

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

**ECOLE NORMALE SUPERIEURE
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE**

Département de Génie Mécanique

B.P. 886 Ebolowa / Tél : +237 243 71 78 16
Site web: www.enset-ebolowa.com
Courriel : ensetebwa@gmail.com



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace – Work – Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

**HIGHER TECHNICAL TEACHER
TRAINING COLLEGE**

Department of Mechanical Engineering

PO. BOX 886, Ebolowa / Tél: +237 243 71 78 16
Web site: www.enset-ebolowa.com
Mail: ensetebwa@gmail.com

**ELABORATION ET CARACTERISATION MECANIQUE D'UN
MATERIAU COMPOSITE A BASE DE L'ENDOCARPE DE COULA
EDULIS (COQUES DE NOISETTES)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur des lycées d'Enseignement
Technique et Professionnel de deuxième grade (DIPET II)*

OPTION : CONSTRUCTION MECANIQUE

Par :

AKANA ROGELIN EMMANUEL

Licence de Technologie en Mecatronique Automobile

Matricule : 19w1223

Sous la Supervision de :

Pr. BETENE EBANDA Fabien, Maître de Conférences



Devant le Jury constitué de :

Président	: Pr. BETENE EBANDA Fabien	Maitre de Conférences, ENSET de Douala
Rapporteurs	: Pr. KANAA Thomas	Maitre de Conférences, ENSET Ebolowa
	: Dr. TAWE Laynde	Assistant, ENSET Ebolowa
Examineur	: Dr. ZOGO TSALA	Chargé de Cours, ENSET Ebolowa

Année Académique 2020/2021

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEURE
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

B.P. 886 Ebolowa / Tél : +237 243 71 78 16
Site web: www.enset-ebolowa.com
Courriel : ensetebwa@gmail.com



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace – Work – Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TECHNICAL TEACHER TRAINING
COLLEGE

PO. BOX 886, Ebolowa / Tél: +237 243 71 78 16
Web site: www.enset-ebolowa.com
Mailto: ensetebwa@gmail.com



ATTESTATION DE CORRECTION DE MEMOIRE
ATTESTATION OF THESIS CORRECTION

Département/Department :

Filière/Option:

Noms et prénoms de l'étudiant / Student's names:

Titre du mémoire / Thesis title :

Nous soussignés, / We the undersigned,

....., Examineur du jury / Examiner

....., Rapporteur du jury / Supervisor

Attestons que le mémoire sus cité a subi toutes les corrections de forme et de fond exigées par le jury.

Fait à Ebolowa, le

L'Examineur / The Examiner

L'Encadreur / The Supervisor

RECEPISSE DE CORRECTION DE MEMOIRE

Le Directeur de l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique de l'Université de Yaoundé I à Ebolowa atteste avoir reçu un exemplaire et un CD contenant la version électronique corrigée du Mémoire en un seul fichier (format .pdf) :

Noms et prénoms de l'étudiant / Student's names:

..... Filière et Niveau/Option and level:

Le Directeur,

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

**ECOLE NORMALE SUPERIEURE
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE**

886 Ebolowa / Tél : +237 243 71 78 16
Site web: www.enset-ebolowa.com
Courriel : ensetebwa@gmail.com



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace – Work – Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

**HIGHER TECHNICAL TEACHER
TRAINING COLLEGE**

PO. BOX 886, Ebolowa / Tél: +237 243 71 78 16
Web site: www.enset-ebolowa.com
Mail: ensetebwa@gmail.com

Ebolowa, le

ATTESTATION DE L'ORIGINALITE DU MEMOIRE

Je soussigné, **AKANA Rogelin Emmanuel**, Matricule **19W1223**, atteste que le présent mémoire de DIPET 2 intitulé “***Elaboration et Caractérisation Mécanique d'un Matériau Composite à Base de L'endocarpe de Coula Edulis (coques de noisettes)***” est le fruit de mes propres travaux, effectués au Département du Génie Mécanique de l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (*ENSET*) de l'Université de Yaoundé I sous la Direction du **Pr KANAA Thomas**, Maître de Conférences, en vue de l'obtention du *Diplôme de Professeur d'Enseignement Technique de second grade (DIPET 2)*, Option : *Construction Mécanique*.

Ce mémoire est authentique et n'a pas encore été présenté pour l'acquisition de quelque grade que ce soit.

VISA DE L'AUTEUR

AKANA Rogelin Emmanuel

Dédicace

Je dédie ce travail

A

Mes feux parents

Remerciements

Tout travail de recherche est une aventure vers un chemin inconnu qu'on est obligé de suivre en espérant obtenir les résultats escomptés. Au cours de ce long travail, nous avons été soutenus par les uns et les autres. Alors, nos sincères remerciements vont à l'endroit de :

- **Pr BETENE EBANDA Fabien** pour sa supervision organisée au cours de l'élaboration de ce mémoire ;
- **Dr TAWÉ Laynde** pour son encadrement, sa disponibilité, ses conseils prodigués et le suivi permanent de ce travail ;
- A mon jury constitué de : Président **BETENE EBANDA (MC)** ; Rapporteur **KANAA Thomas (MC)** ; Examineur **ZOGO TSALA (CC)** ; Encadreur **TAWÉ Laynde (ASS)** pour la qualité de l'appréciation accordée aux résultats de nos travaux de recherche.
- Au chef du laboratoire du département de Génie Civil de L'ENSET de Douala de m'avoir permis d'effectuer les différents essais dans leur laboratoire.
- **Pr. NDJAKOMO ESIANE Salomé**, Directeur de l'ENSET d'EBOLOWA qui nous a accueillis dans son Etablissement et nous a permis de mener nos études et approfondir nos connaissances dans le domaine de la construction Mécanique dans des conditions largement favorables ;
- **Pr KANA'A Thomas**, Chef du département de Génie Mécanique pour sa disponibilité, sa supervision organisée au cours de l'élaboration de ce mémoire et ses conseils ;
- Tout le personnel administratif et tous les **enseignants** de l'ENSET d'EBOLOWA particulièrement à ceux du Génie Mécanique pour leurs encadrements et les enseignements que j'ai reçus tout au long de ma formation ;
- Mes parents **TSAFACK Jacqueline** et ma maman **NGUONE Marie** pour l'amour inconditionnel et le soutien indéfectible qu'ils m'ont témoigné tout au long jusqu'à ce que j'arrive ou nous sommes ;
- Ma famille, mes frères et sœurs qui n'ont jamais cessé de me prouver leur affection à travers leur encouragement ;
- A mon frère **DONFACK Tanguy** avec qui nous avons traversé ce moment difficile de ma formation et qui m'a toujours apporté son soutien ;
- A ma chère et bien aimée **ESSIANE AKAME Dany**, pour son esprit de magnanimité dont elle a fait pour ce travail ;

-
- A mes promotionnaires de classe **ETOUNDI, BIYO'O** et **SAGUO** pour leurs disponibilités, encouragements et au soutien durant notre formation ;
 - A mes camarades de fabrication mécanique **MEVOA, NOFOZO, NOUBOU, NZOKOU, SONGUE** pour leurs collaborations sans cesse ;
 - A mes camarades de la 3ieme promotion de l'ENSET d'EBOLOWA ;
 - Tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail

Liste des abréviations

Rm : Contrainte de rupture [MPa]

ρ : Densité [g/cm³]

L : Longueur [mm]

l : Largeur [mm]

ei : Epaisseur [mm]

Gi : Gonflement [%]

Ha : hectare

MOE : Module d'élasticité [MPa]

MOR : Module de rupture [MPa]

TH : Taux d'humidité [%]

D : Diamètre [mm]

h : Hauteur [mm] **S**: Surface [cm²]

Rc : Résistance à la compression [MPa]

Δl : Allongement en mm

Ep : Eprouvette

PA : Panneau A (gros granulométrique)

PB : Panneau B (moyen granulométrique)

ϵ : Déformation

E : Module d'Young

Rm : Contrainte maximale à la rupture en traction

Fm : Force de rupture maximale

Résumé

Ce mémoire développe l'étude de fabrication des nouveaux matériaux composites dont la valorisation des déchets issus de la transformation des produits forestiers, Il représente une véritable opportunité pour le développement du secteur de l'industrie. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des particules d'endocarpe de coula edulis communément appelé noisette et localement appelé en langue Boulou KOME dans la fabrication des panneaux de particules en matériaux composites. Une présentation générale de coula edulis et de la répartition de ses zones de production a été faite ; suivi de l'étude des panneaux de particules lignocellulosiques et de certains travaux effectués dans le cadre de leur valorisation. La coque de coula edulis comme un renfort et l'époxyde comme résine ont été adoptés comme matière première dans notre travail. La réalisation des panneaux a été faite par simple moulage avec compactage à la presse hydraulique. Quatre compositions différentes ont été faites et quarante éprouvettes ont été réalisées pour différents essais tel que la densité, absorption, la flexion trois points et la compression. Deux types de caractérisation ont été effectuées : la caractérisation physique qui a permis de déterminer la masse volumique apparente et le taux d'absorption d'eau ; la caractérisation mécanique qui a fourni le module d'élasticité et la contrainte de rupture du matériau obtenu, la compression quant à elle a permis de déterminer le module Young (E) et la déformation (ΔL). pour une augmentation en teneur de particules de coula edulis de 70 à 90 % la masse volumique apparente croît de 260,80 à 298,68kg/m³ tandis que le taux d'absorption varie de 7,66 à 24,66% en 24 heures et 0% pour deux heures d'immersion dans une eau distillée , L'essai de flexion a permis de calculer le module d'élasticité (MOE) variant entre 627, 027MPa et 2473,66MPa et le module de rupture (MOR) variant entre 9,014MPa et 174, 153MPa pour toutes les compositions. Le module d'Young, la contrainte maximale et la déformation sont déterminés grâce aux essais de compressions. En comparaison des résultats obtenus nos panneaux sont de divers domaine utilisation domaine : d'ameublement, domaine de bâtiment, domaine de l'isolation et de l'art.

Mots clés : coque de coula edulis, panneaux de particules, propriété mécanique, module d'Young.

Abstract

This thesis develops the manufacturing study of new composite materials including the recovery of waste from the processing of forest products; it represents a real opportunity for the development of the industry sector. This work is part of the valorization of particles of endocarp of *coula edulis* commonly called hazelnut and locally call in language Boulou KOME in the manufacture of particleboard in composite materials. A general presentation of *coula edulis* and the distribution of its production areas was made; followed by the study of lignocellulosic particle board and certain work carried out as part of its recovery. The shell of *coula edulis* as a reinforcement and epoxide as a resin has been adopted as raw material in our work. Simple molding with compaction with hydraulic press did the realization of the panels. Four different compositions were made and forty specimens were made for different tests such as density, absorption, three-point bending and compression. Two types of characterization were carried out: the physical characterization that made it possible to determine the apparent density and the rate of water absorption; the mechanical characterization that provided the modulus of elasticity and the breaking stress of the material obtained the compression in order to determine the modulus Young (E) and the deformation (ΔL). for an increase in the content of particles of *coula edulis* from 70 to 90% the apparent density increases from 260.80 to 298.68kg / m³ while the absorption rate varies from 7.66 to 24.66% in 24 hours and 0% for two hours of immersion in distilled water, The bending test allowed to calculate the modulus of elasticity (MOE) varying between 627, 027MPa and 2473.66MPa and the modulus of rupture (MOR) varying between 9.014MPa and 174, 153MPa for all compositions. Young's modulus, maximum stress and deformation are determined through compression tests. In comparison with the results obtained our panels are of various field use field: furniture, building estate, isolation domain and field of art.

Keywords: *coula shell edulis*, particle board, mechanical property, Young's modulus.

Table des matières

Dédicace	
Remerciements	iv
Liste des abréviations	vi
Résumé	vii
Abstract	viii
Table des matières	ix
Liste des Tableaux	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
I. INTRODUCTION GENERALE	1
Contexte et problématique.....	1
Hypothèse de la recherche.....	2
Les objectifs	2
Plan de travail.....	2
CHAPITRE I : REVUE DE LITTERATURE	3
I.1. GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES.	4
I.1.1. Définition générale d'un matériau composite	4
I.1.2. Définition des matériaux composites multicouches.....	5
I.1.3. Classification des matériaux composites.....	5
I.1.3.1. Classification suivant la forme des constituants	5
I.1.3.1.1. Composites à fibres.....	5
I.1.3.1.2. Composites à particules.....	6
I.1.3.2. Classification suivant le type de matériau composite	7
I.1.3.2.1. Composites de grande diffusion (GD)	7
I.1.3.2.2. Composites haute performance (HP)	7
I.1.4. Eléments constituants d'un matériau composite	8
I.1.4.1. Matrice	8
I.1.4.2. Résines thermodurcissables (TD)	9

I.1.4.3. Résines thermoplastiques (TP).....	12
I.1.5. Charges.....	13
I.1.5.1 Charge augmentant la résistance mécanique.....	13
I.1.5.2. Charges ayant un rôle secondaire.....	13
I.1.6. Additifs.....	13
I.1.7. RENFORTS	14
I.1.7.1. Renfort en fibres discontinues.....	15
I.1.7.2. Renfort en fibres continus	15
I.1.7.3. Géométrie des Renforts.....	15
I. 1.8. Procèdes de fabrication des composites.	16
I.1.8.1. Moulage par projection	17
I.1.8.2. Moulage par compression	17
I.2. LES PANNEAUX DE PARTICULES LIGNOCELLUSIQUES	18
I.2.1. Généralités sur les panneaux de particules lignocellulosiques.....	19
I.2.1.1. Importance économique des panneaux de particules lignocellulosiques	19
I.2.1.2. Importance économique des panneaux composites au Cameroun	19
I.2.1.3. Les additifs dans les panneaux de particules lignocellulosiques.....	20
I.2.2. Classification des panneaux des particules	20
I.2.3. les procède de fabrication des panneaux de particules lignocellulosiques.....	22
I.2.3.1. La préparation du matériel ligneux	22
I.2.3.2. L'imprégnation du matériel fibreux avec la résine ou encollage	22
I.2.3.3. La mise en forme ou formage	22
I.2.3.4 La finition.....	23
I.2.4. Caractérisations mécaniques des panneaux de particules	23
I.2.4.1. Découpe des panneaux de particules.....	24
I.2.4.2. Détermination de la densité des panneaux de particules.....	24
I.2.4.3. Mesure des propriétés de flexion des panneaux de particules	24
I.3. GENERALITE SUR LE RENFORT (coques de coula edulis)	25
II.3.1. Introduction.....	25

I.3.2.2. Description	26
I.3.2.3. Écologie et dynamique de <i>Coula edulis</i>	27
I.3.2.4. <i>Coula edulis</i> , un aliment de qualité	29
I.3.3. Les autres usages de <i>Coula edulis</i>	31
I.3.4. Production de coula edulis dans le monde	33
I.3.5. Production de coula edulis au Cameroun.....	33
I.3.6. Processus de récolte des noisettes	34
I.3.7. Processus d'extraction des (coques de coula edulis).....	34
I.3.8. Estimation du tonnage de coque de noisettes	34
CHAPITRE II : ELABORATION ET CARATERISATION DES PANNEAUX DE PARTICULES DE COULA EDULIS	36
II. MATERIELS ET METHODES	37
II.1. Introduction.....	37
II.2. Matériel utilisés	37
II.2.1. <i>Coula edulis</i> (endocarpe de noisettes)	37
II.2.1.1. Caractéristique des coques de coula edulis	38
II.2.1.2. Densité apparente.....	38
II.2.1.3. Taux de gonflement	39
II.2.2. Résine Epoxyde	39
II.2.2.1. Condition d'utilisation de la Résine Epoxyde	40
II.2.3. Balance de précision	40
II.2.4. Presse hydraulique	41
II.2.5. L'étuve.....	41
II.3. Méthodes d'élaboration	42
II.3.1. La Préparation des coques de coula edulis	42
II.3.3. Préparation de particules de coula edulis.....	43
II.4. Processus de fabrication	43
II.4.1. Mélange des constituants	43
II.4.2. Dépôt de l'agent de démoulage	44

II.4.3. Le moulage	44
II.4.4. Le pressage	44
II.4.5. Le démoulage.....	44
III.4.6. Le séchage	45
III.5. Diagramme des différentes étapes de la fabrication de panneaux	45
II.6. CARACTERISATIONS DES PANNEAUX DE PARTICULES	46
II.6.1. Propriétés physiques	46
II.6.1.1. Masse volumique apparente (densité des panneaux de particules).....	46
II.6.1.2. Taux absorption d'eau	47
II.6.2. Propriétés mécaniques	48
II.6.2.1. Tests en flexion trois points	48
II.6.2.2. Essai de Compression perpendiculaire	50
II.6.2.3. Essai de traction perpendiculaire (essai d'arrachement).....	51
Chapitre III. RESULTATS ET DISCUSSION	52
III.1. INTRODUCTION.....	53
III.1.1. Compositions des constituants.	54
III.2. PROPRIETE PHYSIQUE.....	55
III.2.1. La masse volumique apparente	55
III.2.1.1. Interprétation du résultat.....	56
III.2.2. Absorption d'eau	57
III.2.2.1. Expérience	57
III.2.2.2. Résultats	57
III.2.2.3. Interprétation	58
III.3. Propriétés mécaniques	58
III.3.1. Résistance à la flexion trois point.....	58
III.3 .1 .1. Résultats d'éprouvettes grand granulométrique (PA) Taux de renfort 70%	58
III.3.1.2. Interprétation	59
III.3.1.3. Résultats d'éprouvettes grand granulométrique (PA) Taux de renfort 80%	60
III.3.1.3.1. Interprétation	60

III.3 .1.3.2. Résultats d'éprouvettes de moyenne granulométrique (PB) Taux de renfort 70%	61
III.3.1.3.3. Interprétation	61
III.3 .1 .3. Résultats d'éprouvettes de moyenne granulométrique (PB) Taux de renfort 80%	62
III.3.1.3.1. Interprétation	62
III.3.1.4. Résistance à la traction et compression	63
III.3 .1 .4.1. Résultats d'éprouvettes grand granulométrique (PA) Taux de renfort 70%	63
III.3.1.4 .2. Dépouillement de la courbe.....	64
III.3 .1 .5. Résultats d'éprouvette grand granulométrique (PA) Taux de renfort 80%.....	65
III.3 .1 .5.1. Résultats d'éprouvettes Moyen granulométrique (PB) Taux de renfort 70%	66
III.3 .1 .6. Résultats d'éprouvette de Moyen granulométrique (PB) Taux de renfort 80%	68
III.4. Avantage de panneaux de particules	69
III.5. Domaine d'utilisation	69
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	71
REFERENCES.....	73
ANNEXES	xiv

Liste des Tableaux

Tableau 1. Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [19].	10
Tableau 2. Les Caractéristiques physico-mécanique des résines époxyde [25].	11
Tableau 3 : Caractéristiques chimiques utilise de DGEBA n=2, MHHPA, APTES ET de TEOS [20]	12
Tableau 4 : Données analytiques de la composition de l'huile de coula edulis (1965) [37].	30
Tableau 5 : Estimation du taux coques obtenu après transformation de coula edulis en noisettes [27,36].	34
Tableau 6. Caractéristiques de coula edulis	38
Tableau 7 : Détermination de la densité apparente de la particule de coula edulis	53
Tableau 8 : Détermination de taux de gonflement de la coque de coula edulis.	53
Tableau 9 : Les compositions des constituants	54
Tableau 10 : Masse volumique des composites	55
Tableau 11 : Comparaison de la masse volumique apparente des panneaux [42].	56
Tableau 12 : Absorption d'eau de l'échantillon après 24 heures EP1, EP2 et EP3.	57
Tableau 13 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PA).	59
Tableau 14 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PA).	60
Tableau 15 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PB).	61
Tableau 16 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PB).	62
Tableau 17 : Relevés de l'essai de traction des éprouvettes (PA).	63
Tableau 18 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PA).	65
Tableau 19 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PB).	67
Tableau 20 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PB).	68

LISTE DES FIGURES

Figure. I .1 : Représentation schématique d'un matériau composite de type particule matrice, fibres coutes matrices et fibres continues matrices [1].	4
Figure I.2. Composition d'un matériau composite [5].	5
Figure I.3. Schéma de différents types de matériaux composites [13].	7
Figure I.4. Différentes familles de matrices [1-7].	9
Figure.I. 5. Les différents types de renfort de base [8].	15
Figure.I. 6. Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules [1].	16
Figure .I. 7. Moulage au contact [1]	16
Figure.I. 8. Méthode de projection simultanée [0]	17
Figure.I. 9. Méthode de moulage par compression [10]	17
Figure.I. 10. Panneaux de bois : panneaux à particules(a), panneaux de coupeaux (b), panneaux MFD (c), panneaux OSB (d), contreplaqué (e) [40].	21
Figure.I. 11 : présentation d'un tronc (b) d'arbre de coula edulis et les feuilles(a) [24]	26
Figure.I. 12. Fruit de coula edulis [43,42] fruit à état humide(a) fruit sec (b).	27
Figure.I. 13 : La structure de coula edulis [29]	29
Figure.I. 14 : coula edulis fraiche(a), coula edulis séché(b), fruits de coula edulis(c), endocarpe de coula edulis(d) [38]	31
Figure II-1 : Endocarpe de coula edulis	37
Figure II-3 : Balance électronique de SF-400	40
Figure II-4 : Presse hydraulique	41
Figure II-5 : Etuve	41
Figure II- 6 : broyeur à marteau	42
Figure II- 7: Particules de coula edulis repartir selon les granulométriques: PA (b), PA (a), Pf (c)	43
Figure II-8 : Démoulage des éprouvettes (a) éprouvette dans le moule,(b) après démoulage	45
Figure II-9 : Panneaux de particule de coula edulis après séchage	45
Figure II-10 : procédé de fabrication de panneaux des particules à base de L'endocarpe de coula edulis	46
Figure II-11: Essai d'absorption des panneaux	47

Figure II -12 : Déroulement d'un essai de flexion: 1) départ: 2) élasticité: 3) rupture [19]	48
Figure II-13 : Machine pour Essais de flexion	49
Figure II -14 : Dispositif pour l'essai de compression perpendiculaire.....	50
Figure II 15. Essai de traction [40].....	51
Figure III.1 Matériau composite obtenu	54
Figure III-2: diagramme d'évolution de la densité apparente de l'échantillon en fonction du pourcentage du renfort dans le composite.	56
Figure III-3 : courbe d'essai d'absorption d'eau	58
Figure III-4 : courbe de essai de flexion variation de la force en fonction (ΔL).....	59
Figure III-5 : courbe de flexion variation de la force en fonction (ΔL).....	60
Figure III-6 : courbe de flexion variation de la force en fonction (ΔL).....	61
Figure III-7 : courbe de flexion variation de la force en fonction (ΔL).....	62
Figure III-8 : courbe d'essai de traction : variation de la force en fonction (ΔL).....	64
Figure III-9 : courbe d'essai de traction : variation de la force en fonction (ΔL).....	66
Figure III-10 : courbe d'essai de traction ; variation en de la force en fonction (ΔL).....	67
Figure III-11: courbe d'essai de traction ;variation de la force en fonction (ΔL).....	69

I. INTRODUCTION GENERALE

Contexte et problématique

Les dernières décennies de notre ère ont vu l'apparition d'un nouveau type de matériau qui depuis lors a tendance à vouloir remplacer les habitudes industrielles en matière des métaux dans certaines applications. Ce nouveau type est la classe des matériaux qu'il convient aujourd'hui d'appeler « **matériaux composites** ». La matrice polymère ou époxyde est constituée d'un renfort (fibres végétales, fibres synthétiques, particules, ...etc.) et d'une matrice, leur assemblage donne un matériau dont les propriétés sont supérieures à celles de chacun des composants. Des études montrent que dans cette configuration chaque constituant a un apport dans l'amélioration des propriétés finales du composite :

- ❖ les renforts favorisent la croissance des propriétés mécaniques alors que ;
- ❖ la matrice assure la protection des fibres et la répartition des charges dans le matériau ;

Ces matériaux composites sont généralement d'une forte hétérogénéité du fait de l'alignement ou du tissage des fibres dans la matrice.

