

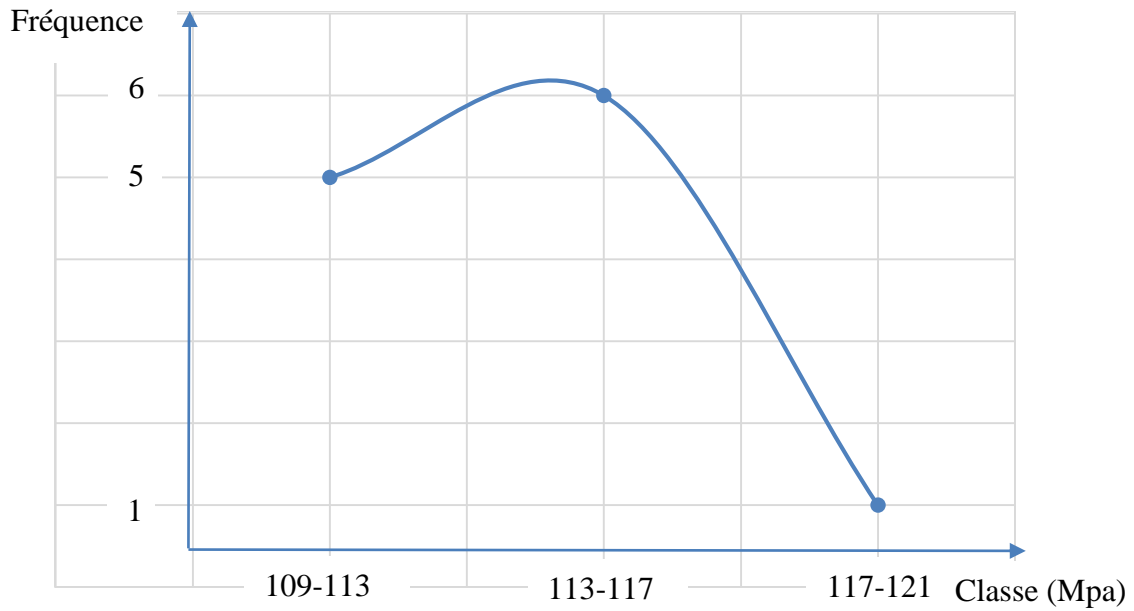


Figure 3.6 : Courbe de fréquence de la contrainte de flexion des éprouvettes testées sur parement

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 113-117 pour une fréquence probable de 6

Tableau VIII : Seconds résultats de flexion statique quatre points testé sur champ des lamelles.

Nº	cf (br)	mH (g)	mo (g)	σF (Mpa)	variance	ecartype	H%
1	2,4	102,01	88,87	138,474	356,5608	37,19	14,78564
2	2	108,37	95,11	115,395	17,60794		13,94175
3	2	97,2	85,22	115,395	17,60794		14,05773
4	2,1	95,24	83,19	121,1648	2,476117		14,48491
5	2	93	80,89	115,395	17,60794		14,97095
6	2	99,87	87,22	115,395	17,60794		14,50355
7	2,2	104,68	91,24	126,9345	53,92432		14,73038
8	2	96,7	84,79	115,395	17,60794		14,04647
9	2	109,98	96,63	115,395	17,60794		13,81559
10	2	90,96	78,77	115,395	17,60794		15,47543
11	2,1	106,8	93,86	121,1648	14680,9		13,78649
moyenne				119,5912	1383,37395		14,41

D'après le tableau VIII, il en ressort que les éprouvettes de flexion statique quatre points testées sur champ des lamelles ont une contrainte moyenne de rupture $\sigma_F = 119,59 \text{ Mpa}$. Une variance moyenne de **1383,37**, avec un écart type **37,19**. La moyenne des humidités au moment des essais est **14,4%**. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant trois intervalles. Elle est la suivante :

