

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
ECOLE NORMALE SUPERIEUR
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
D'EBOLOWA
DEPARTEMENT DE GENIE
MECANIQUE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace - Work - Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
HIGHER TECHNICAL TEACHER
TRAINING COLLEGE OF
EBOLOWA
DEPARTMENT OF
MECHANICAL
ENGINEERING

Filière
CONSTRUCTION MECANIQUE

**ELABORATION ET CARACTERISATION PHYSIQUE
ET MECANIQUE D'UN MATERIAU COMPOSITE A
BASE DE L'ENDOCARPE(PARCHE) DE CAFE**

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

Par : **TATIE SANDIE Mathurin**

Sous la direction de
Dr. Laynde TAWÉ
Ph.D en construction mécanique
Prof. ATANGANA ATEBA
**Professeur titulaire Université de
Douala**

Année Académique : 2019 - 2020



Dédicace

Aux
Familles
SANDIE & DJIMAFU

Remerciements

Ce travail de recherche est une expérience très spéciale. C'est un long chemin qu'on commence avec une multitude de questions et avec des périodes de « up & down », et quand les travaux sont achevés, on se rend compte que sur cette période de dur labeur, on a réalisé beaucoup de progrès surtout au niveau du savoir et du savoir-faire. La recherche reste, à notre avis, une belle aventure humaine et scientifique dans laquelle la curiosité, l'envie d'acquérir le savoir, nous incitent à avancer toujours plus loin. Si cette expérience a été menée à bien c'est grâce à de nombreuses personnes que nous avons rencontrées durant ces mois de recherche et que nous souhaitons remercier. Nos remerciements vont tout d'abord vers Dieu tout puissant qui nous a donné de la force et du courage pour terminer cette étude dans de bonnes conditions, d'une part et d'autre part pour la générosité, l'amour et le partage qu'il instaure à l'égard de ceux qui nous ont aidé. De ce fait, nous ne saurons clôturer ce travail sans remercier :

- Docteur Laynde TAWÉ, encadreur de ce mémoire, dont j'ai été maintes fois fasciné par sa créativité et son enthousiasme. Son soutien de tous les instants m'a permis de réaliser ce travail de recherche. Je ne saurais exprimer ma gratitude à son endroit ;
- Professeur ATANGANA ATEBA, coordonnateur de la Faculté des Sciences Agronomiques antenne d'Ebolowa, pour avoir accepté la supervision de nos travaux ;
- Professeur Thomas KANA'A, chef de département du Génie Mécanique de l'ENSET d'Ebolowa pour ses astuces suggérées, ses motivations et ses conseils ;
- Professeur SALOME NDJAKOMO Essiane, Directeur de L'ENSET d'Ebolowa pour le cadre convivial de notre formation, son engagement et pour avoir accepté de présider le jury ;
- Docteur NNENGUE Yannick, pour avoir accepté d'examiner ce travail ;
- Mes parents monsieur et madame SANDIE, pour tout ce qu'ils ont fait pour nous jusqu'à ce que nous arrivions où sommes ;
- Mlle Irène Laure NOUMSI, pour son soutien financier et l'esprit de magnanimité dont elle a fait montre à mon égard ;
- A mon frère d'une autre mère PIEBEING Gildas TCHINO, qui a contribué, d'une manière ou d'une autre, au parachèvement de ce travail ;
- Monsieur Emile SOB, pour ces conseils et son appui multiforme durant deux années de formation à l'ENSET d'Ebolowa.

Ce mémoire est sans nul doute aussi le fruit de la collaboration des étudiants chercheurs, avec lesquels nous avons eu le plaisir de travailler et sans lesquels ce travail n'aurait pas d'importance. Il s'agit de l'équipe de recherche de Chimie des matériaux minéraux évoluant dans le Laboratoire de Chimie Inorganique et de Chimie Macromoléculaire de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Yaoundé I.

Je remercie tous mes vingt-quatre camarades de classe qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, au parachèvement de ce travail.

À tous ceux qui n'ont pas trouvé leur nom dans cette liste et qui aurais dû y être je vous remercie sincèrement et m'excuse de cet oubli.

Glossaire

➤ Abréviations et acronymes

N	Newton
Kg	Kilogramme
ONCC	Office National du Cacao et du Café
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CO₂	Dioxyde de Carbone
MDF	Medium Density Fibreboard (Panneau de fibres (de bois) de densité moyenne)
PA	Panneau A
PB	Panneau B
PC	Panneau C
MPa	Méga Pascal
Ha	Hectare

➤ Nombres adimensionnels

ΔL	Allongement en mm
ε	Déformation

➤ Lettre latine et lettre grecque

F_m	Force maximale en N
MOR	Module Of Rupture (module de rupture) en MPa
MOE	Module Of Elasticity (module d'élasticité) en MPa