L'utilisation des matériaux composites devenu croissante au fil des années, ils occupent désormais une place primordiale notamment dans l'industrie automobile, navale et surtout aéronautique où ils offrent de nombreux avantages très prisés. Tout d'abord, nous parlerons ici de leur facilité de mise œuvre. La structure de la matrice en résine permet une facilité accrue d'usinage des matériaux composites par rapport aux métaux traditionnels. En second lieu, on parle de la **légèreté** qui est l'un des atouts majeurs que possèdent ces matériaux : la masse volumique de ces matériaux est assez faible d'où leur forte utilisation dans le domaine aéronautique et aérospatial (*x % d'appareils spatiaux sont fait de matériaux composites*). Comme troisième avantage des matériaux composites, on peut citer l'intégration fonctionnelle : Il est possible de choisir la formulation de résine (matrice) ou les types renforts en fonction de l'application dans laquelle sera utilisé le matériau [1]. De ce fait, il devient alors indispensable pour les chercheurs dans le domaine des matériaux de rechercher des nouveaux types de renfort et même d'apporter des meilleures caractéristiques mécaniques aux matériaux. Dans cette lutte devenu planétaire, le Cameroun n'est pas en reste car au regard des multiples plantes à fibres et à particules végétales dont dispose ce pays nos recherches porteront sur l'élaboration d'un matériau composite de haute performance.

Hypothèse de la recherche

Es ce qu'il est possible d'obtenir des panneaux de particules a base des coques de noisettes avec une résine époxyde ayant une résistance mécanique suffisante ?

Les objectifs

Ce projet vise à mettre sur pied la production des panneaux de particules à hautes performances, de petites et moyennes dimensions à base des coques de noisettes et d'en déterminer les propriétés physiques, mécaniques afin de l'utiliser dans le domaine automobile, de la construction, et répondant aux exigences environnementales et industrielles de sécurité et la réduction des coûts dans un environnement fortement concurrentiel.

Plan de travail

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Le chapitre un nous donne l'état de l'art sur les matériaux composites tout en mettant un point d'honneur sur ceux renforcés par des particules ; suivi de l'étude des panneaux de particules lignocellulosiques et présente par la suite une généralité sur le renfort utilisé (coque de coula edulis).

Le chapitre deux décrit les différents matériels et la méthodologie de fabrication de panneaux de particules ainsi que les méthodes applicables pour la caractérisation des performances du matériau conformément aux normes en vigueur.

Enfin, le troisième chapitre fait une analyse de synthèse des résultats obtenus par les différents procédés décrits au chapitre deux.

CHAPITRE I : REVUE DE LITTERATURE

I.1. GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES.

I.1.1. Définition générale d'un matériau composite

Un matériau composite peut être défini comme l'association d'une ou de plusieurs phases discontinues réparties dans une même phase continue. L'assemblage final donne un nouveau matériau dont on attend des propriétés supérieures à celles qu'auraient les constituants élémentaires pris séparément. Dans une terminologie issue du vocabulaire de la résistance des matériaux, les constituants de la phase discontinue sont appelés de manière générique « renforts ». Le rôle essentiel des renforts est d'assurer la tenue mécanique du composite. La phase continue est appelée « matrice ». En premier lieu, la matrice garantit la cohésion de la structure et la transmission des efforts mécaniques aux renforts. Elle fournit également une protection à ces derniers contre diverses agressions chimiques qui pourraient provenir de l'environnement extérieur. D'un point de vue général, les matériaux qui constituent la matrice peuvent être des métaux, des céramiques ou des polymères. On peut utiliser des renforts de type particulaire ou fibreux (fig. I-1). On distingue les fibres courtes (longueur : 0,1 mm à 1mm), longues (longueur : 1 mm à 50 mm) et continues (longueur supérieure à 50mm). Dans la suite, nous ne nous intéresserons qu'à la famille de composites faisant l'objet de ce projet : composite à particules et matrice polymère.

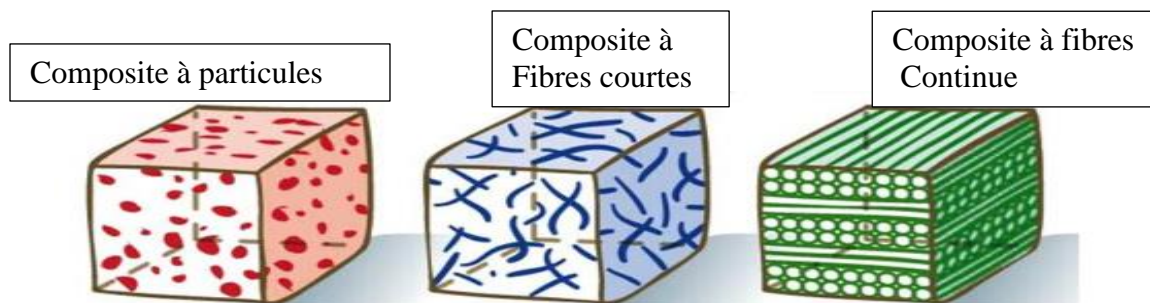


Figure. I 1 : Représentation schématique d'un matériau composite de type particule matrice, fibres courtes matrices et fibres continues matrices [1].

Schématiquement, les propriétés des matériaux composites dépendent :

- Des propriétés des constituants élémentaires ;
- De la distribution géométrique des renforts par exemple s'ils sont constitués de fibres de leur orientation ;
- Des interactions éventuelles entre les constituants : qualité de l'adhésion entre la matrice et les renforts.

I.1.2. Définition des matériaux composites multicouches

Un matériau composite est une combinaison de deux matériaux distincts que l'on appelle généralement la matrice et le renfort, aux propriétés souvent complémentaires qui associés possèdent des caractéristiques physiques complètement différentes de leurs composants [2]. Les matériaux composites sont des matériaux solides, hétérogènes et anisotropes [3]. Il faut différencier charges et renforts. Les charges sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés. [4].

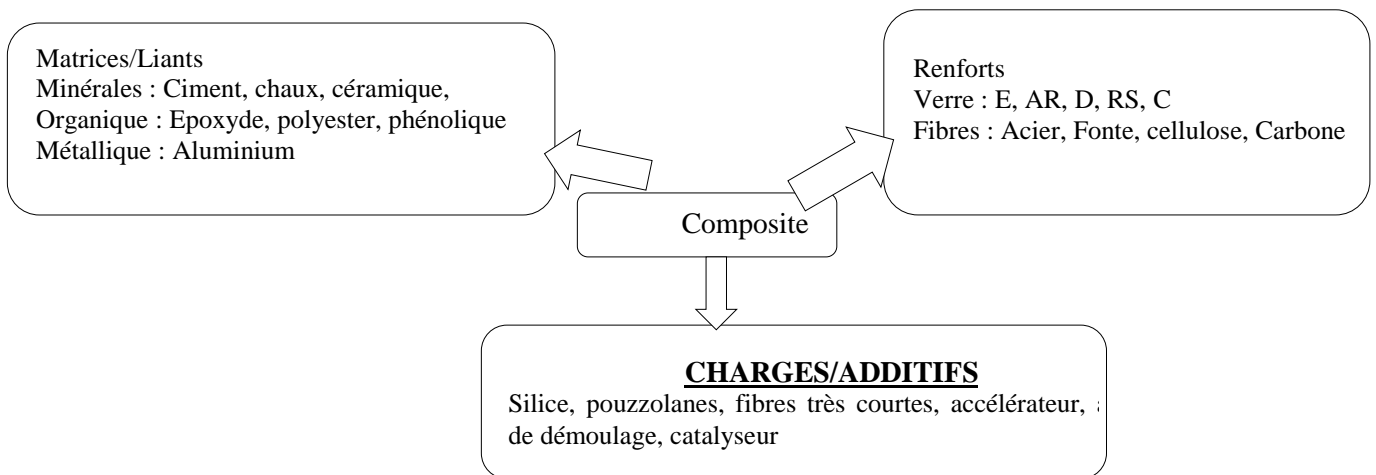


Figure I.2. Composition d'un matériau composite [5].

I.1.3. Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants, suivant la nature des composants et le type du matériau composite [8], [6], [9], [10].

I.1.3.1. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

I.1.3.1.1. Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibre si le renfort se trouve sous forme de fibre. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc.

L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés des matériaux composites pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécaniques et physiques en jouant sur la nature des constituants, la proportion des constituants et l'orientation des fibres suivant le cahier de charges imposés. L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques.

I.1.3.1.2. Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule par opposition aux fibres ne possède pas de dimensions privilégiées. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices comme : la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charge pour réduire le coût du matériau, sans diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice particules dépend des propriétés souhaitées. Les cermets sont des exemples de composites métal-céramique à particules adaptés à des utilisations à température élevées. Par exemple : les cermets à base d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée et pour les protections à haute température. Egalement, des particules d'élastomères peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragile de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc par diminution de la sensibilité à la fissuration. Notre travail pratique sera essentiellement consacré à l'étude de ce type de matériau.

La figure.I.3 ci-dessous montre une représentation schématique de différents types de matériaux.

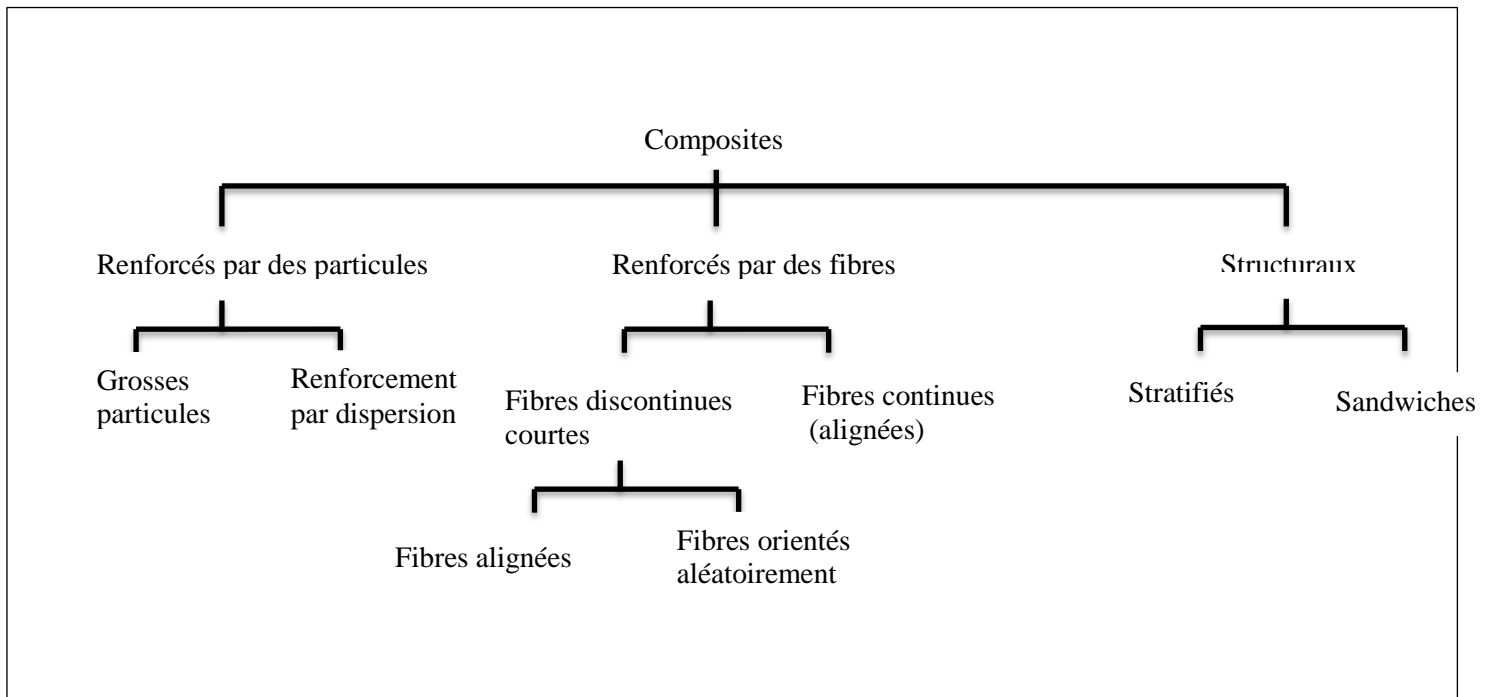


Figure I.3. Schéma de différents types de matériaux composites [13].

I.1.3.2. Classification suivant le type de matériau composite

En fonction des performances mécaniques souvent rapportées à la densité, on a introduit la notion de composite grande diffusion et de composites hautes performances [11].

I.1.3.2.1. Composites de grande diffusion (GD)

Ils représentent 95 % des matériaux composites utilisés. En général, ce sont des plastiques armés ou des plastiques renforcés dont le taux volumique de renfort avoisine 30 %. Les principaux constituants de base sont les résines polyesters (résines thermodurcissables) avec des fibres de verre. Les demandeurs les plus importants sont l'industrie des transports (Automobile, ferroviaire) et la construction électrique destinée à des fabrications en grande série souvent très automatisé.

I.1.3.2.2. Composites haute performance (HP)

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique. Leurs propriétés mécaniques, résistance et rigidité, sont largement supérieures à celles des métaux. Les constituants sont des résines époxydes renforcées par des fibres longues de verre mais surtout de carbone ou d'aramide dont le taux de renfort est supérieur à 50 %.

I.1.4. Eléments constituant d'un matériau composite

Un composite est un matériau qui diffère des matériaux macroscopiques homogènes habituels comme les métaux et les polymères. Il comprend des fibres continues ou coupées d'un matériau résistant (renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. Il existe plusieurs types d'arrangement de fibres. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures [6].

I.1.4.1. Matrice

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites. C'est un matériau organique léger, facilement déformable, qui revêt trois fonctions principales : la répartition de la charge mécanique sur tous les renforts, la cohésion des fibres pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble et la protection des renforts vis à vis du milieu extérieur (chocs thermiques ou mécaniques). La matrice doit avoir une masse volumique faible afin de conserver au composite des caractéristiques mécaniques élevées [14], [15].

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres et lie les fibres du renfort entre elles tout en assurant la répartition de la contrainte : c'est « l'emballage ». Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiquement élevées [16]. Les résines polymères les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables (TD) et les résines thermoplastiques (TP). Ces deux types de polymères diffèrent par leur structure moléculaire et par leur comportement.

Il existe d'autres catégories de résines : les résines thermostables et les polymères thermoplastiques qui peuvent résister à des sollicitations thermiques continues de 200°C et même plus. Toutefois, l'usage de ces résines reste spécifique, ce qui limite leur fabrication. La figure 4. Représente les différentes familles de matrices.

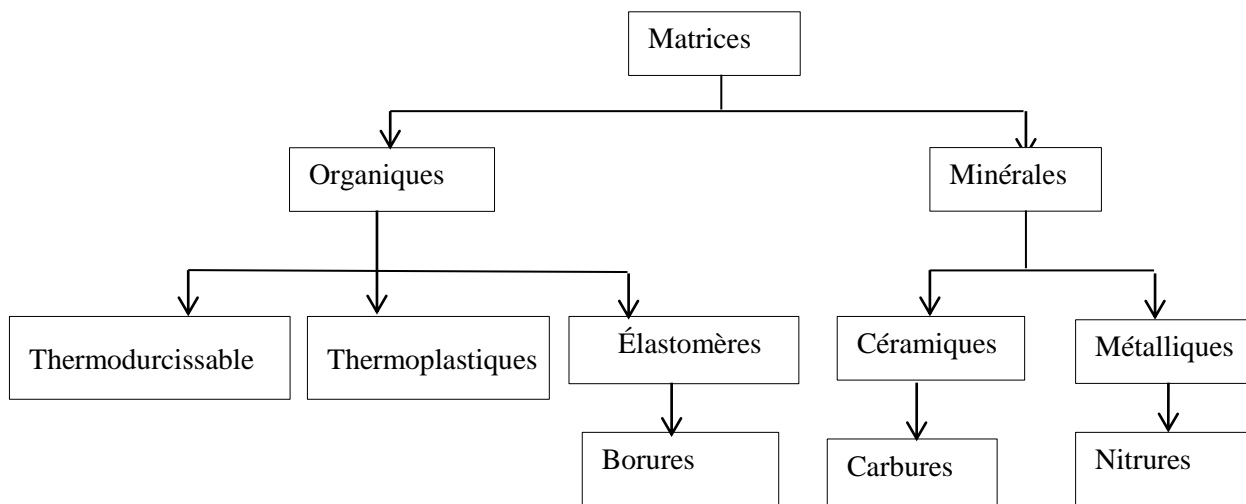


Figure I.4. Différentes familles de matrices [1-7].

I.1.4.2. Résines thermodurcissables (TD)

Ce sont des polymères qui après traitement thermique se transforment en produits essentiellement infusibles et insolubles.

Ces résines ont la particularité de n'être mise en forme qu'une seule fois (processus irréversible). Ces résines sont exceptionnellement utilisées avec renforts du fait de leur fragilité. Aussi, leurs caractéristiques thermomécaniques élevées font qu'elles sont les plus employées actuellement. Les principales résines thermodurcissables utilisées sont [6] : les polyesters insaturés (polyester condensé, vinylesters, etc...), les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, etc...) et les résines époxydes donc nous utiliserons dans notre étude.

Contrairement aux composites GD, les demandeurs intéressés par leurs caractéristiques mécaniques et thermiques élevées mais aussi par des séries de productions très faibles sont : l'industrie aéronautique, spatiale, l'automobile sportive et les chantiers navals. Elles ont une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques et un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée.

Des remplisseurs ou charges sont employés en polymères pour une variété de raisons à savoir : réduire le coût, améliorer le traitement, la densité de commande, la conductivité thermique, la dilatation thermique, les propriétés électriques, les propriétés magnétiques, le retard de flamme, et pour améliorer les propriétés mécaniques [18]. En général, les remplisseurs peuvent changer l'exécution des composés de polymère en changeant la couleur, la viscosité, les propriétés de barrière, les propriétés électriques et thermiques, la finition de surface, le rétrécissement, etc... .

Les résines thermodurcissables principalement utilisées sont les suivantes :

- Résines époxydes : font l'objet de notre étude ;
- Résines phénoliques : sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol. Elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée ; c'est pour cette raison qu'on les utilise dans des transports ferroviaires. Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité et difficiles à mettre en œuvre ;
Résines polyamides ;
- Résines polyesters : se présentent sous forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.

Le tableau suivant présente une comparaison entre ces types de résines :

Tableau 1. Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [19].

	Polyesters	Phénoliques	Epoxyde	Polyamides
Caractéristiques mécaniques	Moyenne	Faible	Très bonne	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
Pouvoir adhésif	Moyenne	Moyenne	Très bonne	Très bonne
Température maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Durée de polymérisation	Courte	Courte	Longue	Moyenne
Mise en œuvre	Très faible	Difficile	Facile	Difficile

a) Résines polyester insaturé

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur.

Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel puis à l'état de solide infusible. La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante. La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique ([20], [10]). Il existe différents types de résines [1], [21] :

- Orthophtalique : la plus courante ;

- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
 - Chlorée : elle est bromée, dite ignifugées ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Suivant le module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide.

b) Résines époxy

Elles sont préférentiellement utilisées pour les composites hautes performances. Elles possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et un bon comportement chimique. Par contre elles sont sensibles à l'humidité ainsi qu'aux rayons UV et ont un coût encore très élevé [6].

L'époxy ou scientifiquement nommé poly époxyde est un thermodurcissable composé d'une résine dite pré polymère qui contient des monomères dont les fonctions époxydes sont les groupements réactifs de la résine et le durcisseur permettant l'ouverture du cycle époxy et la liaison entre les monomères [22]. Pour cela, les durcisseurs doivent posséder au moins deux fonctions pouvant réagir avec le pré polymère en déclenchant la copolymérisation (réaction de polycondensation) de la résine et en formant un réseau tridimensionnel non cristallin et infusible : Ce sont souvent des amines ou des anhydrides.

D'autres ajouts peuvent être additionnés et sélectionnés selon le domaine d'application des résines telles que les diluants qui sont utilisés dans la formulation de la résine époxy pour réduire la viscosité ou éliminer les solvants.

Ces ajouts permettent à la résine époxyde d'être la famille la plus polyvalente des résines (peuvent être facilement modifiées) pour avoir des propriétés différentes. Cette modification peut être réalisée par :

- La sélection d'un pré polymère approprié ou une combinaison de différentes familles de pré polymère ;
 - La sélection d'un agent de durcissement et de mécanisme de réaction associé ;
 - L'addition simple des charges organiques ou inorganiques et les composantes [23].

Selon le nombre de fonctions époxydes que possède le prépolymère (2, 3 ou 4), celui-ci est bi, tri ou tétra-fonctionnel. Il existe de nombreux pré polymères époxydes, le plus connu d'entre eux étant la DGEBA ou DiGlycidyl Ether du Bisphénol A.

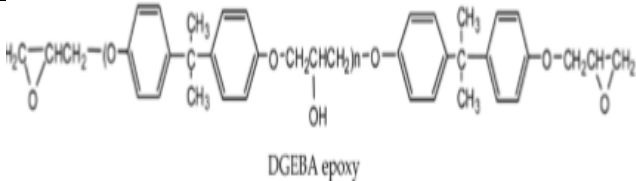
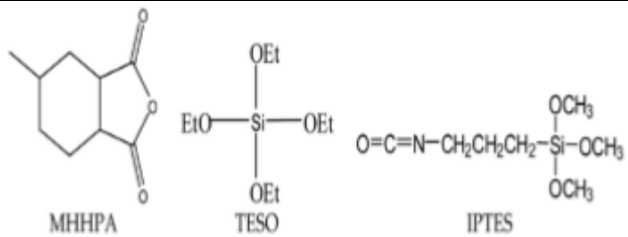
C'est le premier prépolymère époxyde apparu sur le marché, et le plus répandu, puisqu'il constitue, à lui seul, 95 % de la production mondiale [24].

Tableau 2. Les Caractéristiques physico-mécanique des résines époxyde [25].

Caractéristiques physico-mécaniques de résines époxydes	
Masse volumique	1100 à 1500 kg/m ³
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	(2 à 5)%
Résistance au cisaillement	30 à 50 MPa

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisons très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures) à des températures relativement élevées (50 à 100°C).