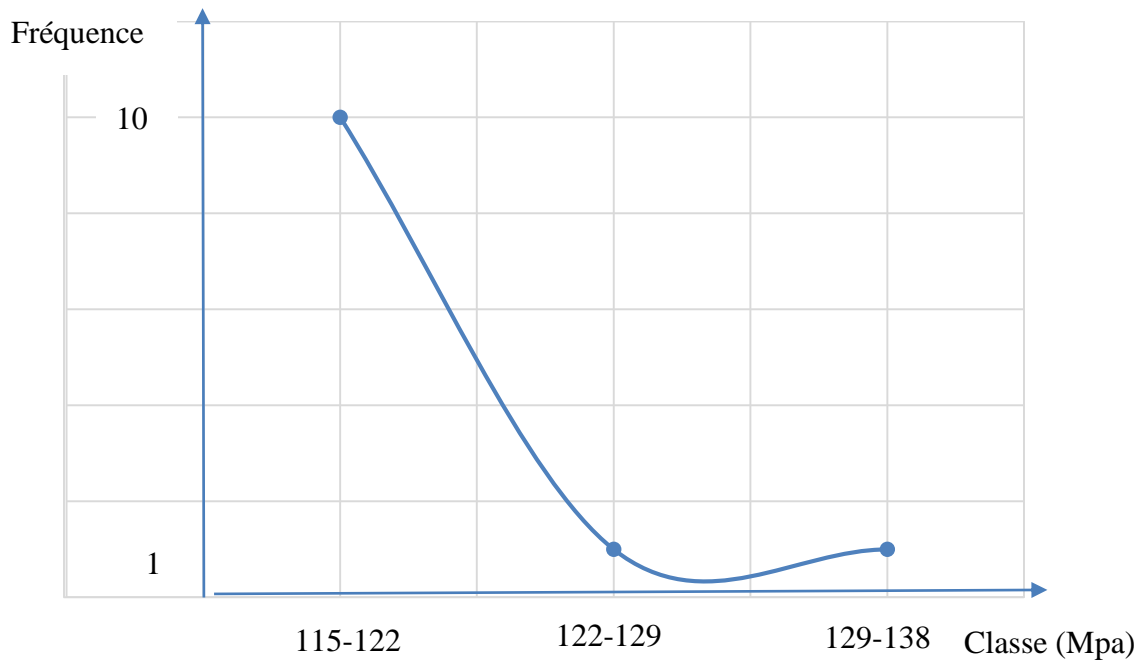


Figure 3.7: Courbe de fréquence de la contrainte de flexion des éprouvettes testées sur champ des lamelles

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 115-122 pour une fréquence probable de 10

Tableau IX : Seconds résultats des éprouvettes de compression axiale

Nº	σ_c (br)	mH (g)	mo	σ_C	variance	ecartype	H%
1	28	18,67	17,84	107,702	425,6475	10,8	4,652466
2	22	19,88	17,36	84,623	5,991591		14,51613
3	23	20,82	18,2	88,4695	1,956438		14,3956
4	22	21,3	18,65	84,623	5,991591		14,20912
5	22	21,19	18,54	84,623	5,991591		14,29342
6	22	18,48	16,22	84,623	5,991591		13,93342
7	28	19,2	18,25	107,702	425,6475		5,205479
8	22	21,07	18,45	84,623	5,991591		14,20054
9	21	17,77	15,55	80,7765	39,61787		14,27653
10	18	17,89	15,67	69,237	318,0434		14,1672
11	21	19,04	16,64	80,7765	39,61787		14,42308
moyenne				87,07077	116,40806		12,57

D'après ce tableau IX, la moyenne des contraintes de rupture des éprouvettes de compression axiale a donnée $\sigma_C = 87 \text{ Mpa}$. La moyenne des variances calculées est de **116,4** et un écart type de **10,8**. La moyenne des humidités des éprouvettes au moment des essais est des **H = 12,57%**. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant trois intervalles. Elle est la suivante :

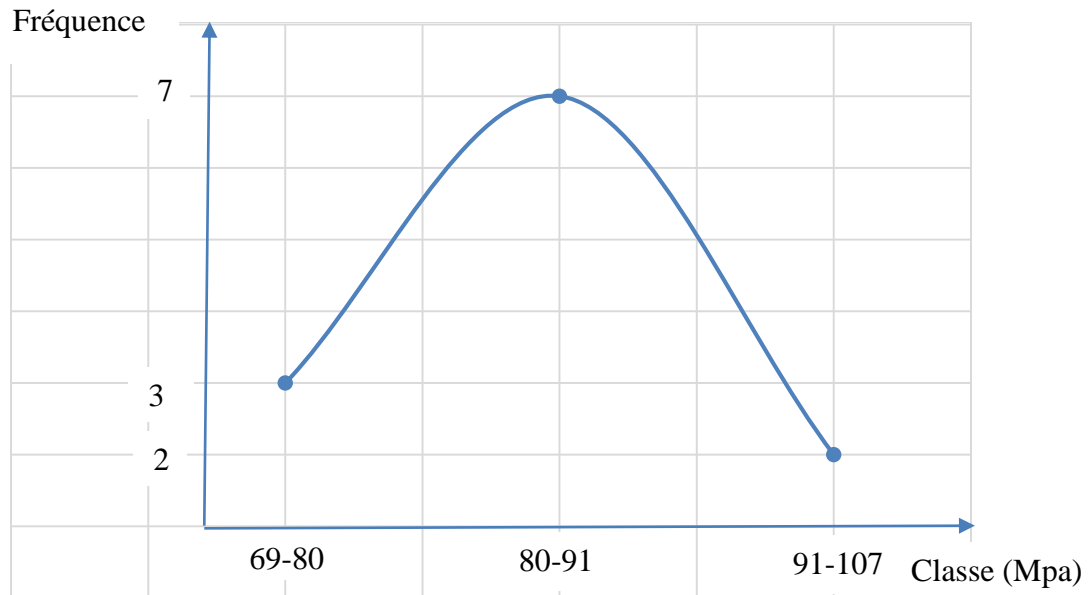


Figure 3.8 : Courbe de fréquence de la contrainte des éprouvettes de compression

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 80-91 pour une fréquence probable de 7

Tableau X: Seconds résultats intermédiaires des éprouvettes de traction axiale

Nº	ct int (N)	mH (g)	mo (g)	σT int (Mpa)	variance	ecartype	H%
1	1230	21,31	18,96	24,6	27,91681	6,2	12,39451
2	900	20,77	18,26	18	1,732813		13,74589
3	1060	22,38	19,69	21,2	3,548086		13,66176
4	790	21,63	19,02	15,8	12,36481		13,7224
5	1070	22,03	19,36	21,4	4,34154		13,79132
6	1070	22,27	19,69	21,4	4,34154		13,1031
7	1150	20,64	19,55	23	13,56918		5,575448
8	1280	23,39	20,59	25,6	39,48409		13,59883
9	960	22,11	19,41	19,2	0,01354		13,91036
10	1030	20,18	17,79	20,6	1,647722		13,43451
11	84	23,28	20,48	19,68	311,0413		13,67188
moyenne				19,31636	38,18195		12,78