Résumé

La valorisation des déchets issus de la transformation des produits agricoles représente une véritable opportunité pour le développement du secteur de l'industrie. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation de la fibre d'endocarpe (parche) de café dans la fabrication des panneaux de particules en matériaux composites. Une présentation générale du café 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. L'endocarpe de café comme renfort et l'époxyde comme résine ont été adoptés comme matière d'œuvre dans notre travail. La réalisation des panneaux a été faite par simple moulage avec compactage à la presse. Trois compositions différentes ont été faites et quarante éprouvettes ont été réalisées en vue d'essais ultérieur. 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. Pour une augmentation en teneur de fibre d'endocarpe de 75 à 85%, la masse volumique apparente décroît de 857,14 à 708,33 Kg/m³ tandis que le taux d'absorption croît de 8,33 à 25%, l'essai de flexion a permis de calculer le module d'élasticité (MOE) variant entre 95,88864 MPa et 355,13984 MPa et le module de rupture (MOR) variant entre 1,71216 MPa et 4,82796 MPa.

Mots clés : Endocarpe de café, panneaux de particules, valorisation.

Abstract

The recovery of waste from the processing of agricultural products represents a real opportunity for the development of the industry sector. This work is part of the development of the endocarp fiber (parchment) of coffee in the manufacture of particles panels in composite materials. A general presentation of coffee and the distribution of its production areas has been made; followed by the study of lignocellulosic particles panels and of some works carried out as part of their recovery. The coffee's endocarp as reinforcement and the epoxy as resin have been adopted as working materials in our work. The panels were produced by simple molding with press compaction. Four different compositions were used and forty test pieces were made for subsequent testing. Two types of characterization were carried out: physical characterization which made it possible to determine the apparent density and the rate of water absorption; the mechanical characterization which provided the modulus of elasticity and the breaking stress of the material obtained. For an increase in endocarp fiber content from 75 to 85%, the apparent density decreases from 857,14 to 708.33 Kg / m³ while the absorption rate increases from 8.33 to 25%, The bending test used to calculate the modulus of elasticity (MOE) which is between 95,88864MPa and 355,13984 MPa modulus of rupture (MOR) varying between 1,71216MPa and 4,82796 MPa.

Keywords: Coffee's endocarp, particle panel, recovery.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Glossaire	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Table des matières	vii
Liste des Tableaux	ix
Liste des Figures	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I.1. GÉNÉRALITÉ SUR LE CAFÉ	4
I.1.1 Origines du café.....	4
I.1.2 Botanique du Café	4
I.1.3 Structure de la graine du café	5
I.1.4 Production de café dans le monde	6
I.1.5 Processus d'extraction de l'endocarpe de café.....	10
I.1.6 Valorisation des sous-produits du café.....	14
I.1.7 Conclusion.....	15
I.2. PANNEAUX DE PARTICULES LIGNOCELLULOSIQUES : SITUATION DES CONNAISSANCES	15
I.2.1 Introduction.....	15
I.2.2 Définition.....	16
I.2.3 Importance des panneaux de particules lignocellulosiques	17
I.2.4 Définition de la fibre végétale	17
I.2.5 Classification des fibres végétales.....	17
I.2.6 Morphologie de la fibre végétale.....	18
I.2.7 Composition chimique des fibres végétales.....	19
I.2.8 Classification des panneaux.....	21
I.2.9 Procédés de fabrication des panneaux de particules.....	22
I.2.10 Imprégnation du matériel fibreux avec la résine ou encollage	24
I.2.11 Mise en forme ou formage.....	24
I.2.12 Conclusion.....	25
I.3. LES MATRICES, LIANTS DES PANNEAUX DE PARTICULES LIGNOCELLULOSIQUES	25
I.3.1 Résines thermoplastiques	26
I.3.2 Résines thermodurcissables.....	27
I.3.3 Différence entre les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables	28
I.4. CARACTERISATION DES MATERIAUX	29
I.4.1 Caractérisation mécanique des matériaux.....	30
I.4.2 Caractérisation physique des matériaux.....	30

I.5. SYNTHÈSE DES TRAVAUX RÉALISÉS	30
I.5.1 <i>La tige de kénaf</i>	30
I.5.2 <i>Epinette blanche, Epinette noire et Sapin baumier</i>).....	31
I.5.3 <i>Chènevotte, anas de lin, écorce de tournesol, paille de colza</i>	31
I.6. CONCLUSION.....	32
Chapitre II: MATERIELS ET METHODE.....	33
II.1. INTRODUCTION	34
II.2. PROCÉDÉ.....	34
II.3. MATIÈRE PREMIÈRE.....	35
II.3.1 <i>Renfort : particule de Parche de café</i>	35
II.3.2 <i>Matrice : Résine Epoxyde</i>	35
II.3.3 <i>Elaboration des panneaux de particules</i>	36
II.3.4 <i>Caractérisation physico-mécanique des éprouvettes</i>	41
II.4. CONCLUSION.....	44
Chapitre III: RESULTATS ET DISCUSSION.....	45
III.1. INTRODUCTION	46
III.2. PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	46
III.2.1 <i>Densité apparente</i>	46
III.2.2 <i>Taux d'absorption d'eau</i>	47
III.3. PROPRIÉTÉ MÉCANIQUE : ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS	48
III.3.1 <i>Interprétation des résultats de l'essai de flexion trois points</i>	48
III.4. CONCLUSION.....	60
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	62
Références Bibliographiques	I
ANNEXES.....	III