Tableau 3 : Caractéristiques chimiques utilise de DGEBA n=2, MHPA, APTES ET de TEOS [20]

Réactifs	Structure chimique de DGEBA	Propriétés Physiques
Pré polymère DGEBA	 <p>DGEBA epoxy</p>	n=0,15 M=380g/mol d=1,169 f=2
L'isophorone diamine	 <p>MHPA TESO IPTES</p>	M=170g/mol d=0,92 g=4

I.1.4.3. Résines thermoplastiques (TP)

Ce sont des résines qu'on appelle communément les plastiques fréquemment utilisées sans renfort et qui possèdent la propriété de pouvoir être mise en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement dans un intervalle de température spécifique au polymère étudié. Dans les matériaux thermoplastiques, les différentes molécules ont une structure linéaire et il n'y a aucun produit chimique liant entre eux. Ces molécules s'associent par des forces de Van der Waals, interactions de dipôle-dipôle, liaison d'hydrogène et égalisent l'empilement des anneaux aromatiques. Le thermoplastique peut être ramolli et fait pour couler avec l'application de la chaleur et de la pression pendant que l'interaction faible entre les molécules peut être

temporairement décomposée. Quand le matériau est alors refroidi, les molécules reconstituent la liaison secondaire entre elles et il se solidifie. En raison de cette facilité de fabrication et de formabilité, les matériaux thermoplastiques sont largement répandus dans une variété de produits [13].

Parmi les matrices thermoplastiques, on trouve :

- Le polyéthylène (PE) ;
- Le polypropylène (PP) ;
- Le poly (acétate de vinyle) (PAV) (colles à bois et autres adhésifs) ;
 - Le poly (chlorure de vinyle) (PVC) (tuyauteries) ;
 - Le poly (méthacrylate de méthyle) (PMMA) ;
 - Le nylon 6,6 (fibres, vêtements) ;
 - L'acétate.

Les matrices thermoplastiques possèdent de faibles propriétés mécaniques. Leur renforcement (le plus souvent par des fibres courtes) confère une meilleure résistance mécanique, une bonne stabilité dimensionnelle ainsi qu'un accroissement de la tenue en température.

Les résines thermoplastiques en revanche peuvent être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. De plus, ces résines présentent l'aptitude à l'état liquide et de se mouler facilement par plasticité.

I.1.5. Charges

I.1.5.1 Charge augmentant la résistance mécanique

L'objectif de l'incorporation des charges augmentant la résistance mécanique est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en [27] :

- Charges sphériques ;
- Charges non sphériques.

I.1.5.2. Charges ayant un rôle secondaire

Les charges ayant un rôle secondaire ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines, soit d'améliorer certaines propriétés secondaires des résines telle que la viscosité [28].

I.1.6. Additifs

Les additifs sont ajoutés en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage ;

- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retrait ;
- Agents anti-ultraviolets.

I.1.7. RENFORTS

Le renfort a pour rôle de supporter l'essentiel de l'effort mécanique appliqué au matériau composite grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique...) [1]. Il se présente sous forme fibreuse ou particulaire selon les utilisations. La recherche de renforts performants s'oriente dans le cas des renforts fibreux à quelques exceptions près vers les verres, carbone, etc... du fait de leurs hautes performances mécaniques et de la relative maîtrise quant à leur élaboration. D'autres fibres sont également commercialisées mais restent peu utilisées du fait de leur mise en œuvre plus complexe et de leur coût plus élevé : fibres multibrins de carbure de silicium, d'alumine et de silice. Les fibres de renforcements des matériaux composites proviennent de deux origines :

- Les fibres minérales : fibre de verre, de carbone, céramiques ;
- Les fibres organiques.

Les qualités importantes recherchées lors de l'introduction de fibres dans une matrice sont en premier lieu un module de Young élevé, une résistance à la rupture élevée et tous deux reliés à la légèreté du matériau.

Les renforts constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 à 0,7 et les structures composites sont anisotropes.

La plupart des renforts travaillent bien en traction mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Il existe différentes géométries et textures de renforts [9] :

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.) ;
- Sous forme de tissu surfacique (tissus simples, mats, etc.) ;
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une faible masse volumique, une bonne compatibilité avec les résines et une facilité de mise en œuvre [8]. En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses, comme indiqué sur la figure 5.

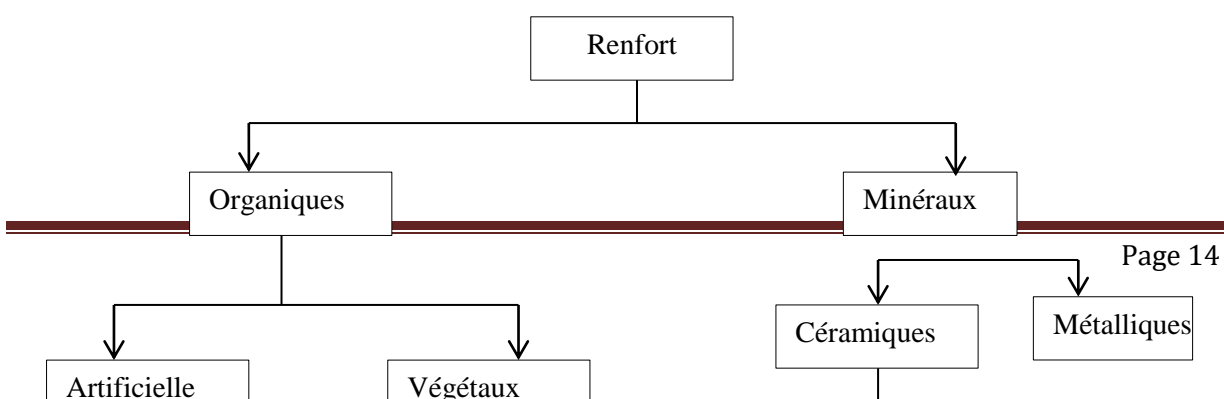




Figure.I. 5. Les différents types de renfort de base [8].

Les propriétés physiques et mécaniques sont fortement influencées par la nature des fibres. La forme du renfort est fonction de l'application et du volume des pièces à réaliser. Elle permet de distinguer deux grandes familles.

I.1.7.1. Renfort en fibres discontinues

Des fibres courtes ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids).

I.1.7.2. Renfort en fibres continus

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP, cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevé que ceux du même matériau massif avec une augmentation de la longueur de 10000 fois ou bien pour le même volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre [29]. Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts : unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D), tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).

I.1.7.3. Géométrie des Renforts

-D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues (longueur comparable aux dimensions de la pièce, figure 6 a) ;
- Les fibres courtes (de longueur faible devant les dimensions de la pièce, figure 6 b),
- Les particules ou charges renforcâtes (figure 6 c).

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts sont

des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement.

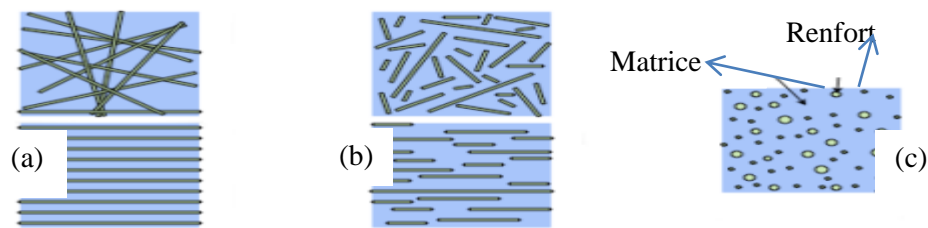


Figure. I. 6. Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules [1].

I. 1.8. Procèdes de fabrication des composites.

Les techniques plasturgistes sont les plus fréquemment utilisées dans la mise en forme des matériaux composites. Elles ont pour point commun la réalisation du mélange des matières premières à une température correspondant à une phase ramollie des plastiques. Ce mélange à chaud (meltblending) est obtenu de plusieurs manières et conduit à différents modes de fabrication.

Parmi ces procédés de mise en œuvre, on distingue :

- Le moulage au contact ;
- Le moulage par compression de mat pré-imprégné ;
- Le moulage par injection de compound ;
- Le moulage par injection basse pression de résine.

Pour la fabrication des composites, il existe plusieurs méthodes. On en présente ici quelques-unes avec leurs principes tirées de [38, 39,40] Ces méthodes sont généralement faciles à exécuter et demandent un coût d'investissement faible en matériels.

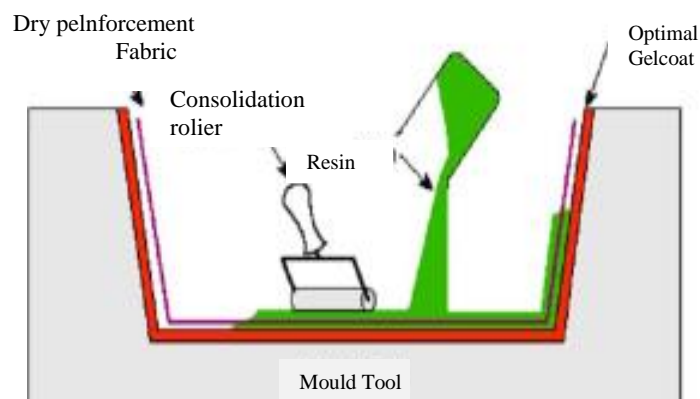


Figure .I. 7. Moulage au contact [1]

I.1.8.1. Moulage par projection

Dans cette méthode, la résine et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme.

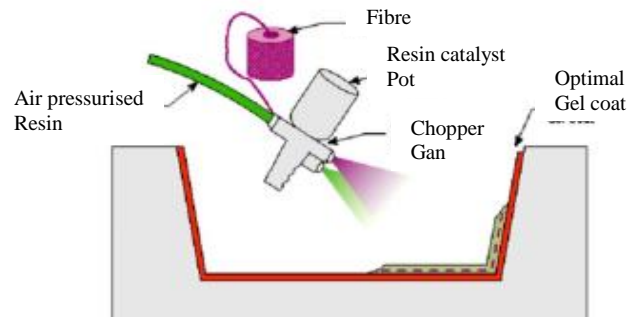


Figure. I. 8. Méthode de projection simultanée [0]

I.1.8.2. Moulage par compression

Le moulage par compression est l'un des procédés les plus économiques pour la production de grandes séries de pièces de petites et de moyennes dimensions. Dans ce procédé, on place une préforme de compound de moulage (résine, renfort, catalyseur et additifs déjà pré-mélangés dans des proportions optimales) dans la cavité d'un moule chauffé et ensuite on la presse aux Dimensions finales. On utilise des pressions qui vont de 0.5 à 15 MPa.

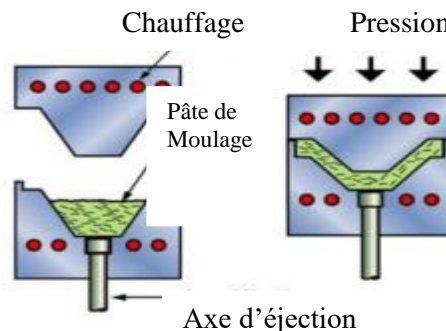


Figure. I. 9. Méthode de moulage par compression [10]

En définitives les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout et connaissent actuellement un essor important dans tous les domaines d'application ; particulièrement dans la construction automobile vu leurs très bonnes performances mécaniques. Leurs caractéristiques mécaniques dépendent : Des propriétés intrinsèques des constituants de base, des distributions géométriques des constituants et de l'interaction entre les différents constituants, etc.

Le choix des constituants de base ainsi que les techniques et le procédé de mise en œuvre ont une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau composite de panneaux de particules qui fera l'objet de notre étude.

I.2. LES PANNEAUX DE PARTICULES LIGNOCELLUSIQUES

Depuis l'Antiquité, l'homme a élaboré des matériaux composites par combinaison de matières de natures différentes dans le but d'obtenir des matériaux aux propriétés spécifiques. De nombreux matériaux naturels lui ont fourni des modèles tels que l'os rigide mais léger, formé de fibres de collagène dans une matrice minérale d'apatite dure et fragile, ou le bois souple mais résistant formé de fibres de cellulose associées à une matrice de lignines et d'hémicelluloses. Ainsi, les torchis et les adobes associant des argiles et des pailles en constituent un exemple pour la construction des habitations depuis la haute antiquité. De même, plus de 2 000 ans avant notre ère, les Egyptiens exploitaient déjà les liants naturels du papyrus pour agglomérer les fibres de ce roseau. Ils connaissaient également le bitume, la poix, la cire d'abeille, l'utilisation de colles naturelles extraites de peaux, de sang, d'os, de poisson, d'œuf ou de lait s'est développée du Moyen-Age à nos jours pour des applications dans l'art et l'artisanat. Les caséines ont été utilisées au début du vingtième siècle pour la fabrication des contreplaqués et des bois lamellés collés. Mais, si les premiers essais d'agglomération de déchets de bois par collage remontent au début de ce siècle, il faut attendre l'apparition des résines synthétiques vers 1930 pour observer les premiers développements industriels de la fabrication des panneaux de particules. Avec l'essor de la chimie de synthèse et en particulier des polymères dérivés de l'industrie pétrochimique, la famille des matériaux composites à fibres apparue dans les années 1940 n'a cessé de se développer en raison de leurs propriétés mécaniques associées souvent à une plus faible densité. Leur bon rapport coût/performance leur a ouvert une très large gamme d'applications comme matériaux de structure ou de parement dans des domaines aussi variés que la construction aéronautique, maritime, ferroviaire, automobile, le bâtiment, l'ameublement, la décoration, le loisir, etc. [7].

Cependant, de nombreuses interrogations sur le développement durable de nos sociétés sont apparues ces dernières années face au risque d'épuisement des matières premières non renouvelables, aux émissions de gaz à effet de serre en particulier de CO₂ responsable de bouleversements climatiques à l'accumulation de déchets solides, d'effluents liquides et de gaz toxiques et leurs effets sur l'environnement et la santé humaine (qualité des sols, des eaux et de l'air). Déjà inscrite dans la perspective d'une réponse au défi du développement durable à travers l'allègement des structures et l'économie de consommation d'énergie fossile et donc de rejet de

CO2 qu'elle génère dans le transport. Les recherches sur l'élaboration de nouveaux matériaux composites sont orientées aussi vers une économie des matières premières non renouvelables et un meilleur recyclage en fin de vie, à travers [1] :

- D'une part, la substitution des fibres synthétiques par des fibres végétales ;
- D'autre part, la mise au point de polymères et de résines à partir de ressources renouvelables ;
- Appliquée au domaine des panneaux de particules lignocellulosiques et au contexte de l'économie togolaise, la démarche nous a conduits à rechercher une source de fibres renouvelable et un liant extractible d'une ressource locale [33].

I.2.1. Généralités sur les panneaux de particules lignocellulosiques

Un panneau composite à renfort lignocellulosique est une combinaison de matériaux fibreux lignocellulosiques et d'une matrice adhésive dans laquelle les composants gardent leur identité, ils ne se dissolvent pas ou ne se mélangent pas complètement. Ces deux composants du composite sont de formes et de compositions différentes à l'échelle macroscopique et peuvent être physiquement identifiables avec leur interface remarquable. Se basant essentiellement sur la norme EN 309 (1992), les panneaux de particules lignocellulosiques peuvent se définir comme des bio-composites en plaque mono ou multi couches d'épaisseur variable fabriqués sous pression et chaleur, essentiellement à partir de particules constitués de copeaux de bois ou d'autres déchets ligneux provenant du façonnage du bois et/ou d'autres matières fibreuses lignocellulosiques (anas de lin, bagasse de canne à sucre, chènevotte de chanvre, etc.) avec ou sans apport de liant [19].

I.2.1.1. Importance économique des panneaux de particules lignocellulosiques

Les panneaux de particules à l'instar des autres composites offrent des propriétés spécifiques qui les rendent très utiles et bien appropriés dans des applications ciblées et diversifiées. D'une manière générale, le composite combine la force du renfort avec la dureté de la matrice pour réaliser un matériau aux propriétés spécifiques souhaitées telles que : grande force, grande résistance, poids modéré, ratio force/poids très élevé, grande ouvrabilité, degré élevé d'intégration à d'autres matériaux et excellente résistance contre les agents chimiques [38].

I.2.1.2. Importance économique des panneaux composites au Cameroun

Le Cameroun n'est pas un pays producteur de panneaux de particules, de panneaux de fibres, de panneaux contre plaqués ni de feuilles de placage diverses. Tous ces types de matériaux sont importés pour la plupart de la chine et en partie d'Europe. Les importations de panneaux de fibres, panneaux de particules, panneaux contre plaqués, de plaqués stratifiés et de feuilles de placage au Cameroun qui étaient dans les années 2000 à 2003 de 572 t.an-1 en moyenne ont augmenté de 46% en moyenne en 2004 et 2005 (soit 834 t.an-1) et de 80 % en moyenne en 2006 (soit 1 500t.an-1)

(DSCN). L'accroissement de l'importation de ce type de matériau s'est accompagné d'une augmentation de 57,5 % des coûts liés à cette activité. Ces importations sont certes modestes, mais elles connaissent ces dernières années un essor considérable du fait d'une explosion des quantités de ce type de matériaux qui entrent dans le pays sous forme de meubles en panneaux de particules revêtus. Il est à signaler que ces matériaux en plaque ayant servi à la confection de ces mobiliers importés de Chine ne sont pas comptabilisés comme panneaux de particules ou panneaux de fibres. [23].

I.2.1.3. Les additifs dans les panneaux de particules lignocellulosiques

Les additifs sont des substances minérales ou des réactifs chimiques qui sont introduits dans la formulation de panneaux pour améliorer leur présentation ou leurs propriétés physicochimiques ou pour augmenter la vitesse de prise des adhésifs. Ce sont des colorants (pigments minéraux, végétaux ou synthétiques) et des tensioactifs (soude) [13].

I.2.2. Classification des panneaux des particules

Les grandes variétés des panneaux de particules conduit à une multiplicité de critères de classification de ces composites.

En effet, la nature et la géométrie des éléments de renfort, la nature et la réactivité de la matrice, la proportion renfort/matrice, la spécificité fonctionnelle des panneaux, les conditions de leur utilisation ainsi que les procédés de fabrication sont quelques-uns des critères de classification des panneaux de particules (EN 309,1992;EN312,2004;ANSI,A208.1,1999). Les panneaux de particules et les panneaux de fibres sont classés suivant la taille des particules, la densité, et le procédé d'élaboration. Ainsi, suivant la taille des particules, on distingue les panneaux de fibres, les panneaux de particules, les panneaux de copeaux, les panneaux de lamelles minces et longues et les contre plaqués. Suivant la densité, il y a les panneaux d'isolation thermique et acoustique de faible densité ($150 \leq \rho \leq 450$), les panneaux de fibres et les panneaux de particules de densité moyenne ($450 < \rho \leq 800$) pour l'ameublement principalement et les panneaux structuraux de haute densité ($\rho > 800$). Suivant le procédé de fabrication, on distingue les panneaux obtenus par voie sèche et ceux produits par voie humide.

La norme EN 309 (1992) définit 6 critères de classification des panneaux de particules : le procédé de fabrication, l'état de la surface, la forme, la dimension et la forme des particules, la structure du panneau et l'usage final du panneau [26].

Suivant le procédé de fabrication, on distingue les panneaux pressés à plat, les panneaux à pressage par cylindre et les panneaux extrudés pleins ou tubulaires.

L'état de la surface des panneaux de particules permet de définir les panneaux bruts non poncés, des panneaux poncés ou rabotés, des panneaux revêtus avec un verni ou une peinture et des panneaux revêtus sous pression avec un matériau solide par placage tels que les panneaux de particules surfacés mélaminés (PPSM) et enfin des panneaux surfacés papier sec ou revêtus d'un stratifié décoratif [36].

Selon la forme, les panneaux de particules sont plats, en forme ou en chant profilé.

La dimension et la forme des particules font distinguer des panneaux de particules arrondies, de particules plates (waferboard), de particules en lamelles minces, longues et orientées (Oriented Strand Board OSB) et des panneaux avec d'autres types de particules comme les anas de lin. Suivant

La structure des panneaux de particules, les panneaux peuvent être monocouche et plus fréquemment "trois couches" ou multicouches avec souvent différents types de particules disposées avec ou sans orientation spécifique. Suivant **l'usage et les conditions d'utilisation** des panneaux, la norme EN 312 définit 7 types de pax de particules :

Ces panneaux peuvent être traités pour en améliorer la résistance vis-à-vis des attaques biologiques pour les ignifuger ou pour leur conférer des propriétés d'isolation acoustique donc les différentes caractéristiques sont données à l'annexe 1.

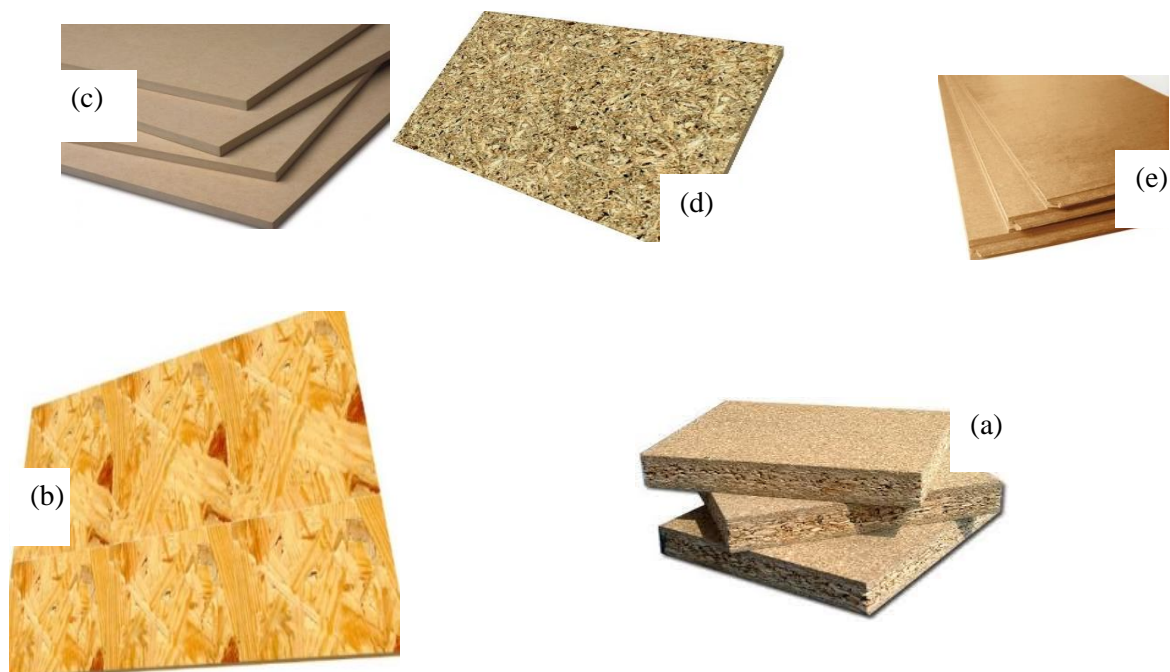


Figure.I.10 *Panneaux de bois : panneaux à particules(a), panneaux de copeaux (b), panneaux MFD (c), panneaux OSB (d), contreplaqué (e) [40].*

I.2.3. les procédés de fabrication des panneaux de particules lignocellulosiques

Les panneaux de particules mis au point en 1940 dans le but d'utiliser les déchets de bois connaissent aujourd'hui un essor important avec la mise au point et le développement de nouveaux procédés de fabrication. D'une manière générale, la fabrication des panneaux de particules se fait en 4 étapes principales : le fractionnement, l'imprégnation, le formage et la finition [28].