Il en ressort de ce tableau X que la moyenne des contraintes qui engendre le premier bruit des éprouvettes de traction est σT int = **19,32 Mpa**. La variance moyenne est de **38,2** et l'écart type est de **6,2**. La moyenne des humidités est de **H = 12,78%**. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant trois intervalles. Elle est la suivante :

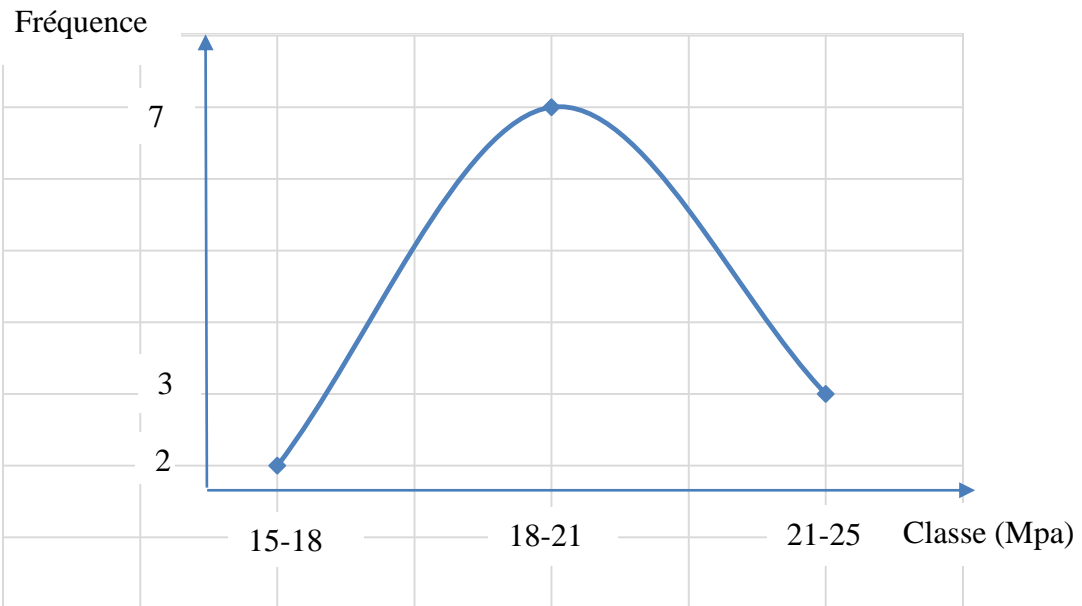


Figure 3.9: Courbe de fréquence de la contrainte des éprouvettes de traction intermédiaire

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 18-21 pour une fréquence probable de 7

Tableau XI: Seconds résultats des éprouvettes de traction axiale

Nº	ct (N)	mH (g)	mo (g)	σT (Mpa)	variance	ecartype	H%
1	1590	21,31	18,96	31,8	24,63769	3,7	12,39451
2	1160	20,77	18,26	23,2	13,22314		13,74589
3	1370	22,38	19,69	27,4	0,317686		13,66176
4	1050	21,63	19,02	21	34,06314		13,7224
5	1390	22,03	19,36	27,8	0,928595		13,79132
6	1390	22,27	19,69	27,8	0,928595		13,1031
7	1490	20,64	19,55	29,8	8,78314		5,575448
8	1650	23,39	20,59	33	37,99041		13,59883
9	1240	22,11	19,41	24,8	4,146777		13,91036
10	1340	20,18	17,79	26,8	0,001322		13,43451
11	1090	23,28	20,48	21,8	25,36496		13,67188
moyenne				26,83636	13,6714		12,78

D'après ce tableau XI, il en ressort que la moyenne des contraintes de rupture de traction est de $\sigma T = 26,8$ Mpa. La variance moyenne calculée sur les éprouvettes est de **13,67**. Et l'écart type de cette série est de **3,7**. L'humidité moyenne des éprouvettes au moment des essais est de

$H = 12,78\%$. D'après ce tableau, la fréquence des contraintes est tracée suivant trois intervalles. Elle est la suivante