Liste des Tableaux

Tableau I-1: Production commercialisée camerounaise des 12 dernières campagnes (En milliers de sacs de 60 kg) [4]	8
Tableau I-2: Estimation du taux de parche obtenu après transformation du café parche en café vert.....	15
Tableau I-3: propriétés morphologiques de quelques fibres végétales [13].....	18
Tableau I-4: Composition Chimique de quelques plantes à fibres [17]	19
Tableau I-5: Caractéristiques des matrices thermoplastiques non renforcées [23].....	27
Tableau I-6: Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables non renforcées [30, 23].....	28
Tableau II-1: composition chimique de l'endocarpe de café [5].	35
Tableau II-2:Caractéristiques des produits utilisés	36
Tableau II-3:Les paramètres de fabrication des panneaux de particules	36
Tableau III-1: Masse volumique des compositions	46
Tableau III-2:Taux d'absorption d'eau.....	47
Tableau III-3: Relevés des essais des éprouvettes de la composition PA	49
Tableau III-4: Résultats d'essai de flexion trois points sur le panneau renforcé à 85%	54
Tableau III-5: Relevés des essais des éprouvettes de la composition PB	55
Tableau III-6:Résultats d'essai de flexion trois points sur le panneau renforcé à 80%	57
Tableau III-7: Relevés des essais des éprouvettes de la composition PC	58
Tableau III-8: Résultats d'essai de flexion trois points sur le panneau renforcé à 75%	60

Liste des Figures

Figure I-1: fleurs de caféier [1]	4
Figure I-2: Fruit de caféier (Coffea arabica) en cours de maturation	4
Figure I-3: la structure du fruit de la graine du caféier [4]	5
Figure I-4: Cartographie des pays producteur de café [2]	6
Figure I-5: Zones de production du café au Cameroun	9
Figure I-6: Station de lavage	11
Figure I-7: Depulpeur de café	12
Figure I-8: Bacs de lavage (pour la fermentation des graines)	12
Figure I-9: Technique de séchage de café	13
Figure I-10: (a) café parche ; (b) café vert ; (c) parche.....	13
Figure I-11: Structure des chaînes polymères de cellulose	20
Figure I-12: Structure des chaînes polymères des hémicelluloses.....	20
Figure I-13: Monomères des lignines	21
Figure I-14: panneaux de bois : (a) panneaux de particules, (b) panneaux de copeaux, (c) panneaux MDF, (d) panneaux OSB, (e) contreplaqué	22
Figure I-15: Structures moléculaires [31] (a) d'un polymère thermoplastique, (b) d'un polymère thermodurcissable	28
Figure II-1: Schéma du procédé de fabrication de panneaux de particules de parches de café	34
Figure II-2: Endocarpe lavé puis séché.....	37
Figure II-3: broyage et tamisage des parches	37
Figure II-4: (1) parche brute ; (2) parche haché ; (3) particules de parche.....	38
Figure II-5: Balance électronique de cuisine SF-400	38
Figure II-6: Méthodologie à adopter pour l'élaboration du panneau	39
Figure II-7: Compactage manuel	39
Figure II-8: Compactage a la presse	40
Figure II-9: Démoulage du panneau	40
Figure II-10: Machine d'essai de flexion trois points INSTRON	42
Figure II-11: Eprouvettes pour essai de flexion.....	43
Figure III-1: Matériau composite obtenu.....	46
Figure III-2: Evolution de la masse volumique en fonction de la teneur en parche	47

Figure III-3: Evolution du taux d'absorption d'eau en fonction de la teneur en parche.....	48
Figure III-4: Droites de régression des courbes force-déplacement de la composition PA ; a) composition PA1 ; b) composition PA2 ; c) Composition PA3 ; d) Composition PA4 et e) Composition PA5	54
Figure III-5: Droites de régression des courbes force-déplacement de la composition PB ; a) composition PB1 ; b) composition PB2 ; c) Composition PB3 ; d) Composition PB4 et e) Composition PB5.....	57
Figure III-6: Droites de régression des courbes force-déplacement de la composition PC ; a) composition PC1 ; b) composition PC2 ; c) Composition PC3 ; d) Composition PC4 et e) Composition PC5.....	60

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. CONTEXTE ET INTERETS SUR LA THEMATIQUE

La mutation de nos activités industrielles vers le développement durable est l'un des plus gros enjeux humains du 21ème siècle. L'utilisation de la biomasse dans divers domaines tels que l'énergie, la construction et les matériaux est une réponse face à la raréfaction des ressources fossiles et face aux risques écologiques [1].

Les pièces et structures mécaniques, que nous utilisons et manipulons quotidiennement, sont toutes constituées d'une matière donnée, choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour lui conférer la forme souhaitée. La notion de matériau est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour la réalisation d'une pièce finie. Le matériau est alors un élément de base constituant la structure qui doit résister aux différentes sollicitations [1].