I.2.3.1. La préparation du matériel ligneux

La préparation du matériel fibreux se fait suivant le type et les caractéristiques des panneaux ciblés. Cette préparation peut donc consister en un simple fractionnement mécanique (simple découpe du matériau lignocellulosique en copeaux ou simple broyage dans le cas des panneaux de particules traditionnels) ou en un défibrage thermomécanique (dans le cas des panneaux de fibres). Ce dernier peut dans certains cas être précédé d'une attaque chimique ou enzymatique. Quel que soit le procédé de fractionnement utilisé, le matériel fibreux obtenu est séché et classé afin d'obtenir des fragments ou particules homogènes.

I.2.3.2. L'imprégnation du matériel fibreux avec la résine ou l'encollage

Cette étape consiste en un mélange du matériel fibreux avec la matrice liante. Elle est réalisée par pulvérisation de la résine en suspension colloïdale dans l'eau et dans un mélangeur contenant la matière fibreuse. La répartition de la résine est un facteur déterminant pour la qualité des panneaux. Signalons le cas particulier de la fabrication des panneaux de fibres pour lesquels les liants peuvent être injectés en sortie du raffineur thermomécanique sous pression avant l'étape de séchage des fibres sous courant d'air chaud (flash-drying). Dans le cas des matrices thermoplastiques, le mélange peut être réalisé par incorporation des fibres dans le polymère en phase fondue (compoundage). Les particules ou fibres ainsi encollées sont alors distribuées pour former un matelas (ou MAT) d'épaisseur contrôlée ou introduites dans un moule [7].

I.2.3.3. La mise en forme ou formage

Les techniques de mises en forme des panneaux de particules peuvent être classées en trois grandes catégories : le thermo pressage, le thermoformage et le moulage.

Le thermo pressage

Le thermo pressage consiste à la fabrication de panneaux de particules par compression de mat dans un moule avec application de la chaleur en présence d'un plastifiant éventuellement.

Le thermoformage

Le thermoformage est une méthode de production de panneaux de particules en deux phases qui consiste à faire acquérir sous l'action de la chaleur et de la pression une forme particulière à un matériau fibreux précédemment pressé en plaque. Le matériau de base est ramolli sous l'effet de la chaleur puis mis en forme sur un moule de forme simple. Le thermoformage de plaques lignocellulosiques pré-pressées peut se faire sous pression, par drapage, sous ventilation libre ou par simple collage de feuilles. Cette voie a été souvent utilisée pour la mise en forme des panneaux intérieurs des portières des automobiles [3].

Le moulage

Le moulage est un procédé de mise en forme qui consiste à introduire dans un moule le mélange amorphe ou pulvérulent qui durcit ou se consolide en adoptant la forme de l'intérieur du moule. La consolidation se fait par simple séchage, par refroidissement (pour les matrices thermoplastiques) ou par apport de chaleur ou d'un précurseur physique ou chimique qui amorce la réticulation des matrices thermodurcissables.

Le moulage par compression et le moulage par stratification sont les procédés les plus adaptés au moulage des particules [11].

I.2.3.4 La finition

La finition des panneaux de particules intervient après le démoulage. Elle concerne les opérations visant la stabilité dimensionnelle des panneaux (traitements contre la prise d'humidité), la mise au format par sciage, ponçage, découpe et conditionnement et les traitements post-formage tels que la peinture, l'enduction de vernis, de produit de protection contre les agressions biologiques, et le placage.

I.2.4. Caractérisations mécaniques des panneaux de particules

La garantie de qualité et de performance des panneaux de particules exige de ces derniers des propriétés mécaniques stables et qui soit effectivement conformes aux utilisations auxquelles ils sont destinés. Suivant leur domaine d'application et les conditions spécifiques de leur utilisation, les panneaux de particules doivent donc satisfaire à des exigences mécaniques générales et des exigences spécifiques qui sont régies par les normes notamment les normes européennes EN 312-1 à EN 312-7 ou les normes américaines ANSIA 208.1. Ainsi, quel que soit le type de panneaux de particules, les exigences générales concernent la stabilité dimensionnelle dont la méthode d'essai est régie par la norme EN 324-1, la teneur en humidité (EN 322), la tolérance de la masse volumique (EN 323) et le potentiel d'émission de formaldéhyde (EN 120).

La nature des tests physiques et mécaniques auxquels les panneaux de particules sont soumis dépend du type et de la norme de certification utilisée. Ainsi, selon la norme EN 312, en plus des exigences générales, seules la résistance à la flexion (EN 310) et la cohésion interne (EN319) sont requises pour les panneaux de type P1. Pour les panneaux P2, la mesure de module d'élasticité en flexion (EN 310) et les tests d'arrachement de surface (EN 311) sont exigés en plus des paramètres requis pour les panneaux P1. Les valeurs de résistance à la flexion, de module d'élasticité en flexion, de cohésion interne et de gonflement en épaisseur après immersion (EN 317) sont requises par la norme EN 312 pour tous les autres types de panneaux. Par contre la norme ANSI 208.1 requiert la mesure de tous les paramètres cités plus haut quel que soit le type de panneau [12].

I.2.4.1. Découpe des panneaux de particules

Chaque panneau de particules est découpé suivant les recommandations de la norme NF-EN326-1 (1993) en éprouvette de dimension 150 mm x 50 mm pour les essais en flexion trois points et de 50 mm x 50 mm pour les essais de cohésion interne et de gonflement en épaisseur. Avant tout essai mécanique, chaque éprouvette est conditionnée dans une enceinte de conditionnement pendant 14 jours à 20 °C et sous une humidité relative de 65 % [19].

I.2.4.2. Détermination de la densité des panneaux de particules

La densité d'un panneau de particules est déterminée suivant les exigences de la norme NF EN 323 sur les éprouvettes de dimension 150 mm x 50 mm La densité apparente est la moyenne des densités mesurées sur les éprouvettes de chaque panneau. Cette densité apparente est le rapport de la masse de chaque éprouvette par son volume [26].

I.2.4.3. Mesure des propriétés de flexion des panneaux de particules

Conformément à la norme NF-EN 310, six éprouvettes de dimensions 150 mm x 50 mm de chaque panneau de particules ont été employés pour déterminer la résistance mécanique en flexion trois points. Le module d'élasticité en flexion (MOE) et de résistance à la flexion (MOR) est calculé suivant les formules suivantes [30].

Nous constatons dans cette partie l'importance de la matière lignocellulosique dans l'élaboration des panneaux de particules et le processus de fabrication d'un panneau ainsi que l'influence de certains paramètres et méthode d'élaboration des panneaux sur leurs caractérisations physiques et mécaniques.

La fabrication des panneaux de particules s'est beaucoup développée ces dernières années et exigent des nouveaux matériaux (renforts) de haute performance ; la valorisation de nos

déchets agricoles. Ce qui à faire pousser notre orientation sur les coques de *Coula edulis* utilisé comme renfort dans nos recherches.

I.3. GENERALITE SUR LE RENFORT (coques de *Coula edulis*)

II.3.1. Introduction

Les produits forestiers non ligneux (PFNL) représentent un enjeu alimentaire, culturel et économique considérable pour les populations d'Afrique centrale. Beaucoup d'espèces produisant des PFNL restent cependant scientifiquement peu étudiées à l'instar de *Coula edulis*. Les connaissances encore fragmentaires montrent que les fruits de cette espèce à usages multiples sont régulièrement consommés et commercialisés par différents groupes ethniques. La culture de *Coula edulis* est pourtant très limitée notamment à cause du faible taux de germination de ses graines. Son bois renommé pour sa résistance aux termites est utilisé localement comme matériau de construction. Les recherches sur les propriétés mécaniques du bois ont confirmé ses potentialités technologiques qui pourraient conduire à revendiquer pour cette espèce une place de choix parmi les essences commerciales. Mieux connus, les potentiels de *Coula edulis* pourraient permettre d'envisager une gestion durable conciliant exploitation du bois et production alimentaire [35].

I.3.2. État des connaissances sur *Coula edulis*

I.3.2.1. Distribution et densité(Population)

Coula edulis est largement répartie dans la zone forestière de l'Afrique occidentale et centrale depuis la Sierra Léone jusqu'en République Démocratique du Congo (Vivien et al, 1996). Elle appartient selon White (1983) à la phytochorie du domaine guinéo-congolais.

Les nombreuses appellations vernaculaires qui désignent *Coula edulis* – en Côte d'Ivoire, au Nigeria, au Cameroun, au Gabon, au Congo et en République Démocratique du Congo – témoignent tout à la fois de l'étendue de son aire de répartition et de son importance pour les populations locales d'Afrique de l'Ouest et centrale.

Cette espèce est relativement abondante selon Hawthorne (1995) au Ghana car les densités peuvent atteindre 2 000 tiges· ha⁻¹ (dhp > 5 cm). En zone Bakola du sud-ouest du Cameroun, la présence de petits bosquets de noisetiers. Dans la forêt de Nsork en Guinée Équatoriale s'enterre et ont estimé à 6,3 pieds· ha⁻¹ la densité des tiges de diamètre compris entre 10 et 30 cm et à 4,4 pieds·ha⁻¹ celles ayant plus de 30 cm de diamètre [22].



Figure I. 11 : présentation d'un tronc (b) d'arbre de *coula edulis* et les feuilles(a)
[24]

I.3.2.2. Description

Coula edulis est un arbre de la famille des **Olacacées**.

Le genre *Coula* est mono spécifique et proche du genre *Ochanostrachys* d'Asie tropicale et du genre *Minquartia* d'Amérique du Sud (Keay et al. 1964). La description de *Coula edulis* s'inspire des travaux botaniques de **Louis et al. (1948)**. C'est un arbre moyen de l'étage inférieur de la forêt et du sous-bois atteignant 30 m de hauteur. Le fût à empatement ou cannelé à la base est tortueux, irrégulier ; il est souvent ramifié dès 3 ou 4 m du sol. Le diamètre peut occasionnellement atteindre 1 m. L'écorce grise épaisse d'un(1) cm est fendillée et s'exfolie en plaques épaisses souvent rectangulaires la tranche est fibreuse, cassante, brun-jaune et exsude de très fines gouttelettes blanches surtout chez les jeunes arbres car l'arbre comporte dans l'écorce et les feuilles des lacunes résinifères schizogénèse et des canaux laticifères. La cime est très branchue, très feuillue, à couvert épais. *Coula edulis* est une espèce dont les arbres se développent selon le modèle architectural de Roux : les ramifications plagiotropes (branches horizontales) apparaissent de manière continue à chaque nœud du tronc [31].

Les feuilles persistantes sont alternes, simples (10-25 x 4-10 cm), à limbe glabre vert brillant dessus et à poils roux dessous, acuminées, à nervures médiane et secondaires (10-13 paires) proéminentes à la face inférieure. Le pétiole est long de 1 à 3 cm. Les jeunes feuilles

et les jeunes rameaux sont couverts d'une fine pilosité couleur rouille constituée par des poils étoilés qui disparaissent chez les feuilles adultes. Les inflorescences se présentent en grappes axillaires multiformes, longues de 2 à 7 cm. Le pédicelle est long de 2 mm environ, court, épais, pubescent et roux et se situe à l'aisselle d'une bractée. Les fleurs (4-) 5 (-6) -mères sont hermaphrodites, blanc-jaunâtre ou légèrement rougeâtre (2 à 5 mm). Les sépales sont soudés en cupule à bord supérieur ondulé, à purulence rousse externe. Les pétales sont libres, dressés ou réfractés exserts, valvaires, pubescents extérieurement. Les étamines 4 fois plus nombreuses que les pétales sont réparties en 4 cycles. Le filet est plus ou moins fortement appliqué dans les cannelures de la face interne des pétales, de forme et de taille variable. L'anthère contient 2 loges à fentes de déhiscence latérales. Le style est court, de forme conique terminé par un stigmate trilobé. Les fruits sont des drupes globuleuses ou ellipsoïdes, glabres (de 3,5 à 5 cm de diamètre), vert-jaunâtre à maturité, pesant en moyenne 35 g. Le noyau de forme arrondie et fait d'un endocarpe dur, brun et épais (diamètre 2 à 3,5 cm), couvert de petites saillies dans trois directions. A partir du sommet, il présente un fort épaissement. L'amande est unique, sphérique (diamètre 1,5 à 2,5 cm), huileuse, blanche et pèse 10 à 15 g.



Figure. 1. 12. Fruit de *coula edulis* [43,42] fruit à état humide(a) fruit sec (b)

I.3.2.3. Écologie et dynamique de *Coula edulis*

Écologie. *Coula edulis* semble inféodé à la forêt dense humide sempervirente d'Afrique de l'Ouest et centrale (Vivien et al, 1996) avec une présence parfois signalée dans les

peuplements semi-décidus. *Coula edulis* semble en outre préférer les terrains argileux et les habitats très humides des forêts sempervirentes humides jusqu'à 700 m d'altitude (Sosef et al. 2004). Adam (1971) signale que le noisetier se rencontre parfois dans les zones montagneuses à fortes précipitations mais sans en préciser l'altitude.

Phénologie. La période principale de floraison se situe en grande saison sèche de juin à aout en Côte d'Ivoire et au Cameroun et de mai à aout au Gabon. La maturation des fruits a lieu en saison des pluies, de novembre à mars en Côte d'Ivoire, de septembre à décembre au Cameroun et de janvier à avril au Gabon (Aubréville, 1959 ; Villiers, 1973 ; Hocketweiler, 1992). Loung (1996) note qu'ordinairement au Cameroun environ 2/5 des arbres adultes fructifient. Quelques pieds se distinguent soit par leur production abondante pratiquement sans amandes avortées soit par la grosseur exceptionnelle de leurs drupes avec un diamètre dépassant la dimension habituelle de 3 à 3,5 cm (Loung, 1996). Les phases de croissance, les périodes de la feuillaison et de la défeuillaison, l'âge de la première floraison et de la première fructification sont mal connus tout comme le temps séparant la fécondation de la maturation des fruits.

Régénération naturelle de *Coula edulis*. La structure des populations de *Coula edulis* au Cameroun s'apparente à une exponentielle décroissante. La densité élevée des tiges de faibles circonférences augure *a priori* d'une régénération régulière et suffisante qui pourrait s'expliquer de deux manières. Premièrement, *Coula edulis* a la capacité de produire des rejets quand le tronc principal est dépérissant (Alexandre, 1979), ce qui assure à l'espèce de fortes densités en forêt naturelle [21].

Germination de *Coula edulis*. Les auteurs (De La Mensbruge, 1966 ; Ng, 1978 ; Alexandre, 1979 ; Miquel, 1987 ; Bonnéhin, 2000) qui se sont intéressés à la propagation du noisetier d'Afrique signalent que sa germination est très lente et très échelonnée (3 à 24 mois) avec un taux de germination jugé très faible (10 à 20 %). Ceci s'expliquerait par le fait que l'endocarpe est extrêmement dur et épais (6 mm environ) et donc par l'existence d'une dormance mécanique. Les travaux de Bonnéhin (2000) montrent que le traitement des graines à l'eau chaude, pendant 15 minutes puis refroidies n'apporte aucune amélioration. Les traitements à l'acide testés se sont avérés inadaptés car ils ont déclenché une lyse de l'amande. La difficulté de germination serait l'une des principales causes de son absence des systèmes agro forestiers locaux (Bonnéhin, 2000). En fait, la germination *Coula edulis* est de type « Durian ». Celle-ci se caractérise par une sortie en crosse de l'hypo cotyle après une ouverture par 2 ou 3 fentes de la coque lignifiée. Pendant ce temps, l'apex de la plantule et les cotylédons foliacés sont encore enfermés dans l'albumen et n'en sortent qu'au bout de 2 à 3 mois (De La Mensbruge, 1966). Une telle germination a été qualifiée par Ng (1978) de suicidaire et de négativement sélective. En

effet, les plantules sont fréquemment sujettes à la pourriture de la tigelle du fait que les cotylédons et l'épi cotyle restent longtemps enveloppés dans l'albumen après la germination (Miquel, 1987 ; Bonnéhin, 2000). De plus, Bonnéhin (2000) a montré dans ses essais que les boutures et les marcottes développaient des cals sans jamais initier de racine, ce qui l'a amenée à considérer *Coula edulis* comme inapte à ce type de reproduction. Ces informations parfois contradictoires et le manque de connaissances sur les exigences écologiques de *Coula edulis* montrent l'importance de déterminer les facteurs externes qui conditionnent sa régénération végétative et sexuée [41].



Figure.I. 13 : La structure de coula edulis [29]

I.3.2.4. *Coula edulis*, un aliment de qualité

Le noisetier d'Afrique est un arbre à usages multiples qui, pour les qualités nutritives de ses graines, figure parmi les plantes alimentaires des populations locales. Quelle que soit l'ethnie considérée, *Coula edulis* est une espèce fruitière des plus importantes, ce que confirment les enquêtes ethnobotaniques menées dans la réserve du Dja (Cameroun) auprès de trois ethnies (Badjoué, Bulu et les Pygmées Baka) par Betti et al. (1998).

Les graines contiennent une amande qui donne une huile jaune, inodore, de saveur suave (Louis et al, 1948). Sa teneur en acide oléique oscille entre 87,1 et 88,7 % de la teneur totale en acides gras. L'amande fournit des protéines, du calcium et des vitamines. Cependant, Adriaens (1951) indique que la production d'une telle huile n'est pas économiquement rentable, puisque la graine ne fournit qu'environ 7 % d'huile (**Tableau 1**). Vivien et al. (1996) signalent que les tourteaux sont d'excellente qualité pour l'alimentation du bétail et renferment de 12 à 17 % de protéines.

Tableau 4 : Données analytiques de la composition de l'huile de *coula edulis* (1965) [37].

CARACTERISTIQUES	ADRIAENS (1951) Cameroun	R.D.C	BUSSON (1965) COTE D'IVOIRE
Composition de la graine (produit sec, en g par 100g)			
Cellulose	-	-	2,4
Extrait éthéré	-	-	25,8
Glucides	-	-	60,4
Insolubilité formique	-	-	9,6
Protides	-	-	9,3
Cendres	-	-	2,1
Minéraux ; Ca et P	-	-	0,18 et 0,27
Teneur en huile de la graine	7,05	7,2	-
Caractères physiques et chimiques de l'huile			
Poids spécifiques à 15, 16, 78°C	0,913	0,8979	0,912
Indice de réfraction à 20°C	-	1,4683	1,4683
indice d'iode	-	86	85
Indice d'acidité	-	20,3	-
Indice de saponification	-	189,5	187
Indice d'acétyle	-	11	-
Acides gras (en % des acides gras totaux)			
Acide palmitique (acide hexadécanoïque 16 :0)	-	1,6	2,5
Acide oléique (acide octadécène 9c oïque-18 :1*9c)	-	87 ,1	88,7
Acide linoléique (acide octadécadien, 9c, 12c oïque-18 :2-9c, 12c)	-	6,7	8,8
Composition du tourteau d'amande (produit sec, en g par 100g)			
Matières minérales	2,36	-	-
Matières azotée	16,25	-	-
Sucres	10,19	-	-
Matières amylacées	22,34	-	-
Cellulose	52,42	-	-

Pendant la période de chute des fruits, les Pygmées du sud-ouest du Cameroun (Baka, Bakola et Medzan) effectuent des tournées quotidiennes pour en ramasser aux alentours du campement résidentiel ou des campements de chasse (Loung, 1996). Le même auteur ajoute qu'en 1984, chacun des cinq ménages Pygmées enquêtés pendant la période de fructification a

rapporté en moyenne 190 kg de fruits de *Coula edulis*. Une partie des amandes rapportées au campement se consomme crue ; l'autre se prépare en « bumbo », à savoir grillée, écrasée et cuite après emballage dans les feuilles de Marantacées ou de bananier. Cette pâte se mange plus aisément que les amandes crues et constitue une collation consistante. Vivien et al. (1996) rapportent qu'en pays Bassa au Cameroun, une recette traditionnelle appelée « koga komol » est concoctée à partir de *Coula edulis* : les fruits sont dépulpés, les noix sont mises à bouillir pour faciliter l'extraction de l'amande ou mises à sécher à l'extérieur au soleil ou à l'intérieur sur sol cimenté et dès que l'amande se rétracte dans la noix, on l'extrait. L'amande est ensuite trempée dans l'eau froide puis écrasée en rajoutant un peu d'eau et d'huile de palme pour ramollir la pâte. Cette dernière est enveloppée dans des feuilles de bananier (*Musa sp.*) passées au feu. Les « boules » de pâte sont cuites à l'eau pendant 20 à 30 minutes, puis mises sur claies dans la cuisine. Elles peuvent être conservées 1 à 2 semaines. Les graines mériteraient d'être utilisées en confiserie, chocolaterie ou pâtisserie (Vivien et al, 1996).



Figure.I. 14 : *coula edulis* fraîche(a), *coula edulis* séché(b), fruits de *coula edulis*(c), endocarpes de *coula edulis*(d) [38]

I.3.3. Les autres usages de *Coula edulis*

Il convient de mentionner ici que divers auteurs n'ont fait que répertorier les propriétés de *Coula edulis*, sans préciser auprès de quelles populations autochtones l'information a été recueillie. Dans la pharmacopée traditionnelle en Côte d'Ivoire, l'écorce de *Coula*. Est utilisée en décoction pour la purgation ou comme lavement et contre les douleurs lombaires ou maux de reins (Téké et al. 2005). Au Gabon, *Coula edulis* est utilisé en médecine traditionnelle pour les pratiques religieuses et pour son bois (Walker et al, 1995). Comme plante médicinale, *Coula edulis* intervient dans le traitement des maladies « du sang », des organes génito-urinaires, de l'appareil digestif et contre des lésions traumatiques. Il est aussi utilisé contre l'anémie, la stérilité, les diarrhées, les ulcères, les blessures et les plaies. Bukola et al. (2008) ont montré que

les extraits éthanoïques des feuilles, de l'écorce, des racines et des fruits ont des effets inhibiteurs sur les microorganismes comme *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* et *Candida albicans*. Sur le plan religieux, Le Roy, en 1944, affirmait que la noix de nkula (*Coula*) joue un rôle rituel chez les Pygmées (ethnie non précisée). Téké et al. (2005) avancent que dans les coutumes de certaines ethnies (non précisées) de Côte d'Ivoire, l'arbre *Coula edulis* servait à protéger les membres d'une famille « de certaines attaques » maléfiques des sorciers du village.

Le bois recherché par les populations locales pour sa longévité sert à faire du charbon de forge et entre aussi dans la construction des cases comme poteaux ou linteaux (Tchatat, 1999). C'est le cas des deux extrémités du « Mbandja » ou case du « Bwiti » (société secrète des Mitsogo du Gabon) qui sont souvent soutenues par des colonnettes sculptées dans du bois de *Coula edulis* (Walker et al, 1995). « Sratu », l'un des noms locaux de *Coula edulis* dans l'ouest et le sud-ouest de la Côte d'Ivoire signifie « arbre » ou « bois du grenier » car il fournit les piliers-soutiens des cases à greniers (Bonnéhin, 2000).