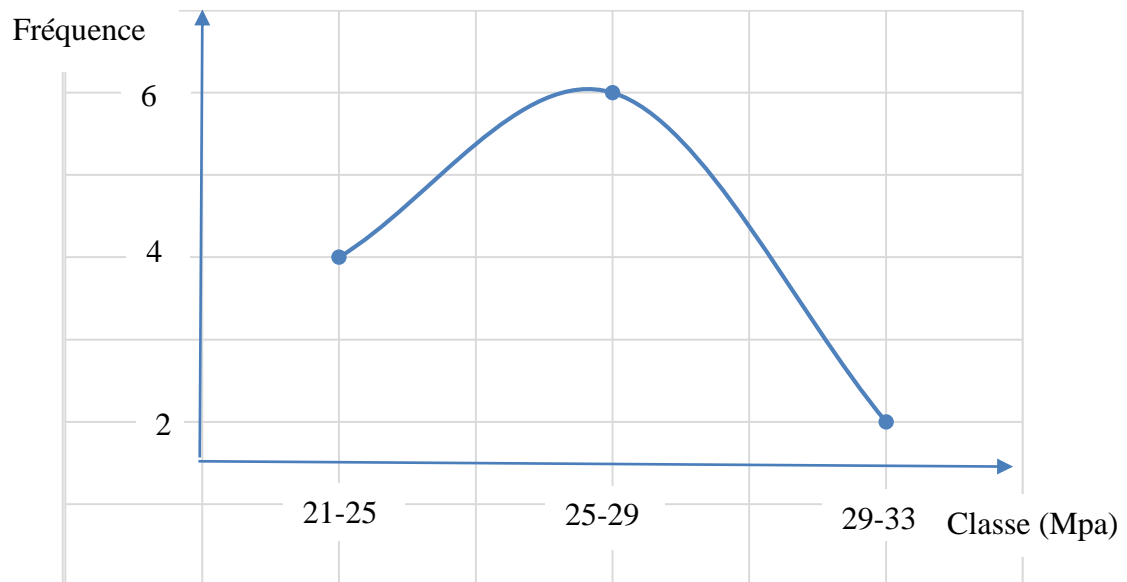


Figure 3.10: Courbe de fréquence de la contrainte de traction axiale

Cette courbe montre que la contrainte de rupture se trouve dans la classe 25-29 pour une fréquence probable de 6

3.1.2 Expression finale des résultats

En ce qui concerne le résultat des contraintes de la traction, il sera ramené convenablement à la section normative de $10 \times 20 \text{ mm}^2$. Puis, il sera multiplié par deux car la charge a été placée à l'échelle numéro 2 sur le bras de levier de la machine de traction.

3.1.2.1 Cas de la contrainte intermédiaire $\sigma_{T \text{ int}}$:

$$\begin{array}{l}
 19,3 \longrightarrow 100 \text{ mm}^2 \\
 X \longleftarrow 200 \text{ mm}^2 \\
 X = \left(\frac{19,3 \times 200}{100} \right) \times 2 = 77,2 \\
 \sigma_{T \text{ int}} = 77,2 \text{ MPa}
 \end{array}$$

3.1.2.2 Cas de la contrainte de traction σ_T

$$\begin{array}{l}
 26,8 \longrightarrow 100 \text{ mm}^2 \\
 X \longleftarrow 200 \text{ mm}^2
 \end{array}$$

$$X = \left(\frac{26,8 \times 200}{100} \right) \times 2 = 107,2$$

$$\sigma_T = 107,2 \text{ MP}_a$$

De plus, ces valeurs obtenues à une section de $10 \times 20 \text{ mm}^2$, doivent être ramenées également à une section de $20 \times 20 \text{ mm}^2$. Cela revient à multiplier $X \times 2$: ainsi, nous avons :

Cas du σ_T int :

$$X = 77,2 \times 2$$

$$X = 154,4 \text{ MP}_a$$

$$\sigma_T \text{ int} = 154,4 \text{ MP}_a$$

Cas du σ_T :

$$X = 107,2 \times 2$$

$$X = 214,4 \text{ MP}_a$$

$$\sigma_T = 214,4 \text{ MP}_a$$

Pour le cas des flexions, l'humidité moyenne H au moment de l'essai est de 13% et 14%. Il est donc possible de ramener la contrainte de rupture en flexion statique σ_F à l'humidité conventionnelle de 12%, en utilisant la formule suivante. (Guitard,1987)

$$\sigma_{F12} = \sigma_F [1 + C_F (H - 12)] \quad (3.1)$$

Où :

C_F : est le coefficient de corrélation de la résistance en flexion de l'humidité pour l'essence considérée. $C_F = 0,04$

- Cas de la flexion statique testée sur face des lamelles

$$\sigma_{F12} = 113,3 [1 + 0,04(13 - 12)] = 117,8$$

$$\sigma_{F12} = 118 \text{ MP}_a$$

- Cas de la flexion statique testée sur champ des lamelles

$$\sigma_{F12} = 119,6 [1 + 0,04(14 - 12)] = 129,2$$

$$\sigma_{F12} = 129 \text{ MP}_a$$

A l'issu de ce traitement, les résultats finaux obtenus sont regroupés dans le tableau XII

Tableau XII: Les résultats issus de ce travail sont les suivants

	Compression axiale ($f_{c,g,0,k}$)	Flexion sur face des lamelles ($f_{m,g,0,k}$)	sur des champs ($f_{m,g,0,k}$)	Traction axiale ($f_{t,g,0,k}$)	
				σT_{int}	σT
Résistance	87 MPa	118 MPa	129 MPa	154 MP_a	214 MP_a
Ecart type	10	3	37	6	3

La valeur caractéristique de la résistance en compression notée $f_{c,g,0,k} = 87$ MPa veut dire que le BLCc comprimé, se limite à 87 MPa comme résistance maximale avant la rupture. Cette résistance encore appelée contrainte de rupture, appartient à la classe de contrainte élevée car $f_{c,g,0,k} > 75$ MPa (Gérard & al, 1998). De même, $f_{t,g,0,k} = 214$ MPa signifie que ce BLCc déploie une résistance mécanique caractéristique en traction axiale de 214 MPa avant sa rupture. Egalement, $f_{m,g,0,k} = 129$ MPa est la résistance maximale en flexion de ce matériau à atteindre avant sa rupture. Elle appartient à la classe de contrainte moyenne car $85 \text{ Mpa} < f_{m,g,0,k} < 140$ MPa (Gérard & al, 1998).