Les matériaux composites, au sens le plus courant du terme, sont un ensemble de matériaux de synthèse conçus et mis en œuvre essentiellement pour des applications structurales, de façon à ce que la fonction mécanique est dominante. Ces matériaux trouvent de plus en plus d'application pour la réalisation des pièces structurales de dimensions diverses, dans de nombreux secteurs industriels tels que : l'industrie aéronautique, aérospatiale, maritime, industrie automobile, secteur de la construction, ameublement, etc [2].

2. Problématique

Dans le contexte mondial actuel où les matières premières se font de plus en plus rares, où le changement climatique devient inquiétant, l'homme essaie de se tourner vers des matériaux plus naturels. La tendance actuelle est celle selon laquelle les chercheurs essayent de développer des matériaux non polluants et des technologies qui minimisent la consommation d'énergies. Ils se sont naturellement tournés vers des matériaux industriels biodégradables tels que le bois, les fibres végétales etc [3]. Ainsi, contrairement aux ressources minières comme l'or, le diamant et autres, les endocarpes (parches) de café sont des ressources non polluantes pour l'environnement beaucoup plus utilisés comme combustible[4] et son caractère biodégradable nous invite à l'étudier dans le but de trouver les nouvelles matières premières pouvant aider dans le domaine de l'ingénierie.

3. Hypothèse de recherche

L'hypothèse du travail est qu'il est possible d'obtenir des panneaux de particules à base de parche de café avec une résine époxyde ayant une résistance mécanique suffisante.

4. Objectif spécifique

Pour répondre à l'hypothèse, les objectifs scientifiques ci-après ont été définis :

- Elaborer un panneau de particule d'endocarpe (parche) de café avec un liant thermodurcissable ;
- Déterminer les propriétés physiques et mécaniques du matériau composite obtenu.

5. Plan de travail

Ce travail est subdivisé en trois chapitres articulés de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique qui présente de manière générale le café et la répartition de ses zones de production ; suivi de l'étude des panneaux de particules lignocellulosiques et de certains travaux effectués dans le cadre de leur valorisation ;

Le deuxième chapitre expose les différents matériels et décrit la méthodologie de fabrication de panneaux de particules ainsi que les méthodes appliquées pour caractériser leurs performances conformément aux textes de normes en vigueur ;

Le troisième chapitre traite les résultats obtenus en suivant la méthodologie de la recherche illustrée au chapitre précédent afin de les interpréter et d'en discuter ;

Ce mémoire se termine par une conclusion générale rappelant ainsi les objectifs de ce mémoire et les principales conclusions et perspectives tirées de cette étude.

Chapitre I: **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

Chapitre I

I.1. GÉNÉRALITÉ SUR LE CAFÉ

I.1.1 Origines du café

Le caféier est un arbuste aux feuilles persistantes qui serait originaire des hauts plateaux de l'Ethiopie et de l'Afrique tropicale. Une version fait remonter la découverte du café vers 850 et la situe en Abyssinie, l'actuelle Ethiopie. Un berger aurait noté que ses chèvres étaient excitées après avoir mangé les feuilles et les fruits d'un arbuste. Il aurait apporté une branche de l'arbuste à un moine qui prépara une boisson à partir des graines recueillies. Etonnés par l'effet exaltant du liquide, les moines attribuèrent la paternité de cette boisson à une divinité. Une autre légende raconte que le moine, après avoir observé l'agitation des chèvres qui consommaient des baies, aurait eu l'idée de faire bouillir les grains afin d'obtenir une potion qui l'aiderait à demeurer éveillé les nuits de prières. Le mot café provient probablement de l'arabe « qahwah », tandis que certains linguistes affirment qu'il provient du mot « Kaffa », du nom de la province d'Ethiopie où il fut découvert [1].



Figure I-1: fleurs de caféier [1]

I.1.2 Botanique du Café

Les caféiers sont des arbustes des régions tropicales du genre *Coffea* de la famille des Rubiacées. Les espèces *Coffea arabica* (historiquement la plus anciennement cultivée) et *Coffea Canephora* (ou caféier robusta), sont celles qui servent à la préparation de la boisson. D'autres espèces du genre *Coffea* ont été testées à cette fin ou sont encore localement utilisées, mais n'ont jamais connu de grande diffusion [2].



Figure I-2: Fruit de caféier (Coffea arabica) en cours de maturation [1]

Les caféiers sont des arbustes à feuilles persistantes et opposées, qui apprécient généralement un certain ombrage (ce sont à

l'origine plutôt des espèces de sous-bois). Ils produisent des fruits charnus, rouges, violets, ou jaunes, appelés cerises de café, à deux noyaux contenant chacun un grain de café (la cerise de café est l'exemple d'une drupe [3]).

Lorsqu'on dépulpe une cerise, on trouve le grain de café enfermé dans une coque semi-rigide transparente à l'aspect parcheminé correspondant à la paroi du noyau. Une fois dégagé, le grain de café vert est encore entouré d'une peau argentée adhérente correspondant au tégument de la graine.