L'utilisation du bois de *Coula edulis* comme bois d'œuvre est marginale malgré ses multiples qualités. Le bois de cœur est brun violacé, généralement d'aspect homogène, parfois veiné de brun foncé. L'aubier, d'une épaisseur de 3 cm paraît plus foncé. Il présente souvent un contrefil, le grain est assez fin. Le bois de *Coula edulis* est lourd et quasi imputrescible, sa densité est en moyenne de 1,01 pour une densité à 12 % d'humidité (Cirad, 2008). Le retrait au séchage est moyen, de l'état vert à anhydre 5-5,1 % dans le sens radial et 9,3-10 % dans le sens tangentiel. Cependant, au séchage, le bois présente des déformations et des risques de fente (CTFT, 1962).

À 12 % d'humidité, la contrainte de rupture en compression est de 78 N·mm⁻², la contrainte de rupture en flexion statique est de 142 N·mm⁻² et le module d'élasticité longitudinale est de 19 490 N·mm⁻² (Cirad, 2008). Le bois se travaille bien mais risque de fendre. Il ne présente pas de difficultés particulières de sciage, de rabotage, de toupillage ou de polissage. Les caractéristiques de clouage et de vissage sont assez médiocres, les clous se tordent le plus souvent quand ils entrent, le bois tend à se fendre, les clous tiennent donc mal. Le bois se colle mal à la caséine, seule colle essayée. *Coula edulis* n'est pas approprié au déroulage. Les rendements en pâte sont faibles.

Le bois est durable, étant résistant aux attaques des champignons, des insectes et plus particulièrement à celles des termites. *Coula* sp. Présente une durabilité et une résistance aux tarets supérieures à celles de l'azobé (*Lophira alata* Banks) et pourrait être utilisé en remplacement de ce bois en piquets d'ostréiculture et en piquets de vigne. Il est utilisable pour la fabrication des piles de ponts et de traverses de chemin de fer, ainsi que pour la production de

charbon de bois. Il est recommandé pour les travaux lourds de menuiserie, les marches d'escaliers, les portes, les cales des bateaux (Jansen, 1974). Le bois pourrait servir dans l'industrie pour la fabrication des fonds de véhicules ou de conteneurs, pour les parquets, les traverses, les charpentes et les poteaux (CTFT, 1962 ; Cirad, 2008).

Entre septembre 1992 et Janvier 1998 ; 28 des 30 familles interrogées au Sud Cameroun ont récolté les noisettes (*coula edulis*). Son bois recherche pour sa longévité et sa résistance aux termites ; est utilisé comme matériau de construction. Le ramassage des fruits a lieu au mois d'aout à septembre. Les arbres ne produisent généralement qu'après un cycle de deux ans (phénomène d'alternance) En République Démocratique du Congo ; en raison de sa richesse en éléments nutritifs il se classe parmi les fruitiers du pays dotés d'un grand potentiel économique (Walter ; 2001). Arbre atteignant 30 m de hauteur et 80 cm de diamètre présent en forêt dense ; la partie de la plante utilisée sont les graines. Sont bois dur et naturellement résistant aux attaques de termites est utilisé en construction les fleurs sont hermaphrodites. La graine est oléagineuse et les amandes renferment 22 A 30 pourcent d'huile. En milieu naturel ; la germination serait favorisée par le passage de la graine dans l'appareil digestif de gros mammifères consommateur de fruit entier. Le taux de germination est faible ; de l'ordre de 0 a20 parce que le noyau est très dur et épais d'où ce noyau nous servira lors de notre étude comme renfort.

I.3.4. Production de *coula edulis* dans le monde

Le produit est connu en Afrique sur le nom de noisettes (*coula edulis*) et en Europe sur le nom de noisette de cervione-*Nuciola di cervioni*. La production des noisettes représente plus de 50 millions de tonne dans le monde la Noisette ne peut être obtenue dans toutes les zones de l'île. La définition de l'aire géographique de production est basée sur les caractéristiques des zones et sur critères favorable pour son développement le noisetier poussé dans les zones humides et fertiles du sud. La Noisette a une forme de cœur aplati. Elle est subsphérique, légèrement comprimée latéralement. Le calibre varie entre 18 et 22 mm La coque est assez épaisse, douce et lisse avec des stries à peine sensibles au toucher. La pointe est recouverte d'une douce pubescence [23,34].

I.3.5. Production de *coula edulis* au Cameroun

Espèce d'Afrique tropicale de la Siéra Leone à la République démocratique du Congo. On la trouve au Cameroun en forêt dense sempervirente et en forêt semi-décidue. Dans les régions du

Sud ; de Centre et une partir du Littorale ; elle ne nécessite pas un sol spécial pour sa croissance [42].

a) Usage des noisettes et ses différentes parties

Fruits : drupes globuleuses ou ellipsoïdes atteignant 3,3 cm ; noyau ligneux ; dur et rugueux.

Grain unique ; blanche ; albuminée. Floraison de janvier à juillet. Fruits murs dès juillet

b) La coque de noisette est une matière recyclée et renouvelable issue du traitement mécanique de la coque de noisette

I.3.6. Processus de récolte des noisettes

La récolte se fait sur une période d'environ 1 à 2 mois. Habituellement ; les fruits sont ramassés au sol. Cependant ; il arrive que l'arbre soit abattu en vue de faciliter la récolte en pratiquant l'égrappage qui consiste à racler avec un peigne les branches du noisetier pour récolte toutes les fruits d'un seul coup. Par ailleurs, la régénération naturelle semble poser quelques problèmes qui ne sont pas encore clairement identifiés.

I.3.7. Processus d'extraction des (coques de coula edulis)

L'extraction de la coque de noisette se fait avec des fruits frais ou secs. Généralement, pour obtenir des graines rondes il faut sécher les noisettes au soleil et parfois dans certaines localités on utilise une technique traditionnelle qui consiste à verser une grande quantité de noisettes sur le grenier à chauffage de bois enfin de mieux recueillir les coques. Le concassage des noisettes s'effectue par l'utilisation des matériaux traditionnels tels que la machette, le couteau, le marteau et la pierre.

I.3.8. Estimation du tonnage de coque de noisettes

La transformation de coula edulis génère environ 20% de déchet sous forme de coques. Ainsi le tableau ci-dessous nous donne une estimation de la quantité en tonne de coques issu du traitement de coula edulis sur 5 ans.

Tableau 5 : Estimation du taux coques obtenu après transformation de coula edulis [27,36].

Année	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	Total
Qte de noisette	2650	3544	1600	3755	5256	16805
Produit en t						
% des coques	826	702	622	756	996	3902

Ce tableau nous montre à suffisance que la production d'environ 16805 tonnes de café entre 2006 et 2010 a générée environ 3902 tonnes de déchets en coques de noisette.

Afin de pouvoir réaliser notre travail, une étude préliminaire sur les noisettes et les panneaux de particules était nécessaire nous avons pour cela dans cette partie présenté l'état de la production de *Coula edulis* en Afrique et plus précisément au Cameroun. Il se peut que la transformation des noisettes génère 30% de poids des noisettes brut en coque ce qui représente près de 3902 tonnes de coque comme déchets en 6 ans qu'on se propose de valoriser dans la production de panneaux de particules. Nous avons présenté les travaux de certains auteurs qui se sont servis de *Coula edulis* et des fibres lignocellulosiques pour la production de panneaux. Ce qui nous a permis d'avoir une idée sur la méthode d'élaboration et les caractéristiques des matériaux composites à obtenir. On se rend compte que les résines les plus utilisés sont les matrices thermodurcissables. Dans la suite de notre travail nous considérons la production de panneaux avec coques de noisette comme renfort et l'époxyde comme liant. Au vu de ses caractéristique physico mécanique élevé par rapport à d'autres résines présenté dans la littérature.

La partie qui suit, sera consacrée aux moyens et méthodes d'élaboration des panneaux de particules ainsi que la caractérisation et discussions des données.

**CHAPITRE II : ELABORATION ET
CARACTERISATION DES PANNEAUX DE
PARTICULES DE COULA EDULIS**

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse principalement à la présentation des différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Premièrement nous avons présenté le matériau de coula-edulis, qui est la coque de noisette produit au Cameroun plus précisément dans la région du Sud, une partie du Centre et en Afrique. D'autre part, nous avons présenté les matériaux qui constituent les panneaux de particules à savoir la résine époxy et la coque de noisette. En deuxième lieu les méthodes d'élaboration des matériaux composites des panneaux de particules ont été présentées. Finalement, les méthodes de caractérisation des structures à panneaux de particules et de leurs constituants ont été présentées.

II.2. Matériel utilisés

II.2.1. Coula edulis (endocarpe de noisettes)

Généralement les matériaux utilisés pour le noyau des panneaux de particules sont des surs de bois, des particules et le bois de balsa mais les développements récents ont abouti à de nouvelles solutions telles que les matériaux naturels avec une morphologie cellulaire [11].

La matière lignocellulosique (Coques de noisettes) utilisée comme renfort dans notre étude provient des déchets de la transformation des fruits de **coula edulis** (figure III-1). Ces déchets représentent plus de 30% du poids de total de coula edulis transformé. Cette matière a été collectée auprès des populations locales qui récolte et transforme coula edulis en commercialisant des fruits.



Figure II-1 : Endocarpe de coula edulis

II.2.1.1. Caractéristique des coques de coula edulis

Les coques de noisettes sont des particules lignocellulosique essentiellement constitué de cellulose, fibre et cendre.

Tableau 6. Caractéristiques de coula edulis

Masse volumique	1610à 2320 Kg/m ³
Dimension de granulé utilisé	2 à 0,125 mm
Comportement aux rayons solaires	Léger jaunissement après une année d'exposition,
Résistance aux acides	Après une heure dans l'acide chlorhydrique concentré de 201.1 gr/litre : aucune désagrégation de l'aggloméré
Résistance à l'eau bouillante durant trois heures	Aucune désagrégation
Effet d'isolation	Isolation thermique et phonique
Particules	Coque de coula edulis

II.2.1.2. Densité apparente

La densité apparente ou la masse volumique apparente est inversement proportionnelle à la porosité d'un matériau. La densité apparente des particules lignocellulosiques issues du broyage de la coque de coula edulis est réalisée en pesant suivant les proportionnalités granulométriques.

a).Expérience

Durant notre expérience, nous avons pesés 10g de coque de coula edulis avec une balance de précision. Après les avoir recouverte d'une couche de paraffine nous les avons pesées en relevant la masse totale, ensuite nous avons plongé cela dans un volume d'eau initiale (V1) contenu dans un récipient en observant une variation du niveau d'eau (V2) d'où le volume occupé (V=V2-V1). Les résultats vont nous permettre de déterminer la densité du renfort par la formule :

$$\text{Masse volumique apparente (g/cm}^3\text{)} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

On numérote les essais suivant la dimension de la particule de coula edulis.

N°1 : Particule de coula edulis de dimension : $P < 0.25\text{mm}$;

N°2 : Particule de coula edulis de dimension : $0,25\text{mm} < P < 1\text{mm}$;

N°3 : Particule de dimension : $1\text{mm} < P$.

II.2.1.3. Taux de gonflement

Durant notre expérience, nous avons pesés 25g de coque broyée dans une balance de précision puis immergée dans l'eau à un volume égal à 250 ml dans un récipient en agitant le tout puis laissée pendant 18h.

Le gonflement est calculé selon la formule suivante :

$$G = \frac{V-V_i}{V_i} \times 100 \quad (2)$$

G : taux de gonflement en %

Vf : le volume occupé par une masse donnée d'échantillon après immersion.

Vi : le volume occupé par cet échantillon à l'état sec avant l'immersion.

II.2.2. Résine Epoxyde

Le terme époxyde désigne une grande variété de prépolymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques qui, après polycondensation avec un durcisseur conduisant à des produits thermo-durcis dont les principales applications concernent le collage et les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone). Les propriétés unique de la résine époxyde telles que la résistance thermique, un excellent produit chimique, un faible rétrécissement, un haut module et une contrainte élevée l'a rendue l'une des matrices les plus importantes utilisées en polymère renforcé de fibres.

La résine époxyde a été durcie avec 2, 4-méthylhexahydrophthalique anhydride (MHHPA). Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont représentées aux tableaux 2 du (chapitre I). Commercialisée par l'établissement SUPER MESURE, Douala rue FOCH 501.



Figure II .2 : Résine Epoxyde 1Kg + 200 durcisseurs

II.2.2.1. Condition d'utilisation de la Résine Epoxyde

Ne pas appliquer lorsque à la température ambiante ou celle du support est inférieur à 10°C ou supérieur à 30°C;

L'humidité relative de l'air doit être inférieure à 80%.

II.2.3. Balance de précision

La balance est un outil qui permet de connaître la quantité de l'échantillon. Durant notre expérience, nous avons utilisés une balance électronique de précision au 0,001g jusqu'à 400g du laboratoire de génie civil de l'école normale supérieur de L'ENSET de Douala.

La balance de précision donne la masse en milligramme et elle ne fonctionne pas si l'échantillon à un poids supérieur à 400g.



Figure II-3 : Balance électronique de SF-400

II.2.4. Presse hydraulique

Nous avons utilisé la presse hydraulique du Bloc Technique du garage UNIVERS Mercedes. Cette presse, par un système de vérins hydrauliques peut exercer une force allant jusqu'à 15 tonnes. Elle est équipée d'un support rigide, d'un piston cylindrique permettant l'exercice de la pression aux échantillons et d'une manivelle pour faire descendre peu à peu le piston [Figure II-4].



Figure II-4 : Presse hydraulique

II.2.5. L'étuve

L'étuve sert à sécher les matières premières, l'échantillon et les autres matériels utilisés durant l'expérience, sa température varie entre l'ambiante jusqu'à 105° C.



Figure II-5 : Etuve

II.3. Méthodes d'élaboration

La procédure d'élaboration de panneaux de particules à partir des coques de coula edulis est la suivante :

II.3.1. La Préparation des coques de coula edulis

Séchage

Les coques de coula edulis ayant un taux d'humidité évalué à plus de 15%, elles sont séchées au soleil pendant 72 heures environ afin de réduire au maximum le taux d'humidité et de faciliter le broyage.

Broyages des coques de noisettes

Pour obtenir des petites particules nous avons utilisé un broyeur à marteau de marque RETSCH, de type SK 1000, équipé d'un tamis de 2 mm utilisé par la société NACAM située au quartier MVOG-ADA Yaoundé pour transformer la cosse de néré en poudre de taille inférieure à 2 mm. Les particules obtenues sont ensuite tamisées avec un tamis de 0,125 mm pour séparer différents granulométriques de particules.



Figure II- 6 : broyeur à marteau

La distribution granulométrique des particules est déterminée par pesée des passants et des refus d'une batterie de tamis de maille variant de 0,25 à 2 mm, installés dans une tamiseuse vibrante manuelle.

On appelle :

- Refus sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis. ;
- Tamisât ou passant : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

L'analyse de la distribution granulométrique des particules en pourcentage de masse totale obtenue par tamisage permet de classer les particules en trois catégories dans la perspective de la fabrication de panneaux :

- PA : les particules de plus grande taille, correspondant au refus du tamis de 1,60 mm ;
- PB : les particules de taille intermédiaire ou moyenne, correspondant au passant du tamis de maille 1,60 mm et au refus du tamis de maille 0,25 mm ;
- Pf : les plus fines particules, correspondant au passant du tamis de maille 0,25 mm [4].



Figure II- 7 : Particules de coula edulis repartie selon les granulométries : PA (b), PA (a), Pf (c)

II.3.3. Préparation de particules de coula edulis

Les particules de coula edulis broyé et séché sont mélangées à la résine epoxyde selon les proportions massiques souhaitées. Quantifier par une balance électronique de précision.

Les échantillons ont été confectionnés avec les proportions de particules de coula edulis suivant :

$$P(\%) = \frac{M_{pc}}{M_{RE} + M_{pc}} \times 100 \quad (3)$$

Avec :

P%: Pourcentage massique des particules ;

- M_{pc} : Masse des particules ;
- MRE : Masse de la résine.

II.4. Processus de fabrication

II.4.1. Mélange des constituants

La procédure d'élaboration de panneaux de particules de coula edulis est la suivante :

Les particules de coula edulis sont directement mélangées avec des différentes proportions du liant. Durant notre travail, le mélange se fait manuellement dans un seau 15 litre.

II.4.2. Dépôt de l'agent de démoulage

Les agents de démoulage sont des produits destinés à être appliqué sur la surface des moules et coffrage pour faciliter la séparation du produit et le moule pendant le démoulage.

Durant notre expérience, nous avons utilisé l'huile végétale comme dépôt d'agent de démoulage.

II.4.3. Le moulage

Le moulage est un procédé de mise en forme qui consiste à introduire dans un moule le mélange amorphe ou pulvérulent qui durcit ou se consolide en adoptant la forme de l'intérieur du moule [4].

Le mat obtenu après mélange est introduit par garnissage manuel dans un moule en bois constitué d'un cadre de dimension 50 × 150mm pour les essais de flexion et le taux d'absorption d'eau, cette étape a été faite en respectant les normes NF-EN 310 et NF-EN 317.

II.4.4. Le pressage

C'est une technique assurant la densification du matériau par la force obtenue à l'aide des outils ou des machines perfectionnés qui rend les matériaux beaucoup plus résistants.

Le mélange placé dans le moule est alors pressé à l'aide d'une presse hydraulique utilisé par le garage univers Mercedes pour l'extraction des roulements qui peut produire une pression allant jusqu'à 15tonnes et le temps de pressage par éprouvette est de 8 heures.

II.4.5. Le démoulage

Après 8 heures de compactage de la pâte, la presse est desserrée, le moule récupéré est placé entre deux plaques métalliques et le moule est maintenu à l'aide d'un anneau fixé à la moitié de sa longueur. Une fois que tout est bien placé, la force provoquée par la presse est exercée doucement sur le contre moule pour faire sortir l'éprouvette.

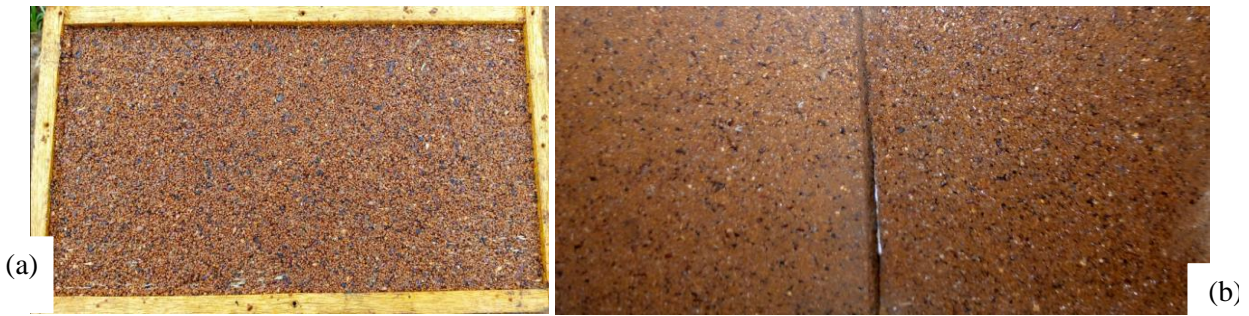


Figure II-8 : Démoulage des éprouvettes (a) éprouvette dans le moule,(b) après démoulage

III.4.6. Le séchage

Le séchage est une étape très importante dans la fabrication des panneaux de particules parce que les bonnes propriétés d'un panneau de particules dépendent du bon séchage de celui-ci.

Durant notre expérience, les étapes du séchage que nous avons suivi sont les suivantes :

Séchage à l'air libre pendant 3 jours ;
Séchage dans une étuve 105° C pendant que l'échantillon est bien sec.



Figure II-9 : Panneaux de particules de coula edulis après séchage

III.5. Diagramme des différentes étapes de la fabrication de panneaux

La figure suivante représente les différentes étapes de fabrication de panneaux des particules utilisées au cours de notre étude (Figure II-10).

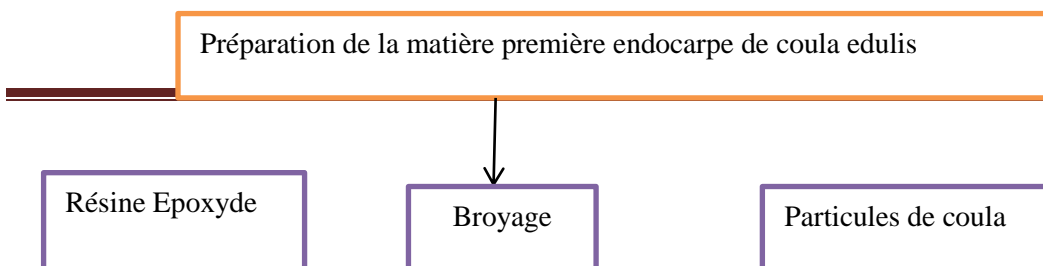




Figure II-10 : procédé de fabrication de panneaux des particules à base de L'endocarpe de coula edulis

II.6. CARACTERISATIONS DES PANNEAUX DE PARTICULES

Suivant leur domaine d'application et les conditions spécifiques de leur utilisation, les panneaux de particules doivent répondre à des exigences mécaniques générales et physiques, qui sont régies par les normes européennes EN 312-1 à EN 312-7.

II.6.1. Propriétés physiques

II.6.1.1. Masse volumique apparente (densité des panneaux de particules)

La masse volumique apparente de chaque panneau a été évaluée à partir de 5 échantillons (50 mm × 50 mm × 20 mm) selon la norme européenne EN 323 (EN 323, 1993) correspondant à la norme brésilienne ABNT NBR 14810 (ABNT NBR 14810, 2006). Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0,01 mm. Une balance de précision à 0,01 g a été

utilisée pour peser les échantillons. La masse volumique apparente a été calculée suivant l'équation ci-après dont les résultats sont présentés au **tableau 10**:

$$\text{Masse volumique apparente (g/cm}^3\text{)} = \frac{m}{E \times S} \quad (4)$$

Où :

m, la masse de l'échantillon (g);

E, l'épaisseur de l'échantillon (cm);

S, la surface de l'échantillon (cm²).

II.6.1.2. Taux absorption d'eau

En vue de déterminer la sensibilité à l'eau des panneaux, le gonflement en épaisseur et l'absorption d'eau ont été évalués en mesurant l'épaisseur initiale des panneaux avec un pied à coulisse au 1/20ème de mm avant immersion et le poids des échantillons après 2h et 24h d'immersion dans l'eau ((ABNT NBR 14810, 2006) analogue à (EN 317, 1993)) sont relevés. Cinq échantillons (25 mm × 25 mm × 20 mm) ont été plongés dans 250 mml d'eau distillée à (28 ± 1) °C pendant 2 h et 24 h.