L'écart type des éprouvettes de compression = 10, montre que la différence entre les valeurs de contrainte des éprouvettes est significative. Elle va de même pour le cas des éprouvettes de flexion statique quatre points testées sur champ des lamelles qui est de 37. Pour le cas des éprouvettes de traction dont l'écart type est de 6 pour σT_{int} et 3 pour σT , pour le cas des éprouvettes de flexion testées sur face des lamelles dont, l'écart type est de 3, ces valeurs montrent que la différence entre les valeurs des contraintes n'est pas significative pour chaque essai.

A l'issu de ses résultats, il est important d'interpréter les résultats obtenus en comprenant le comportement du BLCc avant, pendant et à la fin des essais de traction. La partie suivante détaille donc ce phénomène.

3.1.3 Analyse rhéologique des éprouvettes de traction

Avant d'arriver à la rupture, les éprouvettes de traction ont traversé deux domaines à savoir le domaine de la déformation élastique réversible, et le domaine de la déformation plastique inhomogène ou striction.

3.1.3.1 Domaine de la déformation élastique réversible

Ce domaine est compris entre 0 et 154 MP_a . Une fois que le BLCc reçoit une contrainte appartenant à cet intervalle, il reste toujours homogène sur toutes ces dimensions. Mais une fois que la contrainte traverse cet intervalle, le BLCc passe à un autre domaine à savoir :

3.1.3.2 Domaine de la déformation plastique inhomogène ou striction

De même, ce domaine est compris entre 154 MP_a et 214 MP_a . Dans cet intervalle de contrainte, le matériau a augmenté un peu de longueur. Puis une rupture brusque c'est produite pour une contrainte $\sigma_T = 214 \text{ MP}_a$. C'est ça que montre la figure 3.11.

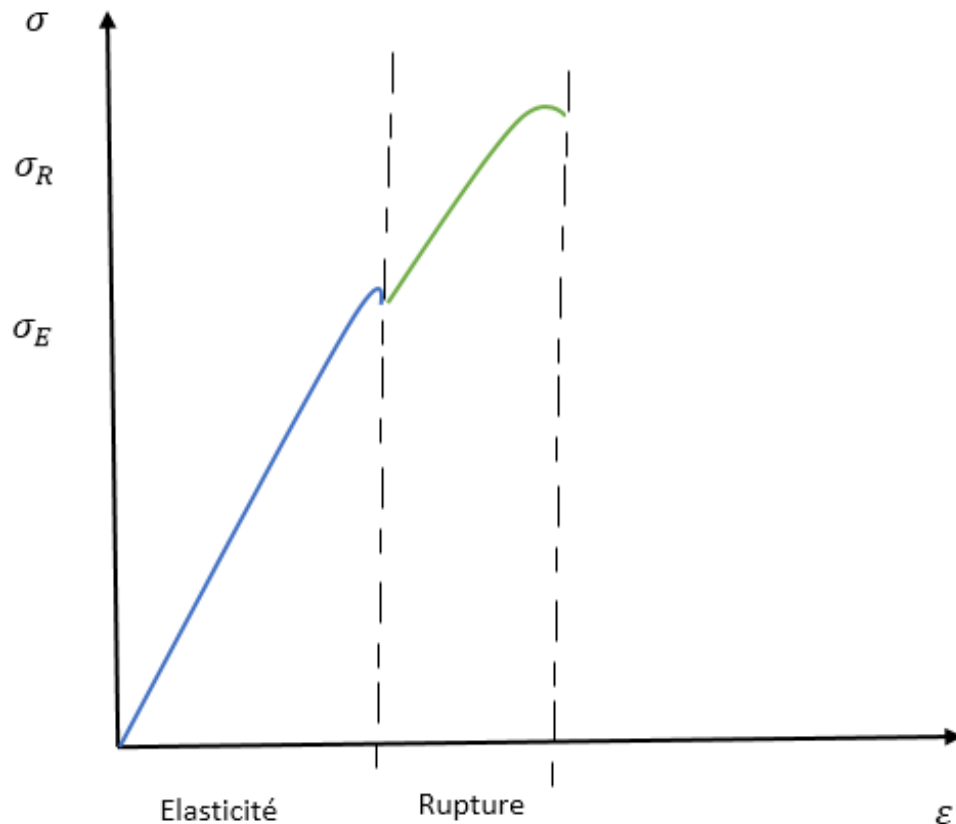


Figure 3.11 : Courbe de la contrainte de traction σ et de la déformation ϵ du BLC

Cette courbe traduit le comportement des éprouvettes de traction durant les essais. σ_E est la contrainte nécessaire pour qu'il y'a déformation élastique. Cette contrainte est comprise entre $0 < \sigma_E < 154 \text{ Mpa}$. Dans ce domaine, le matériau est dit de Hooke. Car si la contrainte est supprimée, le matériau va manifester un comportement de reprise de la géométrie initiale. Mais une fois que la contrainte augment, le matériau entre dans la zone de rupture. Cette rupture peut être dite fragile ou non, pour le cas de ce matériau (bois). La contrainte qui engendre cette rupture appartient dans l'intervalle $154 \text{ Mpa} < \sigma_R < 214 \text{ Mpa}$. Une fois que le matériau est déjà dans ce domaine, la suppression de la contrainte laisse toujours une déformation sur le matériau. Cette analyse rhéologique nous a permis de comprendre le comportement de notre matériau lorsqu'il est sollicité en traction.