Coffea arabica, qui produit un café fin et aromatique, nécessite un climat plus frais que *Coffea canephora* (robusta), qui donne une boisson riche en caféine. La culture de l'arabica plus délicate et moins productive est donc plutôt réservée à des terres de montagne, alors que celle du robusta s'accommode de terrains de plaine avec des rendements plus élevés. Le plant mère de la plupart des plants d'arabica du monde est conservé au Hortus Botanicus d'Amsterdam [4].

I.1.3 Structure de la graine du café

Bien qu'il soit techniquement possible de produire des variétés de café génétiquement modifiés, contenant un gène de toxicité aux insectes ou produisant un grain sans caféine, aucune n'est commercialisée, pour l'instant.

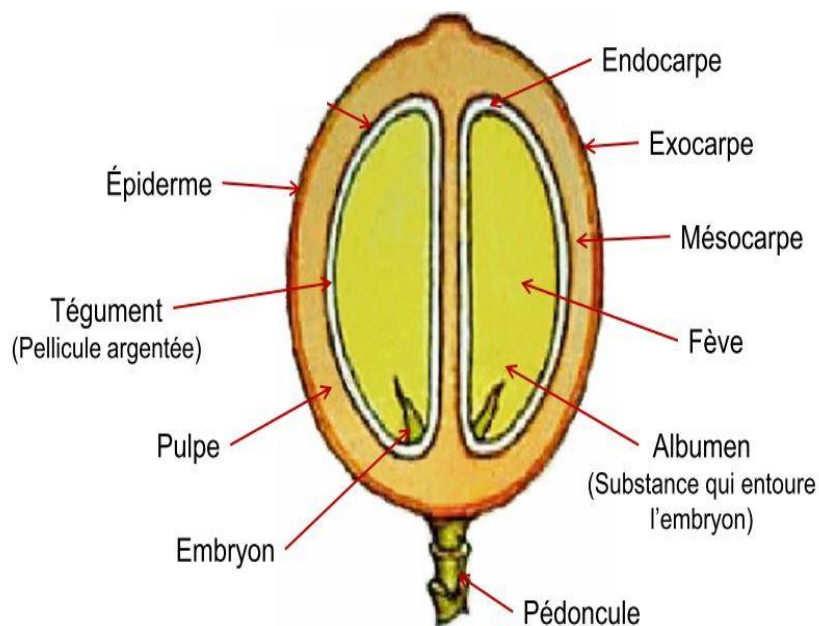


Figure I-3: la structure du fruit de la graine du caféier [4]

I.1.4 Production de café dans le monde

Le café est une boisson, extraite des graines d'un arbuste qui s'appelle le caféier. Cette plante, qui mesure moins de 10 m de haut, pousse en milieu tropical/équatorial. On peut en effet remarquer sur la carte des principaux pays producteurs de café, que ceux-ci sont tous situés dans la zone intertropicale, entre le tropique du Cancer au nord et le tropique du Capricorne au sud. Dans ces régions, en Afrique, en Asie et en Amérique du sud, le caféier est surtout présent dans les zones tropicales les moins chaudes, et se trouve donc souvent en moyenne altitude, entre 200 et 2000 mètres d'altitude. Cela est surtout le cas pour la variété de café la plus cultivée et la plus consommée, *Coffea arabica*. L'autre variété de café consommée, *Coffea robusta*, a une meilleure capacité d'adaptation et peut donc se cultiver à plus basse altitude. Pour se protéger des attaques des insectes, qui se nourrissent des feuilles de la plante, ces deux variétés produisent une substance chimique, qui joue le rôle d'insecticide : la caféine [3].