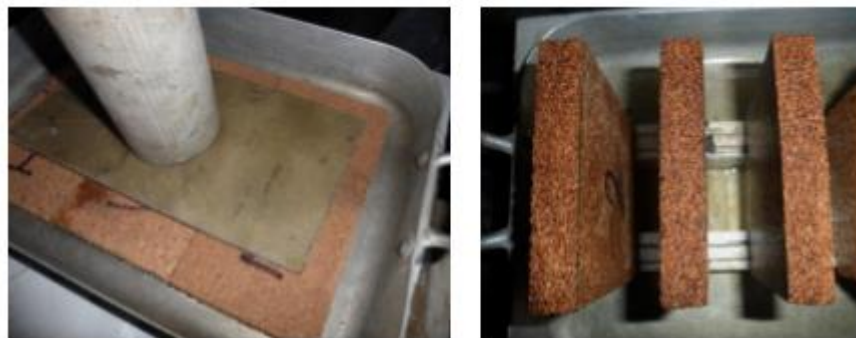


Figure II-11 : Essai d'absorption des panneaux

a. Le pourcentage du gonflement en épaisseur a été obtenu par l'équation suivante :

$$\text{pourcentage du gonflement en épaisseur (\%)} = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad (5)$$

Où :

E_f , l'épaisseur de l'échantillon après immersion (mm);

E_i , l'épaisseur initiale de l'échantillon (mm).

b. Le pourcentage de l'eau absorbée a été calculé suivant la formule ci-dessous :

$$\text{pourcentage d'eau absorbé}(\%) = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad (6)$$

Où :

M_f , la masse de l'échantillon après immersion (g) ;

M_i , la masse initial de l'échantillon (g).

II.6.2. Propriétés mécaniques

II.6.2.1. Tests en flexion trois points

L'essai en flexion trois points consiste à soumettre une éprouvette rectangulaire posée sur deux appuis à un effort vertical agissant au milieu de l'éprouvette (Figure II-12). La sollicitation en flexion impose à l'éprouvette un fléchissement qui engendre une traction (lignes fines) et une compression (lignes épaisses) de part et d'autre de la ligne moyenne (Figure III-11-a et -b).

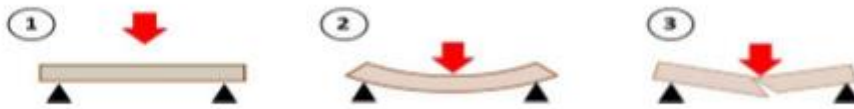


Figure II -12 : Déroulement d'un essai de flexion : 1) départ : 2) élasticité : 3) rupture [19]

Le module de rupture est fonction de la charge maximale P_{max} (N) obtenue au moment de la rupture de l'échantillon tandis que le module d'élasticité lui dépend de la pente b (N/mm) associée à la courbe Charge = f (déformations). Cette pente est mesurée dans la partie rectiligne de la courbe uniquement pour ne tenir compte que de la déformation élastique et non de la déformation plastique.

Selon la norme brésilienne ABNT NBR 14810 (ABNT NBR 14810, 2006) correspondant à la norme européenne EN 310 (EN 310, 1993), la résistance à la flexion (MOR) et le module d'élasticité (MOE) ont été déterminés dès la fin du séchage des panneaux grâce à la machine universelle Emic DL 30000 équipée d'un système de flexion et d'un dispositif d'acquisition de données automatiques. Les éprouvettes ont été placées sur deux appuis cylindriques parallèles dont les centres étaient espacés de 100 mm. Le chargement a été piloté en déplacement et a été appliqué au centre de chaque éprouvette, entre les deux appuis : la vitesse était de 2 mm/min avec une charge de 5 kN. Pour chaque formulation de panneaux cinq échantillons (150 mm × 50 mm × 20 mm) ont été testés afin d'estimer l'homogénéité des résultats obtenus.

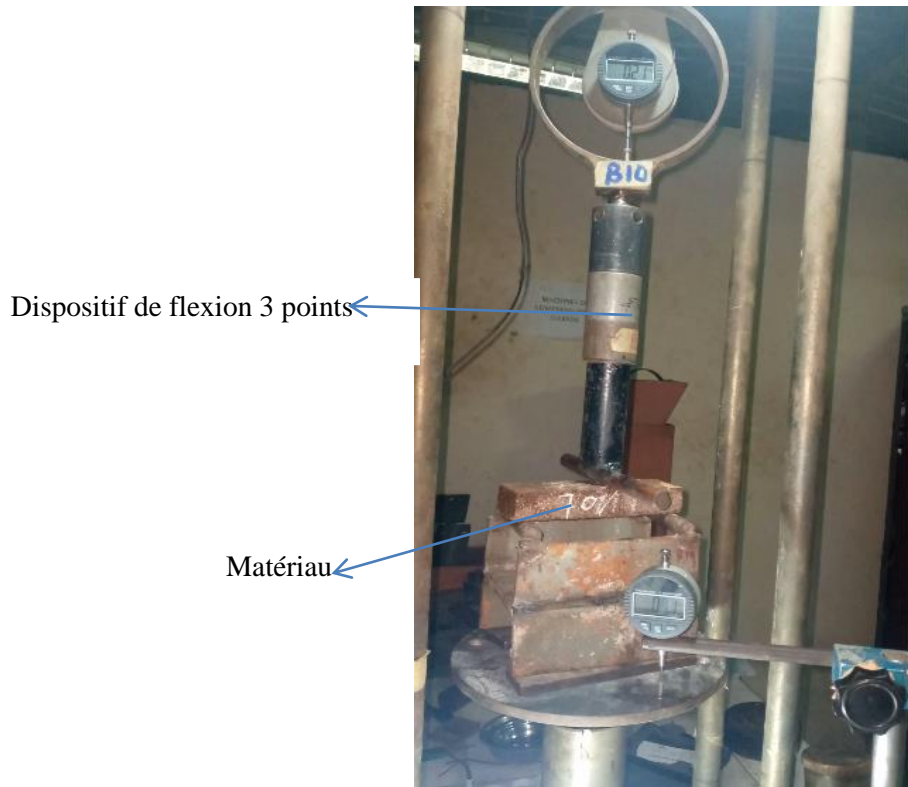


Figure II-13 : Machine pour Essais de flexion

➤ Calcul de la contrainte normale

La contrainte normale en flexion σ exprimée en N/mm² ou MPa est appelée aussi résistance à la traction ou à la compression des semelles (NF T 54-606) [11].

- Cas de la flexion 3 points :

$$\sigma = \frac{P1 \times d1}{2es(h+ea)b} \quad (7)$$

Avec :

- P1: la charge à la rupture des semelles, exprimée en newtons, pour l'essai de flexion 3 points;
- d1: distance entre appuis (mm) pour l'essai de flexion 3 points;
- es: épaisseurs des semelles (mm) ;
- ea: épaisseur de l'éprouvette (mm) ;
- h: hauteur totale de l'éprouvette (mm) ;
- b: largeur de l'éprouvette (mm).

Le module d'élasticité (MOE) a été calculé suivant l'expression ci-dessous :

$$MOE(MPa) = \frac{1,5 \times L}{b \times e^2} \times F_{rupture} \quad (8)$$

Le module à la rupture (MOR) a été obtenu par l'équation suivante :

$$MOR (MPa) = \frac{L^3}{4 \times b \times e^3} \times \frac{F_2 - F_1}{a_2 - a_1} \quad (9)$$

Où :

F_i : la force mesurée pour un déplacement a_i en N;

$F_{rupture}$: la charge mesurée à la rupture en N;

L : distance entre les points d'appui en mm;

b : largeur de l'éprouvette en mm ;

e : épaisseur de l'éprouvette mm.

II.6.2.2. Essai de Compression perpendiculaire

Les essais de compression sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle Z250 au Laboratoire de Gini Civil de Ecole Normale supérieur de l'enseignement Technique de Douala (Figure III -14), dotée d'un capteur de force de capacité 30 kN. Cette machine est pilotée manuellement et doté d'un capteur de vitesse de déplacement qui enregistre la contrainte et l'allongement. La vitesse de l'essai est de 2mm/mn. Les essais de compression perpendiculaire sont réalisés suivant la norme NF T54-602 [23], l'éprouvette est à base carrée de section (50 x 50 mm).



Figure II -14 : Dispositif pour l'essai de compression perpendiculaire.

II.6.2.3. Essai de traction perpendiculaire (essai d'arrachement)

L'essai de traction perpendiculaire d'une structure de particule a été réalisé conformément à la norme NF T 54-603 (Novembre 1983) [42]. L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction normal aux semelles du sandwich transmis à l'éprouvette par l'intermédiaire de dispositifs d'attache constitués par des plaques métalliques d'attaches épaisses indéformables, collés sur ces semelles avec une résine époxy. Les dimensions des spécimens sont de (250×50 x 10) mm². Les tests ont été effectués sur une machine universelle du type Zwick avec une vitesse de déplacement de la charge constante fixée à 2 mm/min selon la norme en vigueur. La contrainte à la rupture en traction perpendiculaire est calculée à l'aide de la formule suivante :

La contrainte maximale à la compression où déformation de la structure en particule est exprimée en MPa telle que :

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (10)$$

Où : F_m est la force maximale en (N), et S_0 : est la section initiale de l'éprouvette (mm²) ;

$$\text{déformation (\%)} = \frac{\Delta l}{L_0} \times 100 \quad (11)$$

Avec : Δl , l'allongement de l'éprouvette (mm) L_0 , la longueur initiale de l'éprouvette (mm).

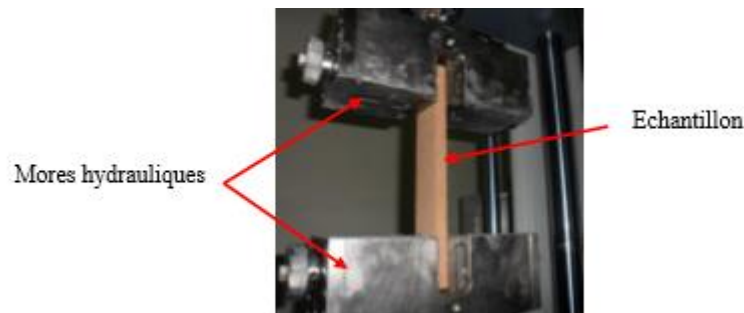


Figure II 15. Essai de traction [40]

En somme ce chapitre nous permet de présenter un ensemble d'information sur le processus de fabrication des panneaux de particules élaborés et les méthodes de caractérisation des différentes propriétés. Ensuite, il traite des différentes expériences réalisées afin de mieux connaître le matériau obtenu à base des coques de coula edulis.

Chapitre III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus des panneaux élaborés à base de particules de coula edulis et de la résine époxyde.

Pour élaboration d'un matériau à base d'endocarpe de coula edulis, il est nécessaire de chercher les proportions optimales des constituants afin d'obtenir un produit qui respecte les normes. Nous devons déterminer les propriétés physiques et mécaniques afin de savoir dans quel application orienté l'utilisation de notre matériau. Ce chapitre présentera l'influence de chaque proportion sur les résistances mécanique obtenues à partir des essais destructifs et non destructifs réalisés sur les panneaux de particule de coula edulis obtenir après moulage.

Les résultats des essais effectués sur les particules de coula edulis sont représentés aux tableaux ci-dessous.

a). Résultats

Les résultats de l'expérience sont présents dans le tableau suivant.

Tableau 7 : Détermination de la densité apparente de la particule de coula edulis

Essai	Masse en g	Déplacement du volume en Cm ³	Masse volumique en g/cm ³	Densité apparente e en g/cm ³
N° 1	10	4,31	2,32	2,32
N° 2	10	5,99	1,66	1,66
N° 3	10	6,21	1,61	1,61

Nous avons obtenus comme masse volumique moyenne de ces trois essais la particule de coula edulis de 1,65g/Cm³

b). Résultats

Le tableau suivant illustre les résultats de l'expérience :

Tableau 8 : Détermination de taux de gonflement de la coque de coula edulis.

Echantillon	Vi en cm ³	Vf en cm ³	Taux de gonflement en %
N° 1	123	139	13,009
N° 2	119	131	10,084
N° 3	116	123	6,034

Nous avons choisi comme taux de gonflement de la particule de coula edulis, la valeur moyenne de ces trois essais :

Taux de gonflement égale à 9,70%

III.1.1. Compositions des constituants.

Nous avons essayé d'élaborer 4 types des panneaux de particules de coula edulis de proportion respective : 70% à 80% de la Particule avec 30% à 20% du liant sur deux granulométries.

Les proportions des constituants pour la fabrication des panneaux durant l'expérimentation sont nommées et regroupées dans le tableau ci-dessous

Tableau 9 : Les compositions des constituants

Panneau		Particules de grande taille (Pg)			Particules de taille moyenne (Pm)		
		Ep1	Ep2	Ep3	Ep1	Ep2	Ep3
Composition en %	Renfort	30	20	10	30	20	10
	Liant	70	80	90	70	80	90



Figure III.1 Matériau composite obtenu

III.2. PROPRIETE PHYSIQUE

III.2.1. La masse volumique apparente

Nous avons relevé les données de trois éprouvettes à un taux de renfort respectivement de 70 , 80 et 90 pourcent à un volume identique de $50 \times 50 \times 2 \text{mm}^3$. Les masses obtenues après mesure sur une balance de précision des dits échantillons ainsi que les masses volumiques sont calculées.

L'étape à suivre pour la détermination de la masse volumique apparente de l' échantillon est la suivante :

Peser l'échantillon sec avec un balance de précision ;
Calculer le volume apparent de l'échantillon.

Surface d' un cylindre plein ;

$$S = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (12)$$

Volume d'un cylindre plein ;

$$V = \pi \times \frac{D^2}{4} \times h \quad (13)$$

D : Diamètre de l'échantillon en cm ;

h : hauteur de l'échantillon en cm ;

La masse volumique de panneaux et de briquettes de particules de coula edulis est calculée par le rapport masse de l'échantillon/volume de l'échantillon.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (14)$$

m : masse de l' échantillon en g ;

V : son volume en cm^3 ;

ρ : masse volumique en g/cm^3 .

Tableau 10 : Masse volumique des composites

taux de renfort	70% renfort			80% renfort			90% renfort		
éprouvette	EP1	EP2	EP3	EP1	EP2	EP3	EP1	EP2	EP3
VOLUME	75	75	75	75	75	75	75	75	75
MASSE	186	198	203	194	168	186	201	228	243
M/ V(ρ)	2,48	2,64	2,706667	2,586667	2,24	2,48	2,68	3,04	3,24
masse moy	195,6666667			182,6666667			224		
M/V MOY	2,608888889			2,435555556			2,986666667		

Les résultats de l'expérience que nous avons faite sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on porte :

En abscisse, le pourcentage du renfort dans les éprouvettes ;

En ordonnée, les densités apparentes moyen des particules de la bagasse.

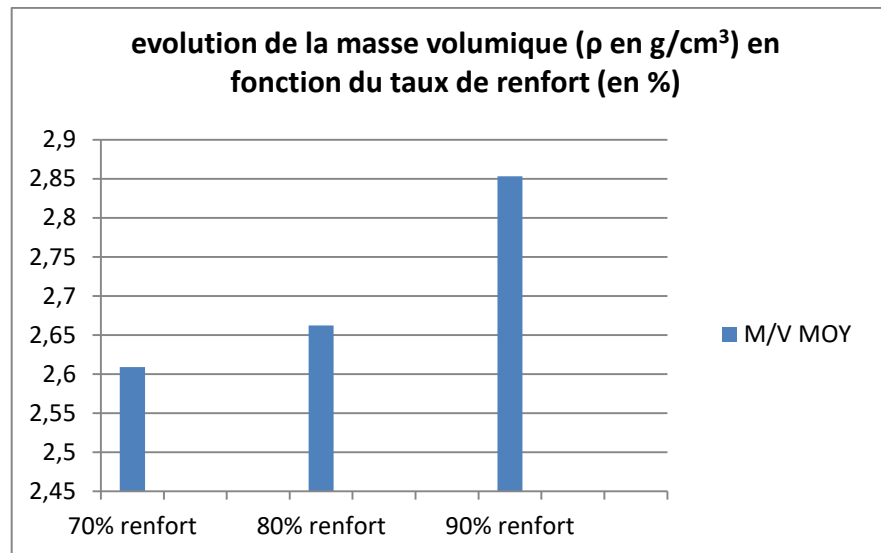


Figure III-2 : diagramme d'évolution de la densité apparente de l'échantillon en fonction du pourcentage du renfort dans le composite.

III.2.1.1. Interprétation du résultat

Le diagramme ci-dessus nous montre que la masse volumique apparente varie en fonction du pourcentage de particules de coula edulis. Plus le taux de renfort est élevé, plus la masse volumique apparente augmente, cela est dû au fait que la masse volumique du renfort croix plus que Celle de la matrice.

Nous avons choisi comme la masse volumique de la coque de coula edulis la valeur moyenne de ces trois essais :

$$\text{Masse volumique} = 267,633 \text{Kg/m}^3$$

Tableau 11 : Comparaison de la masse volumique apparente des panneaux [42]

Type de matériaux	Masse volumique apparente en K
Notre panneau de particules de la coque de coula	267,63
Notre panneau de particules de la bagasse	600 - 750

Panneau de fibre	Panneau durs et extra-dure	850-1200
	panneau tendres (isolants)	200 - 250
Panneau de particule lignocellulosique pressé à plat		360 - 750
Panneau de particule de bois extrudés		550 - 650
Panneau de particule de lin		230 - 600
Panneau contreplaqué		400 - 550
Panneau en pin maritime ou pin d'Oregon		450 - 550

III.2.2. Absorption d'eau

Absorption d'eau c'est la quantité d'eau absorbée par le panneau pendant un certain temps. Lorsque la porosité est importante, l'absorption d'eau augmente. L'influence de l'eau sur les panneaux de particules est un paramètre important dans la caractérisation de ce type de matériaux.

III.2.2.1. Expérience

Nous avons pesés précisément avec une balance de précision les échantillons avant et après l'immersion dans l'eau de volume égal à 250 mL. La masse des éprouvettes mesurée a sec et trempée pendant 2 heures, elles sont à nouveau pesées puis retrempées dans l'eau distillée pour 24 heures. Les taux d'absorption sont donnés dans le tableau suivant :

III.2.2.2. Résultats

Le résultat de l'essai est donné sur le tableau ci-dessous.

Tableau 12 : Absorption d'eau de l'échantillon après 24 heures EP1, EP2 et EP3

Panneau	EP1	EP2	EP3
Taux de renfort %	70	80	90
Masse sèche (Mi) en g	60	60	60
Masse après essai (Mf) g	64,6	69	74,8
Masse absorbantes en g	4,6	9	14,8
Taux d'absorption %	7,6666667	15	24,666667

Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on Porte :

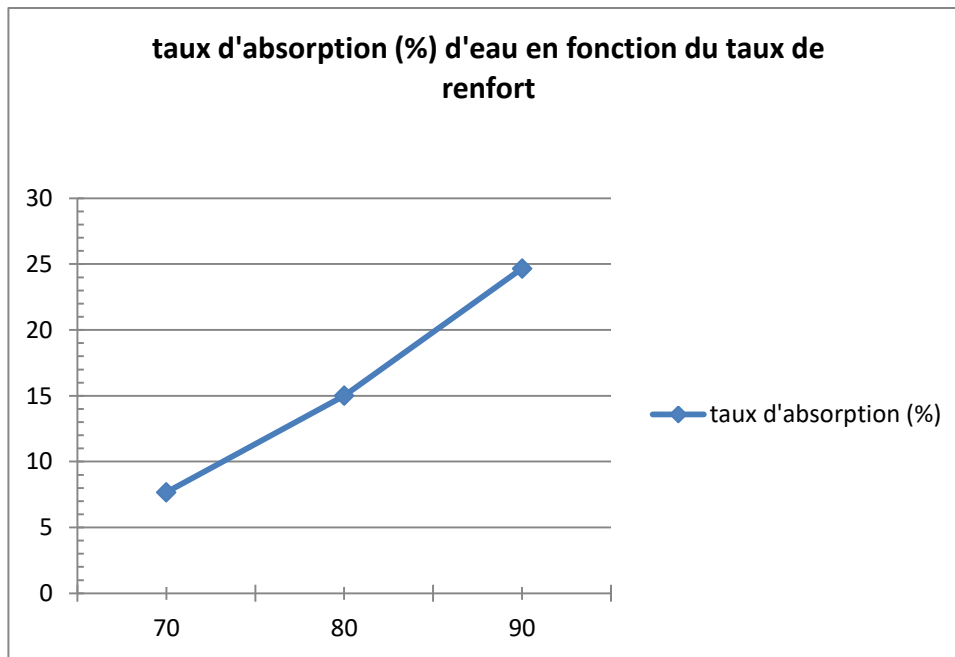


Figure III-3 : courbe d'essai d'absorption d'eau

III.2.2.3. Interprétation

Le tableau ci-dessus nous montre que l'absorption varie en fonction de la proportion de la quantité des constituants, plus le pourcentage de la matrice est élevé le matériau absorbe moins d'eau. Le taux le plus élevé est celui du panneau EP3 avec 10% de matrice.

Nous avons remarqué qu'après 2 heures d'immersion dans l'eau, le taux d'absorption est égal à zéro contre 7,66 % à 24 ,66 % pour une période de 24 h (Tableau 20).

III.3. Propriétés mécaniques

III.3.1. Résistance à la flexion trois point

Les résultats des résistances à la flexion (MOR) et du module d'élasticité (MOE) des quatre formulations de panneaux étudiés sont présentés respectivement dans les tableaux ci-dessous.

III.3 .1 .1. Résultats d'éprouvettes grand granulométrique (PA) Taux de renfort 70%

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau de particule renforcé à 70% de renfort et 30% de résines a été soumis à l'essai de flexion afin de déterminer la résistance à la rupture en flexion et le module d'élasticité. Le tableau suivant rassemble les résultats obtenu pendant l'essai.

Tableau 13 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PA).

Eprouvettes	Eprouvettes grand granulométrique (PA) Taux de renfort 70%					
	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Forces de rupture en N	3461,15	2615,67	2774,2	3223,36	3408,3	3096,536
Déplacements (ΔL) en mm	3,11	2,82	2,61	3,19	3,71	3,088
MOE(MPa)	2782,279	2335,419	2657,279	2296,669	2296,698	2473,66
MOR(MPa)	194,68	147,13	155,93	181,31	191,71	174,153

III.3.1.2. Interprétation

Nous enregistrons pour cette composition un module élastique (MOE) moyen de **2473,66 (MPa)** et un module de rupture MOR moyen est de **174,153 (MPa)**. Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on observe évolution la force de rupture en fonction du déplacement :

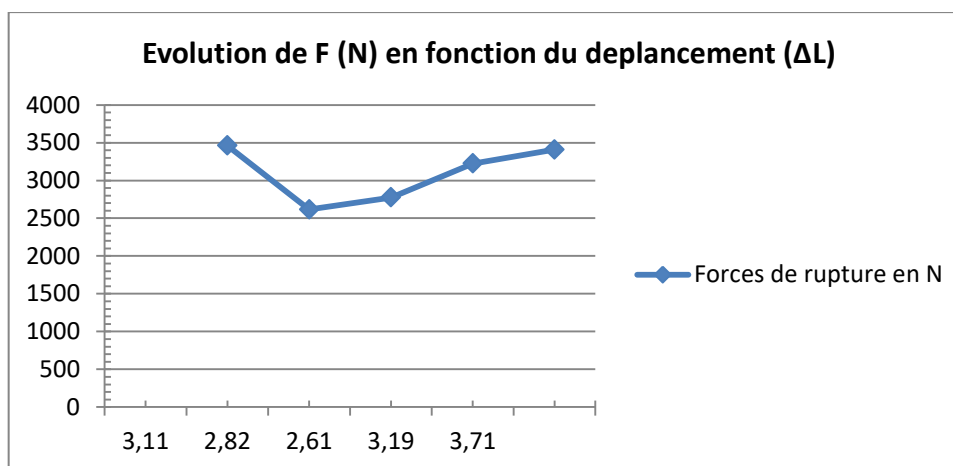


Figure III-4 : courbe de essai de flexion variation de la force en fonction (ΔL)

Les résultats obtenus à la Figure III -4 montrent que les panneaux EP1 et EP5 ont une résistance à la flexion très élevée (**3461,15 MPa** et **3408,3 MPa** respectivement) significativement supérieures à celles de EP2, EP3 et EP4 :

III.3.1.3. Résultats d'éprouvettes grand granulométrique (PA) Taux de renfort 80%

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau de particule renforcé à 80% de renfort et 20% de résines a été soumis à l'essai de flexion afin de déterminer la résistance à la rupture en flexion et le module d'élasticité le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pendant l'essai.