3.2 DISCUSSION

D'emblée, les résultats obtenus de ce bois lamellé collé font l'objet d'une comparaison entre ceux-ci et ceux du Bilinga et Padouk antérieurement utilisé pour la fabrication du BLCc.

Tableau XIII: Ensemble des résultats (BLCc et bois massif) présenté clairement.

Résistance Matériau	Compression axiale	Flexion sur face des lamelles	Flexion sur champ	Traction axiale
BLCc	87 MP_a	118 MP_a	129 MP_a	214 MP_a
Bilinga	63 MP_a		104 MP_a	
Padouk	64 MP_a		126 MP_a	

En guise de rappel, les valeurs de la résistance mécanique caractéristique en compression et en flexion du bois massif bilinga et padouk émanent des travaux du CIRAD-foret.

D'après ce tableau, un fort constat est fait à savoir : la performance mécanique caractéristique considérable du BLCc

- en compression axiale, elle dépasse celle du bilinga de 24 MP_a et de 23 MP_a pour le cas du padouk.
- En flexion statique, elle dépasse également celle du bilinga de 25 MP_a et de 3 MP_a pour le cas du padouk.

Il se pourrait que cette différence est due à la performance mécanique de la colle qui est de $130MP_a$.

De plus, il se pourrait également que cette différence s'avère possible suite à l'adhérence entre les molécules de la colle et les molécules du bois. Car, la réaction chimique qui s'est produite lors du collage des lamelles est à l'origine de l'apparition des nouvelles liaisons covalentes plus améliorées.

Les valeurs de deux flexions à savoir $118 MP_a$ et $129 MP_a$ montrent pratiquement que le bois est plus résistant sur champ que sur parement. Car pour une même éprouvette de flexion dans ce cas, existe deux formes d'essais. Ses deux résultats constituent tangiblement une preuve pour la pose des pannes de section rectangulaire lors de la réalisation d'une charpente. Ainsi, la plus grande valeur qui est obtenue sur les éprouvettes testées sur champ des lamelles, guidera les charpentiers à poser les pannes de section rectangulaire que sur champ. Car le bois est plus fort sur champ que sur parement. Les résultats obtenus de ce travail par rapport au bois massif, partent dans le même sens que la thèse de NGUYEN TRUNG Viet Anh qui a travaillé sur le Multi renforcement du bois lamellé collé : étude théorique et expérimentale. Il a démontré que Les 5 poutres renforcées ont toutes présentées une résistance supérieure à celle des poutres non renforcées. En effet la rupture des poutres renforcées s'est produite pour des charges comprises entre 137 et 157 kN, avec une moyenne de 146 MPa, tandis que celle des poutres non renforcées s'est produite entre 62 et 100 kN, avec une moyenne de 75 MPa.

D'une manière explicite, les résistances en compression, flexion et traction trouvées lors de ce travail, permettent de dimensionner tous les éléments structuraux d'une construction (pont, charpente du toit, élévation des bâtiments, fondation) en BLCc de bilinga et padouk dont ses éléments sont sollicités aux différentes sollicitations convenables aux résistances suscitées.

Ces quatre résultats qui résultent de ce travail, donnent une certitude et un encouragement raisonnable à la réalisation des BLCc dans les unités de deuxième transformation comme les menuiseries, les entreprises de construction. Cette certitude et encouragement fortifient la marqueterie ainsi que l'investigation dans le bois. D'autres détails sur la performance mécanique et importance de ce matériau (illustration du tabouret en Louis XIV pied de biche dont l'ensemble est marqueté) sont présentés en annexe.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

➤ CONCLUSION GENERALE

Parvenir au terme de cette investigation qui se porte sur la détermination de la performance mécanique caractéristique et étude rhéologique du matériau d'ingénierie constitué de *Nauclea diderrichii* Merrill (bilinga) et *Pterocarpus soyauxii* Taub (padouk), il était question pour nous de déterminer la résistance mécanique caractéristique (en compression axiale, flexion statique quatre points, traction axiale) du bois lamellé collé panaché (BLCc) constitué du bilinga et du padouk ? De comprendre le comportement de ce dernier lorsqu'il est soumis à des contraintes ? Plusieurs objectifs ont été fixés à savoir : les objectifs généraux d'une part (tester les propriétés mécaniques caractéristiques des éprouvettes en BLCc constitué de bilinga et padouk, en vue d'une comparaison entre celle-ci et celles du bois massif antérieurement utilisé. Et d'autres parts les objectifs spécifiques (1-usinage du bois et réalisation des éprouvettes en BLCc suivi de leur acheminement au laboratoire, 2-réalisation des différents essais des éprouvettes sur les différents dispositifs et collecte des données, 3-traitement des données et étude rhéologie du BLCc). L'atteinte à ses objectifs a nécessité l'approvisionnement en bois suscités dans les différentes entreprises de sciage, l'usinage du bois à l'atelier de menuiserie, collage des lamelles, usinage et tronçonnage du BLCc aux éprouvettes règlementées par des normes, la réalisation des différents essais (flexion statique quatre points, compression axiale et traction axiale). Le traitement des données collectées est passé par des expressions des contraintes et d'humidité pour obtenir la première partie des résultats. L'analyse statistique a vérifié le nombre exact d'éprouvette qui est de **11**. Les calculs des humidités moyennes nous ont permis de ramener les résultats finaux à 12 % d'humidité (humidité conventionnelle utilisée pour la caractérisation). Ainsi, s'en découle les résistances mécaniques caractéristiques dudit BLCc à savoir : en compression $f_{c,g,0,k} = 87 \text{ MPa}$, en traction axiale $f_{t,g,0,k} = 214 \text{ MPa}$, en flexion statique $f_{m,g,0,k} = 118 \text{ MPa}$ d'une part et $f_{m,g,0,k} = 129 \text{ MPa}$ d'autres parts. Les résultats (intermédiaire et final) de traction obtenus nous ont permis de comprendre la rhéologie du BLCc quand il est sollicité en traction. Il en ressort d'après la discussion que, la création des motifs en BLCc offre une performance mécanique considérable face à celle du bois massif antérieurement utilisé pour la fabrication de ce BLCc. Cette justification significative des propriétés mécaniques caractéristiques de ce matériau d'ingénierie, constitue une base tangible aux constructeurs bois, charpentiers, menuisiers, ébénistes pour le dimensionnement des ouvrages en BLCc et permet