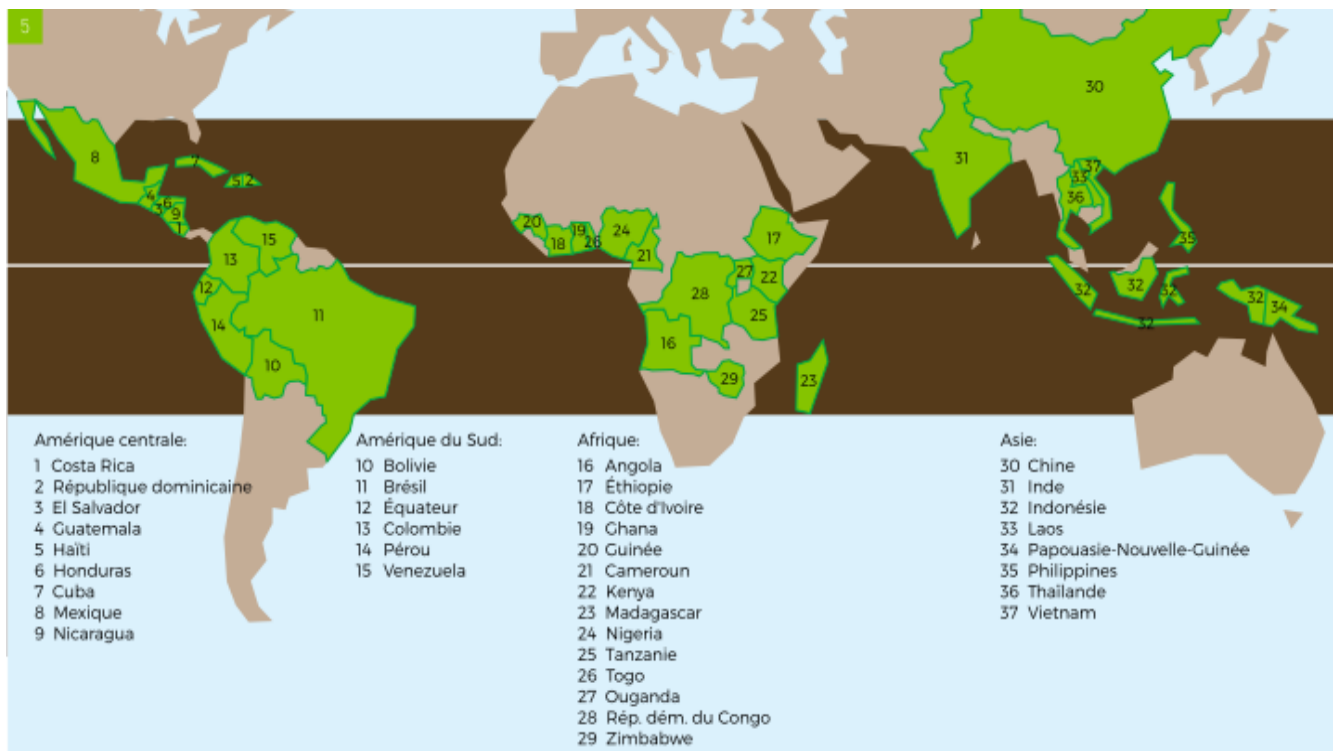


Figure I-4: Cartographie des pays producteur de café [2]

Actuellement, la production de café dans le monde se répartit sur trois continents : en effet, on constate sur la carte des pays producteurs de café que la production se concentre essentiellement en Amérique du Sud, en Afrique tropicale et centrale et en Inde/Asie du sud-est. Dans ces pays, la production de café représente une très grande part de l'agriculture, voire de l'économie en général. En effet, ces pays jouissent de la très grande popularité de la boisson

dans les pays industrialisés : en France, environ 5,6 kg de café sont consommés par an et par habitant. Les pays nordiques sont de loin les plus grands consommateurs dans le monde, avec 12 kg/habitant/an en Finlande et presque 10 kg/habitant/an en Norvège. On remarque que, quelques exceptions comme le Brésil mises à part, les pays producteurs ne sont pas de grands consommateurs de café. On peut donc en conclure que le café est essentiellement un bien d'exportation pour ces pays, ce qui explique la place primordiale qu'occupent la culture et la production de café dans ces pays [3].

On constate également que les variétés sont réparties par continent : ainsi, en Amérique du Sud, c'est la variété *Coffea arabica* qui occupe la majorité des plantations, tandis que l'Asie du sud-est s'est spécialisée dans la production de robusta. Enfin, en Afrique, les deux types de variétés sont présentes, bien que les pays ne produisant que l'*arabica* comme l'Éthiopie (berceau de la culture du café) soient minoritaires [1].

I.1.4.1. Production du café au Cameroun

L'introduction de la culture du café au Cameroun remonte vers 1884. En effet, jusqu'en 1925 les colons s'étaient contentés d'une étude de quelques variétés de café dans les jardins d'essais camerounais tels que Victoria (dans la région actuelle du Sud-ouest), Ebolowa (dans la région actuelle du Sud), Nkongsamba (dans la région actuelle du littoral) et Dschang (dans la région actuelle de l'Ouest). C'est vers les années 1925-1926 que cette culture va connaître une forte extension. Elle s'étendra en zone forestière, notamment à Yokadouma, Abong-Mbang, Doumé, Lomié et Akonolinga. En 1927, ce fut au tour des Hauts Plateaux de l'Ouest d'être expérimentés. À l'issue des essais dans l'ensemble des espaces cultivables, il a été constaté que les terres de prédilection du café seraient les Hauts Plateaux de l'Ouest et la Région du Mounjo [6].

La culture du café s'accélère véritablement dès 1929 avec l'arrivée d'un Français, M. René Coste, Ingénieur Agronome, à la tête de la Station Agricole de Dschang. Il donnera une impulsion très remarquable à cette culture de rente.

La production moyenne du café est passée d'1 million de sacs de 60Kg en 1960 à 1,7 millions en 1980. Elle va atteindre un plafond de 2,2 millions de sacs en 1986/87. À partir de cette période, on a observé une tendance baissière qui atteindra les 409 000 sacs en 2015/16. Ceci est dû en partie à la baisse des rendements, à la suspension de certaines subventions de l'Etat sur les intrants agro-chimiques de production, et de la préférence des agriculteurs pour d'autres productions vivrières jugées plus lucratives.