Tableau 14 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PA).

Eprouvettes	Eprouvettes grand granulométrique Taux de renfort 80%					
	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Forces de rupture en N	590,98	449,12	566,48	609,35	643,04	571,794
Déplacement (DL) en mm	4,27	3,4	4,19	4,68	4,87	4,282
MOE (Mpa)	879,452	825,588	878,787	908,934	887,291	876,0104
MOR (Mpa)	22,161	16,84	21,24	34,08	24,11	23,6862

III.3.1.3.1. Interprétation

Nous enregistrons pour cette composition un module élastique (MOE) moyen de 876,0104 (MPa) et un module de rupture MOR moyen est de 23,6862 (MPa). Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on observe l'évolution de la force de rupture en fonction du déplacement :

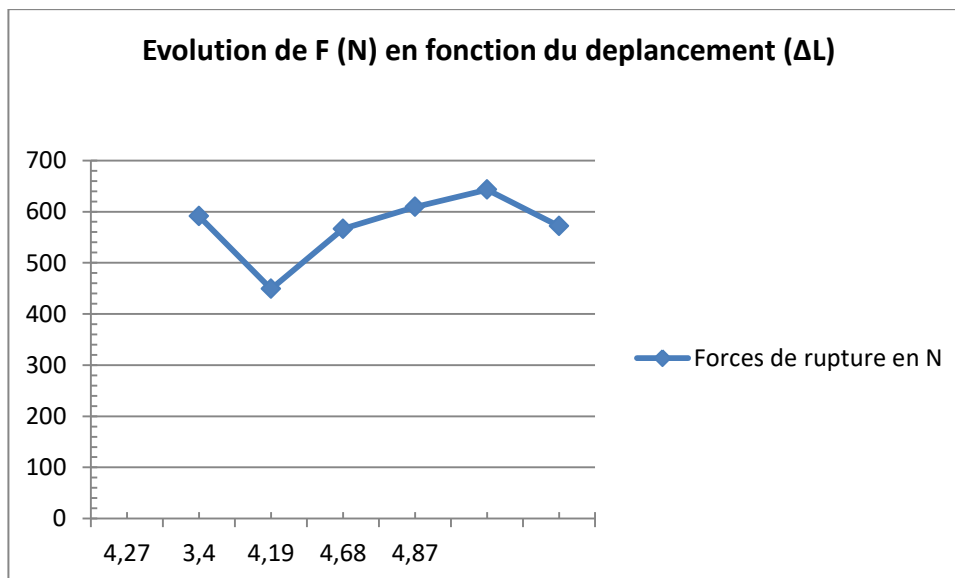


Figure III-5 : courbe de flexion variation de la force en fonction (ΔL)

Les résultats obtenus à la Figure III -5 montrent que les panneaux EP4 et EP5 ont une résistance à la flexion très élevée (609,35MPa et 643,04 MPa respectivement) significativement supérieures à celles de EP1, EP2et EP3 :

III.3 .1.3.2. Résultats d'éprouvettes de moyenne granulométrique (PB) Taux de renfort 70%

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau de particule renforcé à 70% de renfort et 30% de résines a été soumis à l'essai de flexion afin de déterminer la résistance à la rupture en flexion et le module d'élasticité d'où le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pendant l'essai.

Tableau 15 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PB).

Eprouvettes	Eprouvettes de granulométrique Moyenne Taux de renfort 70%					
	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Forces de rupture en N	2642,1	2192,94	2615,6	2483,57	2087,25	2404,292
Déplacement (DL) en mm	4,7	5,8	4,08	5,03	4,82	4,886
MOE (Mpa)	702,686	472,616	801,348	617,189	541,299	627,0276
MOR (Mpa)	9,9	8,223	9,808	9,313	7,827	9,0142

III.3.1.3.3. Interprétation

Nous enregistrons pour cette composition un module élastique (MOE) moyen de 2404,292 (MPa) et un module de rupture MOR moyen est de 4,886 (MPa). Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on observe l'évolution de la force de rupture en fonction du déplacement :

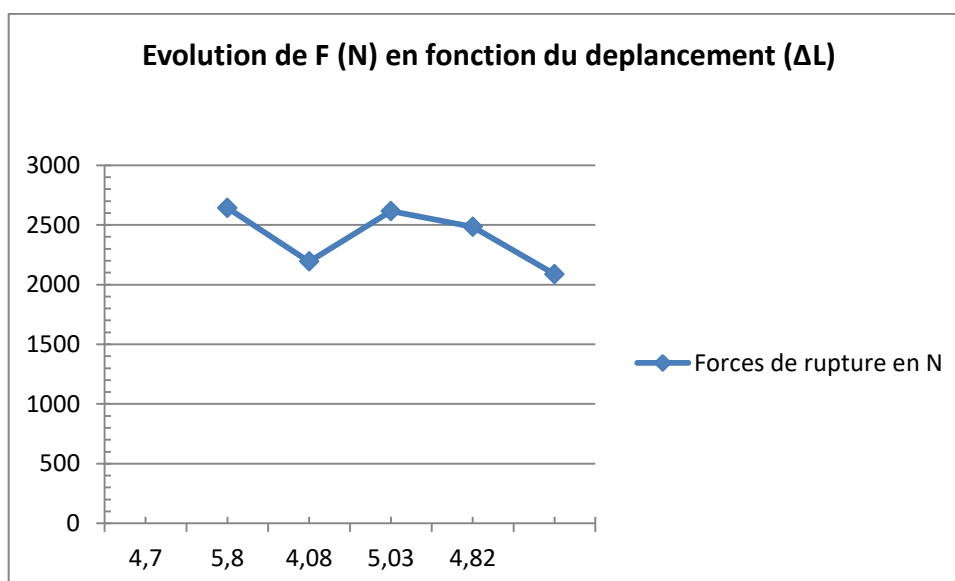


Figure III-6 : courbe de flexion variation de la force en fonction (ΔL)

Les résultats obtenus à la Figure III -6 montrent que les panneaux EP1 et EP3 ont une résistance à la flexion très élevée (609,35MPa et 643,04 MPa respectivement) significativement supérieures à celles de EP2, EP3et EP4 :

III.3 .1 .3. Résultats d'éprouvettes de moyenne granulométrique (PB) Taux de renfort 80%

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau de particule renforcé à 80% de renfort et 20% de résines a été soumis à l'essai de flexion afin de déterminer la résistance à la rupture en flexion et le module d'élasticité .Ainsi, le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pendant l'essai.

Tableau 16 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PB).

Eprouvettes	Eprouvettes de granulométrique Moyenne Taux de renfort 80%					
	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Forces de rupture en N	287,83	263,34	232,71	293,96	309,27	277,422
Déplacement (DL) en mm	6,22	7,02	5,13	5,69	6,01	6,014
MOE (Mpa)	578,436	468,9	567,032	645,782	643,24	580,678
MOR (Mpa)	1,07	0,987	0,872	1,102	1,159	1,038

III.3.1.3.1. Interprétation

Nous enregistrons pour cette composition un module élastique (MOE) moyen de 580,678 (MPa) et un module de rupture MOR moyen est de 1,038 (MPa). Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on observe l'évolution de la force de rupture en fonction du déplacement :

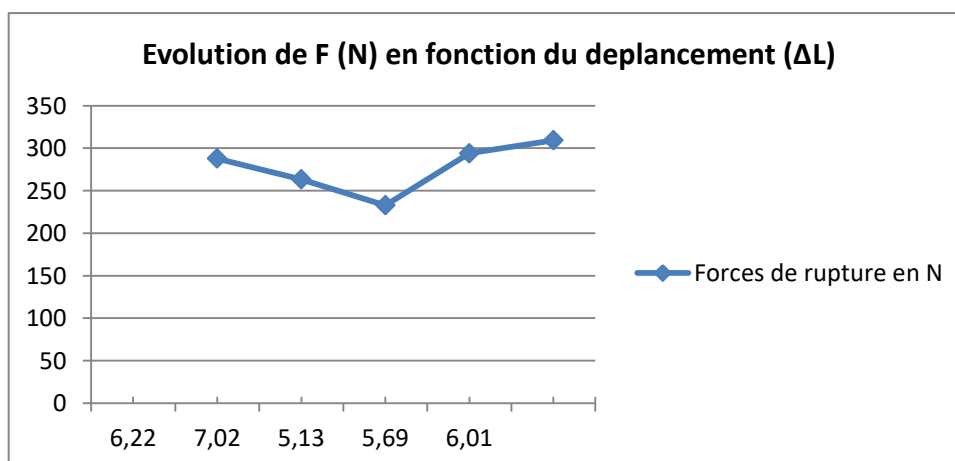


Figure III-7 : courbe de flexion variation de la force en fonction (ΔL)

Les résultats obtenus à la Figure IV -7 montrent que les panneaux EP4 et EP5 ont une résistance à la flexion très élevée (645,782MPa et 643,24MPa respectivement) significativement supérieures à celles de EP1, EP2 et EP3 :

III.3.1.4. Résistance à la traction et compression

La réalisation des essais de compression statique sur les éprouvettes nous permet de tracer de la courbe Effort / Déformation. Nous dépouillerons ensuite la courbe afin de déterminer les valeurs classiques (R_m , E).

III.3.1.4.1. Résultats d'éprouvettes grand granulométrique (PA) Taux de renfort 70%

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau de particule renforcé à 70% de renfort et 30% de résines a été soumis à l'essai de Traction. Dès lors le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pendant l'essai.

Tableau 17 : Relevés de l'essai de traction des éprouvettes (PA).

Forces en (N)	Déplacement ΔL en (mm) PA (70%)					
	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	ϵ moyenne
0	0	0	0	0	0	0
4503,8	0,0118	0,0182	0,0186	0,019	0,0192	0,01736
9007,6	0,0212	0,0284	0,0318	0,0322	0,0338	0,02948
1351,1	0,03	0,0372	0,044	0,0462	0,0496	0,0414
1801,5	0,0412	0,045	0,0558	0,056	0,0582	0,05124
2043,6	0,0602	0,0512	0,061	0,062	0,0796	0,0628
2456,7	0,0672	0,0618	0,0762	0,0782	0	0,05668
2885,06	0,079	0,0756	0,0838	0,0802	0	0,06372
3287,77	0,092	0,0848	0,1042	0	0	0,0562

Nous enregistrons pour cette composition la variation des différents allongements moyens en fonction de la force appliquée sur le matériau. Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on observe l'évolution de la force de rupture en fonction de la déformation :

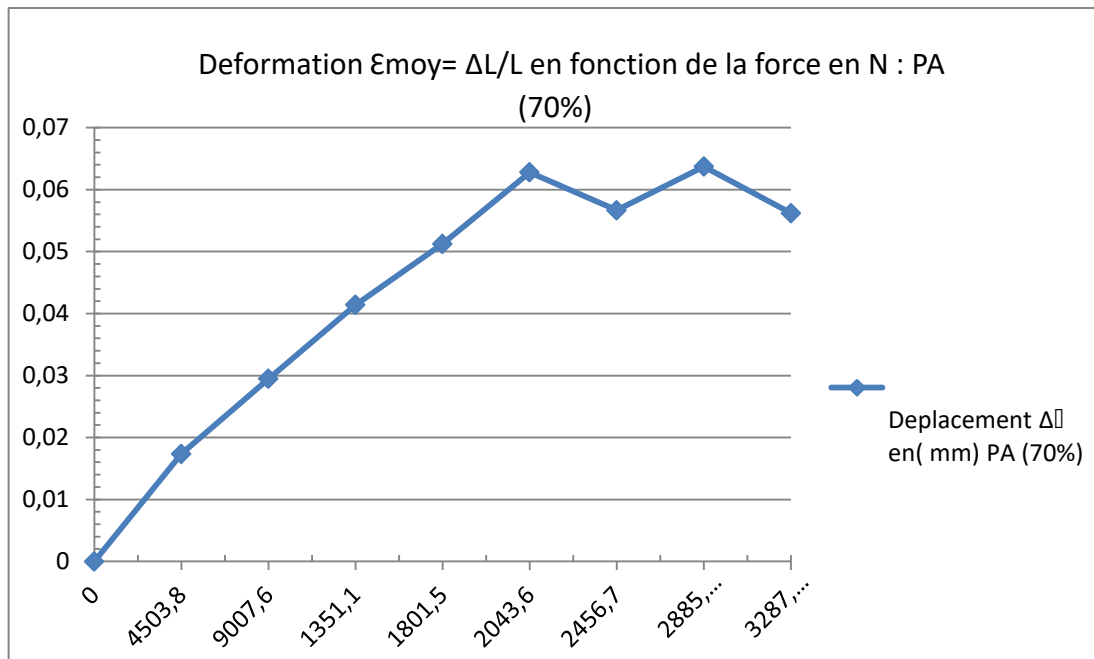


Figure III-8 : courbe d'essai de traction : variation de la force en fonction (ΔL)

Différentes zones de la courbe obtenue :

- 0 à 0,04 : zone de déformation élastique (réversible) ;
- 0,04 à 0,06 : palier de plasticité ;
- 0,06 : zone de déformation plastique répartie de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

III.3.1.4 .2. Dépouillement de la courbe

Certains paramètres sont directement relevés sur la courbe de traction, d'autres sont déduits du tableau 17.

Le module d'Young (E) peut directement être déduit de la courbe de traction. Il est proportionnel à la pente de la droite dans la zone élastique.

On remarquera toutefois que cette valeur est dans notre cas difficilement exploitable en raison d'une pente très raide avec une imprécision sur la valeur de l'allongement.

La courbe passant par le point de coordonnées (0,0) ; il nous suffit de lire les coordonnées d'un point avant la limite élastique.

Fm Charge maximal ;

Rm Contrainte maximale à la rupture en traction ;

Allgt Allongement à la charge maximale ;

Fm	Rm
3287,7 N	131,5 MPa

$$E = \frac{F_m}{S_0} \times \frac{1}{\epsilon} \quad (15)$$

$$\text{Or } \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (16)$$

Malgré l'imprécision de la mesure, nous obtenons une valeur proche de la valeur théorique de 837,96 GPa.

III.3 .1 .5. Résultats d'éprouvette grand granulométrique (PA) Taux de renfort 80%

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau de particule renforcé à 80% de renfort et 20% de résines a été soumis à l'essai de traction. Enfin le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pendant l'essai.

Tableau 18 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PA).

Forces en (N)	Déplacement ΔL en (mm) PA (80%)					
	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	ϵ moy
0	0	0	0	0	0	0
4503,8	0,0232	0,0582	0,0586	0,061	0,0812	0,05644
9007,6	0,0372	0,0596	0,0518	0,0722	0,0938	0,06292
1351,1	0,05	0,0612	0,064	0,0782	0,0976	0,0702
1801,5	0,0566	0,0668	0,0758	0,096	0,1182	0,08268
2043,6	0	0	0,061	0	0,122	0,0366

Nous enregistrons pour cette composition la variation des différents allongements moyens en fonction de la force appliquée sur le matériau.

Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on observe évolution la force de rupture en fonction de la déformation :

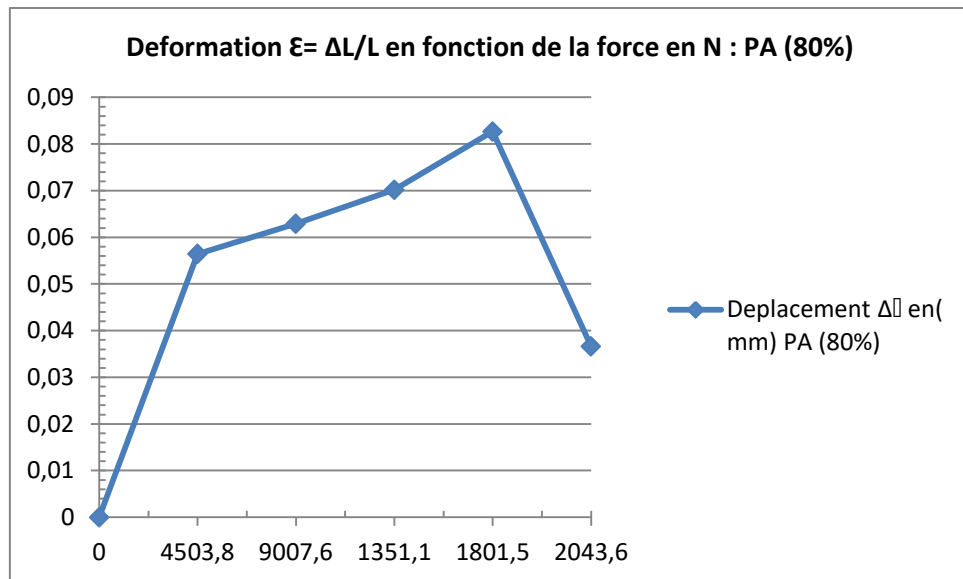


Figure III-9 : courbe d'essai de traction : variation de la force en fonction (ΔL)

Différentes zones de la courbe obtenue :

- 0 à 0,06 : zone de déformation élastique (réversible) ;
- 0,06 à 0,08 : palier de plasticité ;
- 0,08 : zone de déformation plastique répartie de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

Fm	Rm	Le module d'Young (E)
9007,6 N	360,30 MPa	435,781 GPa

III.3 .1 .5.1. Résultats d'éprouvettes Moyen granulométrique (PB) Taux de renfort 70%

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau de particule renforcé à 70% de renfort et 30% de résines a été soumis à l'essai de traction et le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pendant l'essai.

Tableau 19 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PB).

Forces en (N)	Déformation $\epsilon = \Delta L/L$ éprouvettes PB (70%)					
	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	f
0	0	0	0	0	0	0
4503,8	0,0424	0	0,012	0,036	0,018	0,02168
9007,6	0,0782	0,042	0,05	0,0722	0,0538	0,05924
1351,1	0,092	0,0612	0,084	0,0782	0,0776	0,0786
1801,5	0,118	0,0886	0,0958	0,096	0,0982	0,09932
2043,6	0,124	0	0,101	0,126	0,102	0,0906

Nous enregistrons pour cette composition la variation des différents allongements moyens en fonction de la force appliquée sur le matériau.

Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on observe l'évolution de la force de rupture en fonction de la déformation :

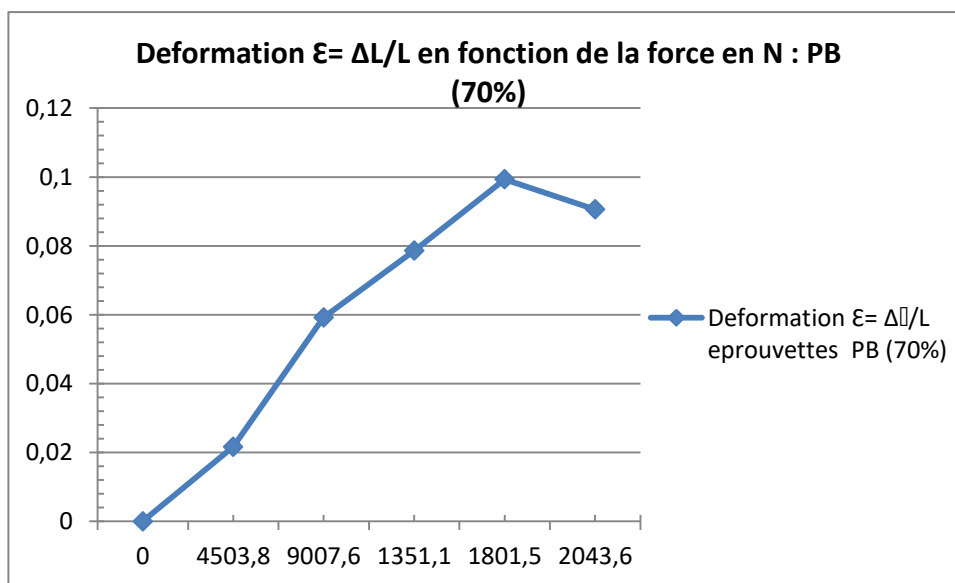


Figure III-10 : courbe d'essai de traction ; variation en de la force en fonction (ΔL)

Différentes zones de la courbe obtenue :

- 0 à 0,06 : zone de déformation élastique (réversible) ;
- 0,06 à 0,1 : palier de plasticité ;
- 0,1 : zone de déformation plastique répartie de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

Fm	Rm	Le module d'Young (E)
9007,6 N	360, 30MPa	435,781 GPa

III.3 .1. 6. Résultats d'éprouvette de Moyen granulométrique (PB) Taux de renfort 80%

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau de particule renforcé à 80% de renfort et 20% de résines a été soumis à l'essai de traction afin le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pendant l'essai.

Tableau 20 : Relevés de l'essai des éprouvettes (PB).

Forces en (N)	Déformation $\epsilon = \Delta L/L$ éprouvettes PB (80%)					moyenne
	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	
0	0	0	0	0	0	0
4503,8	0,0024	0,018	0,012	0,036	0	0,01368
9007,6	0,0182	0,022	0,0118	0,0442	0,0338	0,026
1351,1	0,052	0,0612	0,082	0,0502	0,0576	0,0606
1801,5	0,078	0	0,0958	0,096	0,0982	0,0736
2043,6	0,084	0	0	0,106	0,102	0,0584

Nous enregistrons pour cette composition la variation des différents allongements moyens en fonction de la force appliquée sur le matériau.