d'émanciper l'incrustation de plusieurs essences pour aboutir à un ouvrage de qualité : cas de la figure 1. D'autres explications et quelques avantages sont à l'annexe. Pour corroborer cette spécialité, viennent les nouvelles visions.

➤ **PERSPECTIVES**

Ce travail initié sur l'agencement de Bilinga et Padouk est encore en fortification. C'est ainsi qu'à l'horizon futur, nous envisageons compléter les résultats liés à ce matériau par les essais de compression perpendiculaire aux fibres, de traction perpendiculaire aux fibres, de cisaillement dudit matériau, déterminer expérimentalement le module d'élasticité longitudinale de ce dernier. Nous projetons également caractériser le BLC homogène en Padouk et en Bilinga en particulier et pour le reste parmi les cinquante-trois essences du bois tropical initiés par CIRAD-Forêt en général. Déterminer aussi les contraintes de rupture en traction pour toutes les essences qui n'ont pas encore de donnée disponible. Etant donné que le bon sens est la chose la mieux partagée, nous pensons utiliser tous nos résultats obtenus lors de ce travail pour dimensionner et construire techniquement et en qualité professionnelle un pont en BLCc constitué de Bilinga et Padouk d'une part, et d'autres parts, dimensionner puis réaliser au moins un immeuble en bois dont les éléments structuraux tels que les poteaux et les poutres sont avec notre matériau crée.

BIBLIOGRAPHIE

Afnor. (1987). *Bois essai de flexion statique*. Tour Europe cedex, paris, 180 pages 176-180.

Afnor. (1985). *Bois essai de compression axiale*. Tour Europe cedex, paris, 180 pages 173-175.

Afnor. (1987). *Bois condition générale d'essai*. Tour Europe cedex, paris, 180 pages 155-158.

Afnor. (1987). *Bois détermination de l'humidité*. Tour Europe cedex, paris, 180 pages 159-161.

Blétry, M. (2007). *Méthode de caractérisation mécanique des matériaux*, Paris, 32 pages, 7-9.

Chanrion, P. (2002). *"Marché et séchage des sciages feuillus de fortes épaisseurs"*.
Département Bois et Sciage, Centre Technique du Bois et de l'Ameublement
(CTBA), 124 pages.

Collister, W. & al Bailon, J. (1988). *Propriété mécanique des matériaux*, 122 pages.

Elias, F. (2017). *Elasticité note de cours*, 64 pages 33-34.

Gérard, J. & al. (1998). *Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains*, Montpellier cedex 01 France, 189 pages.

Goulet, M. (1967). *Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Première partie: Hypothèse de travail et expériences préliminaires*. Note de recherches n° 2. Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, 25 pages.

Goulet, M. (1968). *Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Seconde partie: Essais du bois d'érable à sucre en compression radiale*. Note de recherches n° 3. Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, 29 pages.

Guitard, D. (1987). *"Mécaniques des Matériaux Bois et Composite"*, Capadues-Editions,
Collection Nabla, 238 pages.

Harrington, J. Booker, R. & al. (1998). *"Modelling the elastic properties of softwood (Part T: The cell-wall lamellae)"*. Holz als Roh- und Werkstoff, 56 pages. 37-41.

- Jean, K, M. (2008).** *Regroupement mécanique par méthode vibratoire des bois du bassin du Congo*. Université de Yaoundé 1 et université de Bordeaux 1. 165 pages.
- Kollmann, F. & Côté, W. (1968).** Principles of wood science and technology. Tome I : Solid wood. Springer-Verlag, New York, 592 pages.
- Michel, J. & al. (2004).** *Essai de traction*. Institute des techniques des ingénieurs de l'industrie. 11 pages
- Placet, V. (2006).** " *Caractérisation du comportement viscoélastique du bois en fonction de sa structure anatomique et macromoléculaire*". Thèse de doctorat, Université Nancy I, 168 pages.
- Sales, C. (1977).** *Étude rhéologie des bois tropicaux*. Le module d'élasticité, 19 pages.
- Schniewind, A. (1956).** *Sorption hysteresis in relation to wood thickness*. Forest Products Journal, 6(6):225-229.
- Siau, J. (1995).** *Wood Influence of moisture on physical properties*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 227 pages.
- Stamm, A. (1964).** *Wood and cellulose science*. Ronald Press, New York, 549 pages.
- Wood Handbook-Wood as an engineering material, (2010).** *General Technical Report FPL-GTR-190*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508 pages.
- Zhi – Qiarng, F. (2005).** *Mécanique non linéaire*, Université d'Evry Val d'Essonne, 95 pages : 5-13.