Il s'ensuit une baisse sensible de la production et une baisse généralisée de la qualité. Face à ceci, l'État Camerounais a opté pour plusieurs stratégies. Une stratégie pour la relance de la filière café a été élaborée en 2011. Puis en 2014, le Gouvernement a adopté un plan de relance des filières cacao et café [7].

I.1.4.2. Perspectives de la production caféière

Les objectifs gouvernementaux de production à l'horizon 2020, tels que déclinés dans la Stratégie sectorielle du MINADER, sont fixés ainsi qu'il suit :

- ✓ Café robusta : 125.000 tonnes ;
- ✓ Café arabica : 35.000 tonnes.

Dans le cadre de l'actualisation du plan de relance, il est prévu le rajeunissement à l'horizon 2020 de 60 hectares de vergers toutes les spéculations confondues, soit, 10 ha pour les caféiers arabica et 50 ha pour les caféiers robusta [16].

I.1.4.3. Répartition géographique de la production du café

Deux variétés de café sont produites au Cameroun : le Robusta et l'Arabica. Le tableau 3 présente la production des 12 dernières campagnes.

Tableau I-1: Production commercialisée camerounaise des 12 dernières campagnes (En milliers de sacs de 60 kg) [4]

Années	Arabica	Robusta	Total	Part (%) Arabica	Part (%) Robusta
2004/05	106	604	710	15	85
2005/06	76	700	776	10	90
2006/07	79	698	777	10	90
2007/08	87	501	587	15	85
2008/09	62	740	802	8	92
2009/10	58	643	700	8	92
2010/11	42	397	439	9	91
2011/12	49	586	635	8	92
2012/13	39	230	269	14	86
2013/14	48	499	547	9	91
2014/15	34	364	398	8	92
2015/16	73	336	409	18	82

D'après cette étude menée par l'ONCC, l'Arabica représente en moyenne 10 % de la production commercialisée contre 90 % pour le Robusta. Ces deux produits sont cultivés dans 7 régions du pays à savoir le Centre, l'Est, le Littoral, le Nord-Ouest, l'Ouest, le Sud, et le Sud-Ouest.



Figure I-5: Zones de production du café au Cameroun [5]

Les régions du Littoral (notamment le département du Mounjo, bastion du Robusta) et de l'Ouest, se partagent l'essentiel de la production totale du pays. Elles concentrent respectivement 41% et 36% de cette production. Les régions du Centre, de l'Est et du Sud, totalisent environ 5%, et produisent exclusivement le Robusta. Le Nord-Ouest, avec 3%, produit l'Arabica exclusivement. Quant au Sud-ouest, il produit aussi bien l'Arabica que le Robusta à hauteur de 15% (Voir figure I-5).

I.1.5 Processus d'extraction de l'endocarpe de café

Avant de se retrouver en une fine mouture propice à préparer un délicieux espresso, le café a subi de nombreuses transformations à partir de la cueillette. Commençons par le début, c'est-à-dire par le caféier. Si les deux variétés poussent sous les latitudes tropicales, l'arabica va préférer un climat frais et tempéré tandis que le robusta se développera plus aisément sous un climat chaud et humide. Tous les deux produisent des fruits, appelées cerises, qui, en tant que telles, ne sont pas aptes à la consommation.

I.1.5.1. La récolte des grains

La récolte se fait sur une période d'environ 2 à 3 mois, au printemps ou à l'automne suivant sa localisation par rapport à l'équateur. Quand les fruits sont mûrs, 6 à 8 mois après la floraison pour l'Arabica et 9 à 11 mois pour le Robusta, la cueillette du café peut commencer. Le fruit mûr, de couleur rouge, se récolte assez tôt pour éviter sa chute. Trois méthodes sont utilisées : La méthode manuelle, l'égrappage et la méthode mécanique [5].

I.1.5.2. La cueillette, méthode manuelle

Elle consiste à récolter manuellement seulement les cerises mûres du caféier. C'est la technique la plus coûteuse, qui oblige de passer plusieurs fois sans interruption par le même arbuste pour ne ramasser à la main que les cerises rouges, mais c'est celle qui obtient les meilleures qualités de café [5].

I.1.5.3. L'égrappage

L'égrappage consiste à racler avec un peigne les branches du caféier pour récolter toutes les cerises d'un seul coup. Avec cette technique c'est un mélange hétérogène de cerises plus ou moins mûres que l'on retrouve et qui est à l'origine des cafés les plus acides (dû aux fruits restés verts).

I.1.5.4. La transformation des grains

Une fois les cerises récoltées, il faut les transformer en café vert : Les petits producteurs commencent généralement le processus de transformation du café avec le dépulpage des fruits, un travail qui s'exécute le plus souvent avec l'utilisation de machines appelées « les dépulpeurs » : elles retirent la pulpe autour du grain. En suivant, le café sera lavé, les grains présélectionnés et enfin, naturellement séchés au soleil ou avec l'aide de sècheurs industriels.

Il y a 03 méthodes différentes pour préparer les grains : la voie sèche, la voie humide et le miellage.