Les résultats de l'expérience sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on observe l'évolution de la force de rupture en fonction de la déformation :

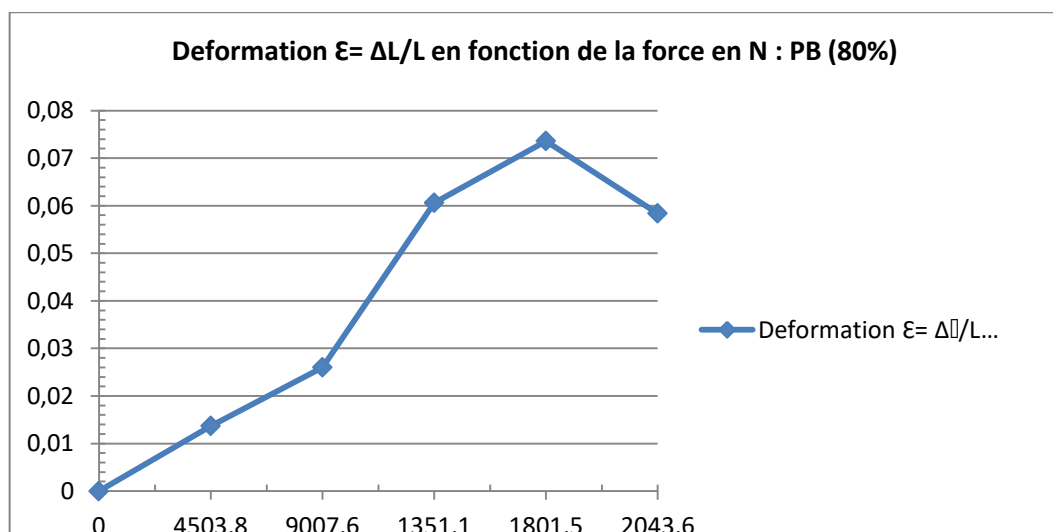


Figure III-11 : courbe d'essai de traction ; variation de la force en fonction (ΔL)

Différentes zones de la courbe obtenue :

- O à 0,06 : zone de déformation élastique (réversible) ;
- 0,06 à 0,7 : palier de plasticité ;
- 0,07 : zone de déformation plastique répartie de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

Fm	Rm	module d'Young (E)
9007,6N	360, 30MPa	489,54 GPa

III.4. Avantage de panneaux de particules

Celons les résultats obtenus pendant nos travaux les panneaux de particules de l'endocarpe de coula edulis présente les avantages suivant :

Les panneaux de particules de coula edulis sont économes et consomment moins d'énergie pour leur fabrication et leur recyclage ;

- Leur mise en œuvre est simple ;
- Ils sont des isolants de bon régulateur hygrométrique et thermique ; ils possèdent par ailleurs une très faible capacité à absorber d'eau [42] ;

Ils présentent les meilleures caractéristiques physiques et mécaniques.

III.5. Domaine d'utilisation

Nos panneaux sont de divers domaine d'utilisation : domaine d'ameublement : armoires de cuisines, table de bureau ; domaine de bâtiment : contré plaque a usage multiple, mûr ; domaine de l'isolation : isolation en bâtiment, isolation frigorifique et automobile ; domaine de l'art.

Afin de participer aux enjeux du développement durable et d'étudier la possibilité d'utilisation des coques de coula edulis comme renfort dans le développement d'éco-composites, nous avons choisi d'élaborer des matériaux de l'environnement. A cet effet, une étude expérimentale dans ce chapitre a été menée sur des panneaux de particules de faible densité pour leur masse volumique de 267, 633Kg/m³, appartiennent également à la catégorie des panneaux de faible masse volumique selon la norme ANSI A208 (< 640 kg/m³) (ANSI A208, 1999) préférentiellement employés comme isolant thermique (Suchsland & Woodson, 1987). Le panneau

testé présente un taux d'absorption variant entre 7,66 et 24,66% ce qui signifie que le matériau obtenu présente une imperméabilité élevée [40].

Aucune différence significative n'est observée pour l'absorption d'eau (2h, 24h) ces caractéristiques sont satisfaisantes pour leur utilisation en milieu sec comme en milieu humide, Le panneau PA renforce a 70 % et PA renforce a 80% de renfort satisfait presque intégralement les exigences mécaniques (MOR, MOE) et physiques (gonflement en épaisseur) américaines recommandées pour les panneaux ce qui situe notre matériau entre le bois et le béton voir (annexe)

Pour les autres caractéristiques, toutes les configurations de panneaux sont satisfaisantes. Les résultats probants de nos investigations laissent entrevoir une possibilité d'exploitation de cette matière issue de la transformation de coula edulis afin d'obtenir un composite de haute performance.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le XXème siècle s'est vu marqué par une croissance industrielle sans précédent caractérisée par une prospérité matérielle et une maîtrise de la nature par l'Homme négligeant l'impact délétère de ce modèle sur l'environnement et sur certains aspects sociétaux. Face aux constats alarmants et indéniables liés au réchauffement climatique, à la raréfaction des ressources naturelles, aux écarts entre les pays développés et ceux en voie de développement ainsi qu'à la disparition d'une partie de la biodiversité, le XXIème siècle se voit porteur de nombreux enjeux s'inscrivant dans une démarche de développement durable pour résorber la crise écologique, économique et sociale actuelle. Dans ce cadre, ces travaux de recherche ont contribué :

A la caractérisation, physique et mécanique d'un nouveau renfort de particule potentiel, la coque de coula edulis communément appelé noisette. Disponible localement et naturellement sous forme de particule. Il s'agit d'une ressource renouvelable et biodégradable, non-valorisée à l'heure actuelle, visant à être utilisée comme substituts aux renforts de particules synthétiques. Cette thématique de recherche portant sur l'étude de renforts de l'endocarpe de coula edulis a été réalisée pour l'élaboration et la caractérisation d'un matériau composite à base de coques de coula edulis,

A l'étude des effets de plusieurs traitements sur la composition volumique, l'absorption en eau, les performances à la flexion et en traction ainsi que sur les propriétés morphologiques et chimiques de surface des coques de coula edulis. Sa présence en moyenne quantité au Cameroun pourrait être avantageuse pour sa transformation, pour favoriser le développement d'une activité économique. Les propriétés physico-chimiques et mécaniques montrent qu'elle peut servir de source en matière première pour l'élaboration des panneaux de particule à haute performance.

Au développement de matériaux composites innovants, respectueux de l'environnement et de la santé humaine dont l'application visée concerne le domaine de la fabrication et l'isolation thermique. A cet effet, nous avons proposé d'élaborer et de caractériser des panneaux de particules de faible densité (car préférablement employés comme isolant thermique (Suchsland & Woodson, 1987)) renforcés en surface par des particules de coula edulis et liées par la résine époxyde.

A l'issue de la phase exploratoire de caractérisation, le matériau réalisé présente les résultats les plus prometteurs concernant les panneaux de particule renforcés à 30% et à 20% de résine : ce dernier présente les meilleures performances à la flexion. Les propriétés mécaniques (MOR, MOE) et physiques (gonflement en épaisseur) de cette configuration de panneau dénommée PA70% satisfaisaient les exigences requises par les normes américaines ANSI A208 et CS 236-66 pour les panneaux de faible masse volumique ($< 640 \text{ kg/m}^3$).

Les caractéristiques des panneaux obtenus avec les particules d'endocarpe de coula edulis (masse volumique en kg/m^3 ; taux d'absorption en % ; MOE ; MOR en MPa et le module Young) trouvé après différents essais sont satisfaisantes pour une utilisation de la coque de noisette comme panneaux de particules. Cette hypothèse que l'endocarpe peut être valorisé en panneaux de particules s'annonce comme une solution alternative pour limiter l'exploitation forestière des essences nobles et de la biodiversité en le substituant un biomatériau dont la matière première est abondante et sans valeur commerciale. L'étude menée sur l'endocarpe a montré qu'en valorisant ce sous-produit de la transformation de coula, nous avons réglé trois problèmes environnementaux :

- récupérer un déchet pour en faire un nouveau matériau à des utilisations générales et agencements intérieurs ;
- Arrêter la déforestation et préserver les ressources naturelles en essences nobles ;
- L'utilisation de ce déchet qui auparavant était brûlé et qui génère donc d'autres polluants qui sont des gaz à effets de serre, nous permet de préserver la couche d'ozone.

Cette étude constitue donc une étape préliminaire de caractérisation des coques de coula edulis brutes traitées (broyage) et de vérification de la faisabilité du développement d'un éco-matériau à usage mécanique ; d'isolant thermique renforcé par cette ressource. Elle laisse apparaître de nombreuses perspectives dans chacun des axes explorés : Elaboration et caractérisation mécanique et physique d'un matériau composite à base de l'endocarpe de coula edulis. Il est intéressant de donner une suite à ce travail sous forme d'un projet de recherche. Cette suite doit axer sur des recherches en mettant en œuvre les colles naturelles à base de féculé de manioc. Il est aussi important d'optimiser le pourcentage d'endocarpe dans le panneau de particules et de voir son influence sur le comportement mécanique et rhéologique. Aussi, il est important pour les prochaines études de diversifier les sites de prélèvement afin de nous affranchir de l'effet station.

REFERENCES

- [1] **J-M Berthelot, Spaulding K.B.**, (1996), Naval Engineers Journal, volume 78, numéro 2, pp 333/342.
- [2] **Mustapha Malha**, Rabat (2013), Mise en œuvre, caractérisation et modélisation des matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de doum. Thèse de doctorat, Université Mohamed V- Agdal.
- [3] **NENONENE A. Y.**, (2006), Glossaire des matériaux composites. Elaboration et caractérisation des panneaux de particules des tiges de kénaf à base des bioadhésifs, de la colle d'os, des tannins ou de mucilage. Thèse INP de Toulouse.
- [4] **Noureddine Arabie** (2006), Contribution à l'étude du composite ciment verre et durabilité des fibres de verre. Thèse de doctorat, Université BM-ANNABA.
- [5] **Soo-Jin Park, Fan-Long Jin, Changjin Lee** (2005), Preparation and physical properties of hollow glass microspheres-reinforced epoxy matrix resins, Materials Science and Engineering.
- [6] **Gay Daniel** (2005), "Matériaux composites", Ed. Hermès Sciences Publication, Paris, 5 éditions révisées.
- [7] **Y. Perrot** (2006), Contribution à l'étude des matériaux composites utilisés en construction navale de plaisance, Thèse de l'Université de Bretagne Sud, U.F.R Sciences et Sciences de l'Ingénieur.
- [8] **TEKNEA, TEKNEA**, Matériaux composites : Introduction à l'usage des ingénieurs et des techniciens, Ecrit par la Société Européenne de Propulsion (S.E.P) 288 p, éditeur ISBN.
- [9] **S. Bensaid** (2006), Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotrope, Engineering Sciences, Hal id : tel-00424804, Université de Nantes, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00424804>.
- [10] **Laurent Gornet** (2008), Généralités sur les matériaux composites, Ecole d'ingénieur, Hal Id : cel-00470296. <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296v1/document>.

[11] **Haudin J.M.** (1995), “Structures et morphologies des polymères semi-cristallins”, Introduction à la mécanique des polymères, ed. C. G’Sell, J.M. Haudin, Institut national polytechnique de lorraine, p. 97-115.

[12] **K. Mimura, H.** (2002), Ito Characteristics of epoxy resin cured with in situ polymerized curing.

[13] **Christiane El Hage** (2006), Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel, Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne.

[14] **Rouam Kamila**, Elaboration et caractérisation mécanique et hygrothermique d’un stratifié renforcé par des fibres naturelles. Mémoire de Magister, Université de Boumerdes. [20] **Kausch H.H, Heymans N., Plummer C.J., Decroly P.,** (2001), Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques”, Traité des matériaux, volume 14. Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 195-199.

[15] **Pascal. Rosier** (2000), Résines polyester, Moulage, GuideN°5, [http : //www. Pascal rosier .com/pdf/guides/guide 5 résine polyester.pdf](http://www.Pascalrosier.com/pdf/guides/guide%205%20résine%20polyester.pdf).

[16] **A. Raskin** (2009), Les résines composites, Support de cours (version PDF), Université médicale virtuelle francophone.

[17] **S. Boukais**, (2009), Comportement mécanique et dureté de la résine époxy renforcée de charges, 9ième Congrès de mécanique FS, Senlalia, Marrakech.

[19] **Cheng Fu Yang, Li-Fen Wang, Sang-Mao Wu and Chean-Cheng Su** (2015), Characterizations and curing kinetics of Epoxy / Silica nano-hybrids. Materials 2015 Article, 8 (10) 7032-7040.

[20] **Zabata Massot Céline** (2004), Synthèse des matériaux composites par Co-broyage en voie sèche, caractérisation des propriétés physico-chimiques et d’usages des matériaux, Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse.

[21] **M.I. Giannotti, M.J. Galante, P.A.** (2003), Oyanguren and C.I. Vallo, Role of intrinsic flaws upon flexural behaviour of a thermoplastic modified epoxy resin, Polymer Testing 22: 429–437.

-
- [22] **Sandali Abdeldjalil, Rabhi Nabila** (2012), Comportement au choc des stratifiés composites renforcés par des fibres naturelles (fibres de cactus), Université Kasdi Marbah, Ouargla.
- [23] **Yamina Aimane** (2007), Hyper-élastique pour la simulation des renforts fibreux en grandes transformations. Thèse de doctorat, Institut National des sciences appliquées de Lyon.
- [24] **Yahyaoui Souad** (2006), Etudes expérimentales de la durabilité des éléments fissurés en béton armé rigidifiés par les matériaux composites, Mémoire de Magister, Université de Boumerdes.
- [25] **Mustapha Assarar** (2007), Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs. Thèse de doctorat, Université de Maine.
- [26] **A. Mir** (2010), Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy. Thèse de doctorat, Université de Boumerdes.
- [27] **Brahmakumar M. ; Pavithran C.; Pillai .RM.** (2005), Coconut fiber reinforced polyethylene composites : effect of natural waxy surface layer of the fiber on fiber/matrix interfacial bonding and strength of composites. *ComposSciTechnol*, 65:563–569.
- [28] **Belkacemi Cherifa** (2006), Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale. Mémoire de Magister, Université de Boumerdes.
- [29] **Mohamed El Hadi Bourahli** (2013), Caractérisation d'un composite verre/epoxy, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif 1.
- [30] **Satyanarayana KG.; Arizaga GGC. and Wypych F.** (2009), Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview. *Prog Polym Sci* ; 34 : 982–1021.
- [31] Centre d'animation régional en matériaux avancés - CARMA (2006), Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origines renouvelable.
- [34] **R.P.C. Decathlon.** (2005), Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs. Congrès RFIS.
- [35] **Alexandre D.Y.** (1979), De la régénération naturelle à la sylviculture en forêt tropicale. Adiopodoumé, Côte d'Ivoire : Multig. Orstom.

-
- [36] **Andel T.V.** (2006), Les produits forestiers autres que le bois d'œuvre : la valeur des plantes sauvages. Wageningen, Pays-Bas : Agromisa et CTA.
- [37] **Betti J.L. & Ndzooh D.Z.**, 1998. Les produits forestiers non ligneux. *Canopée*, **12**, 20-21.
- [38] **Bonnéhin L.** (2000), Domestication paysanne des arbres fruitiers forestiers. Cas de *Coula edulis* Baill. (Olacacée) et de *Tieghemella heckelii* Pierre (Sapotacée) autour du Parc National du Taï, Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat : Université de Wageningen (Pays-Bas).
- [39] **Cirad** (2008), Fiche technique de *Coula edulis*. Fiche n°197. In : Gérard J., Guibal D., Beauchêne J. et al. *Tropix 6.0. Caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales*. Montpellier, France : Cirad.
- [40] **CTFT** (1962), Les résultats des observations et des essais effectués au Centre Technique Forestier Tropical sur le *Coula* (*Coula edulis* Baill.-Olacacée). *Information technique n°150*. Nogent S/Marne, France : Centre Technique Forestier Tropical.
- [41] **Drainville L.** (1996), Évaluation du potentiel d'exploitation des ressources forestières non traditionnelles : pièces de bois aux formes utilitaires et décoratives, spores de lycopodes, feuilles de thé et gomme d'épinette. Projet n°1109.
- [42] **LAVISCI P., BERTI S., EDF.** (2007), « Le guide des matériaux pour l'isolation thermique »

ANNEXES

ANNEXE I : TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION

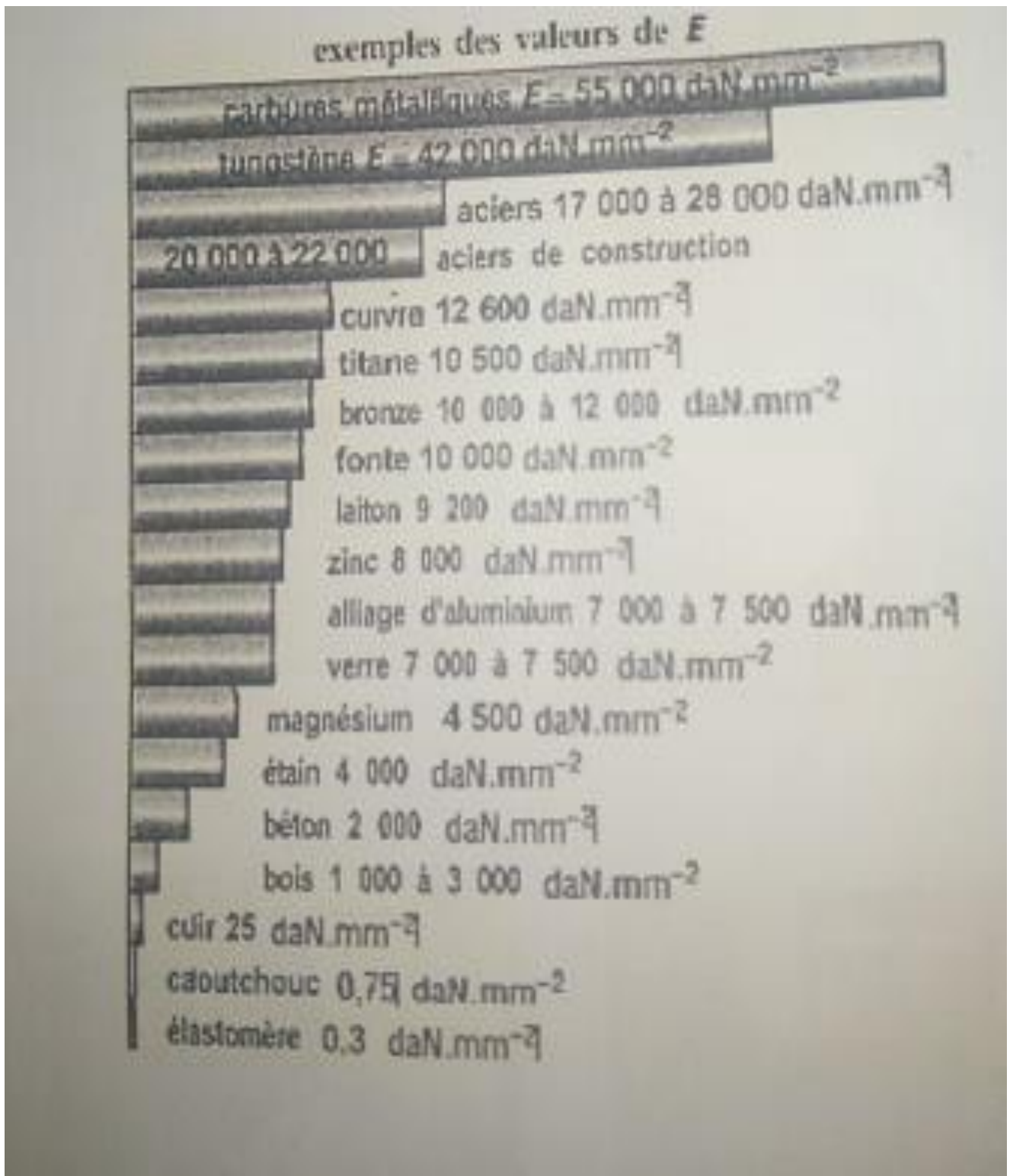
La conduction est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matières, sous l'influence d'une différence de températures. La propagation de chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue par deux mécanismes bien distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

Le phénomène peut se produire aussi dans un solide ou que dans un fluide lorsque la différence de températures n'entraîne pas un transfert de masse chaleur par convection [1].

Matériaux isolants d'origine végétale ; Conductivité thermique applicables de 0 à 100°C et masse volumique [42]

Désignation du matériau	Masse volumique kg.m-3	Conductivité thermique W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Bois aggloméré avec ciment magnésien ou plâtre (plancher de)	780	0,170
Sciures de bois	250	0.116
Cyprès	460	0.105
Ecorce d'arbres (plaque) Erable	340	0.066
Bourrelets de jute	710	0.158
Kapok de Java	94	0.064
Liège expansé pur	16	0.039
__ aggloméré au brai		
__ à la caséine	130	0.038
__ au ciment magnésien	190	0.049
__ au ciment Portland	120	.0167
__ à liant asphaltique (plancher de)	360	0.097
__ en morceaux inclus dans plancher de plâtre	710	0.116
__ en poudre	230	0.052
	685	0.244
__ pur non aggloméré	130	0.044
__ comprimé	240	0.163
	254 – 400	0.046 à 0.070
Lin		
Noyer	80	0.045
Papier de journal comprimé	700	0.267
Pin blanc	130	0.105
Riz (balles de riz)	500	0.113
Sapin (bois de sapin)	100	0.100
Paille Paille comprimée		
Plaque de roseau à mastic(2)		0.120
Teck (bois de teck)	260-360	0.100 à 0°C
	642	0.163

Annexe 2 : Modules d'YOUNG des matériaux usuels



Annexe 4 : Quelques étapes de fabrication des panneaux



1. Coque de coula edulis après broyage



2. Mesure et préparation du mat (résines + renforts)



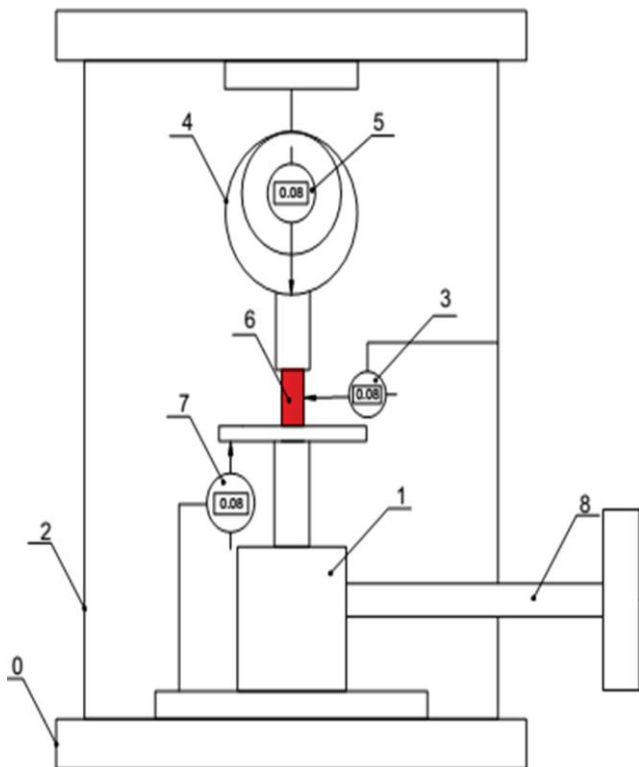
2-Materiau obtenu après 8heures de pressage



3- Matériau découpe selon les proportions après démoulage et séchage

Annexe 5 :

DISPOSITIF EXPERIMENTAL D' ESSAI DE COMPRESSION ET FLEXION



- 0- châssis ;
- 1- Bloc de transformation de mouvement ;
- 2- supports ;
- 3- comparateur électronique (1/1000^{ème}) : variation transversale ;
- 4- anneau élastique (30kN) ;
- 5- comparateur à cadran : déformation de l'anneau élastique ;
- 6- éprouvette ;
- 7- comparateur électronique (1/1000^{ème}) : variation longitudinale ;
- 8- vis de la manivelle.

LEGENDE