ANNEXES

Cette partie présente certain détail du comportement mécanique du matériau bois lors d'essai puis, développe les informations sur le bois lamellé collé.

1 Mécanique :

Tableau XIV : les domaines intéressés par la mécanique.

Séchage du bois	procédé de conversion et de traitement (mécanique du fluide).
construction bois	conception du matériau et systèmes constructif (sciences de l'ingénieur).
connaissance de matériau bois	caractérisation des matériaux nouveaux à base de bois (mécanique des solides).

Tous ses domaines créent un foisonnement pour donner la mécanique fondamentale ; analyse numérique et expérimentale. Qui à son tour converge vers la biométrie de l'arbre et du tissu bois (sciences de la terre et de l'univers, sciences de la vie santé, sciences humaines et sociales).

Essai de flexion

Lors de l'essai de flexion, le bois est soumis à deux types de contrainte à savoir : la compression sur la face dorsale et la traction sur la face ventrale). Cas de la figure suivante :

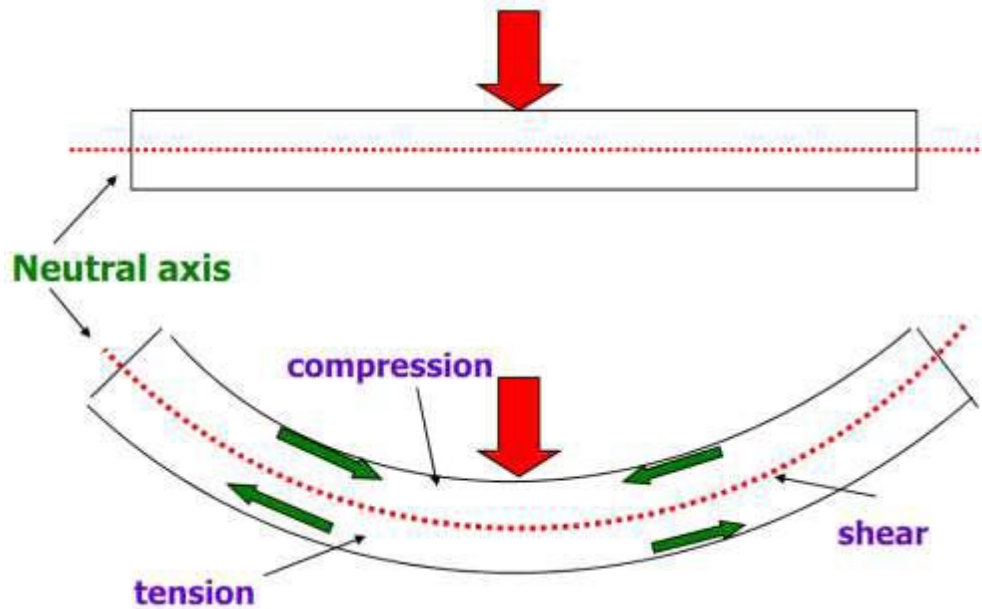


Figure a : Comportement de l'éprouvette de flexion sollicitée.

2 Le bois lamellé collé :

Tableau XV : Quelques avantages du BLC

caractéristiques constantes et garanties	Savoir le séchage maîtrisé, la stabilité dimensionnelle précise. L'utilisation du blc dans les menuiseries permet la réalisation des grosses pièces de bois qui ne doivent pas se déformer exagérément.
association possible avec d'autres matériaux	l'acier (bois-acier), le béton (bois-béton), bois massif
Physiquement	Le BLC offre une esthétique remarquable par leur forme et couleur. Il présente un mixage de couleur lorsque plusieurs bois sont agencés pour un ouvrage. Les formes données par ce blc sont multiples à l'occurrence, les arcs généralement utilisé pour la construction des ouvrages d'arcs (pont bostraing, pont à obans... avec des courbes de très grandes portés), les poutres à inertie variable généralement utilisées pour de grande construction (charpentes des gymnases, des

Mécaniquement

églises ainsi que de certaines tribunes

Le BLC déploie une résistance mécanique à la compression, flexion supérieur à celle d'autres matériaux de même densité. Sans perdre de vue, la performance mécanique du BLC est croissante mais dépend de deux facteurs à savoir : -la qualité du bois (planche) utilisée, -la performance de l'aboutage. L'aboutage reste un point faible dans le cas des sollicitations en traction. Le BLC présente une très faible conductivité thermique, une variation dimensionnelle pratiquement inexistant.

Les sections du BLC sont limitées par deux données techniques

- les largeurs des planches d'approvisionnement qui conditionnent la largeur finale de la poutre. -la dimension de la grosse raboteuse qui limite la hauteur de poutres à 2 m en principe. La longueur de la poutre ne pose aucun problème et les administrations tolèrent en transport des poutres de 30m



Figure b : Tabouret en Louis xiv pied de biche marqueté

4 : Illustration de quelques machines utilisées pour l'usinage du bois.



Figure c : la Dégauchisseuse utilisée pour le corroyage du bois



Figure d : la Raboteuse utilisée pour la mise en épaisseur du bois



Figure e : la Scie circulaire à table



Figure f : la Scie radiale utilisée pour l'usinage du BLCC



Figure g : la Scie circulaire mobile utilisée pour le tronçonnage des éprouvettes