I.1.5.5. La voie sèche, naturelle

Après avoir été ramassées, les cerises sont directement posées au soleil pour sécher. La pulpe sèche petit à petit, rétrécit et finit par se solidifier. Pendant environ trois semaines, les cerises sont régulièrement brassées avec un râteau en bois pour que tous les grains puissent sécher harmonieusement. Une fois secs, les grains sont décortiqués pour enlever les restes de pulpe et de mucilage secs.

I.1.5.6. La voie humide, le café lavé

Cette méthode s'emploie pour obtenir un café de meilleure qualité. Plusieurs étapes sont nécessaires :



Figure I-6: Station de lavage

Après avoir été ramassées, les cerises mûres sont lavées pour éliminer les résidus : le fruit de café est classé par une immersion dans l'eau. Les fruits abîmés ou immatures vont flotter et les fruits en bon état et mûrs vont s'immerger dans l'eau. Il suffira de sortir avec une passoire les fruits en mauvais état flottants à la surface de l'eau.

I.1.5.7. Le dépulpage

Après le lavage, le grain aura encore une quantité significative de pulpe adhérente qu'il sera nécessaire de sortir pour pouvoir le libérer, pour cela, la peau de la cerise et une partie de la pulpe est éliminée en pressant le grain dans le dépulpeur. Les cerises sont dépulpées de suite après la récolte pour leur quitter la peau extérieure et le mucilage (peau visqueuse qui enveloppe le grain) qui se trouve au-dessous. Une fois les cerises dépulpées, le grain est libéré.



Figure I-7: Depulpeur de café

I.1.5.8. La fermentation du grain :

Après leur libération, les grains sont mis en fermentation dans des bacs de lavage, et brassés entre 12 et 36 heures. Ce processus enzymatique décompose les autres capes végétales qui forment une abondance, ce qui lors du déchargement de l'eau dans les ruisseaux ou les fleuves peut causer de sérieux problèmes de contamination. L'affluent (eau de fermentation) doit passer par des puits de filtration.



Figure I-8: Bacs de lavage (pour la fermentation des graines)

I.1.5.9. Le lavage final et séchage du grain

Après le lavage final des grains, l'eau usée peut être versée directement dans les rivières, il faut ensuite mettre les grains à sécher au soleil ou de manière artificielle. C'est comme ça que

l'on obtient le café lavé, décrit comme propre et brillant, généralement moins acide et de meilleure saveur. Néanmoins, cette technique qui est la moins mécanisée, nécessite de disposer de structures et d'approvisionnements suffisants en eau.



Figure I-9: a) Technique de séchage de café ; b) brassage du café

I.1.5.10. Le décortiquage du grain :

La dernière opération de préparation qui permet d'obtenir le café vert, consiste à décortiquer les grains.

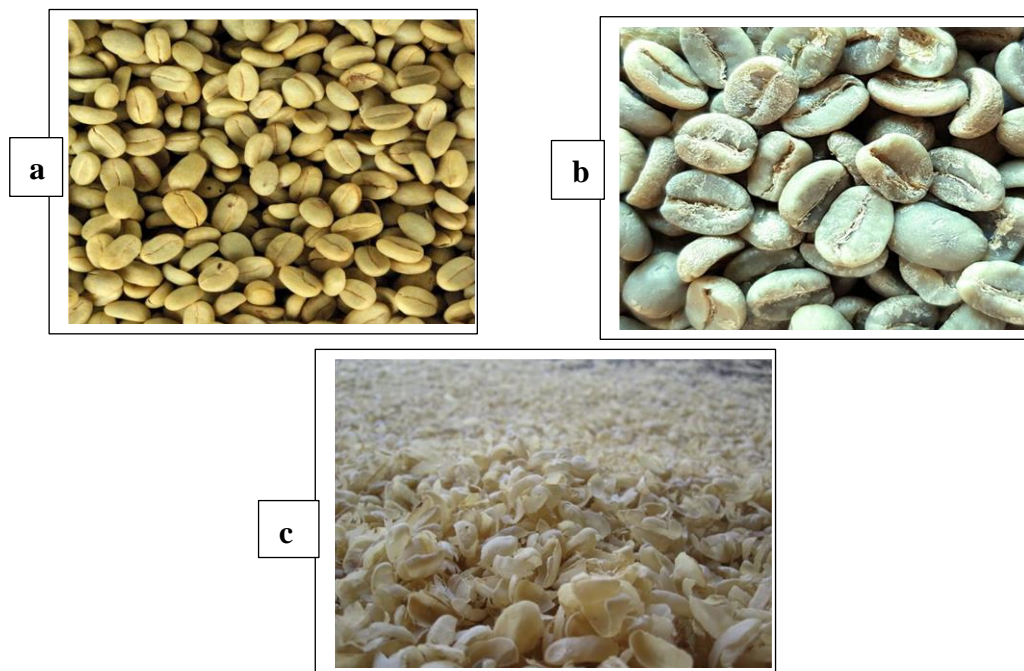


Figure I-10: (a) café parche ; (b) café vert ; (c) parche

Une fois sec (taux d'humidité $\leq 12\%$), le café se décortique pour sortir le parche (c) et la pellicule argentée. C'est le café en grain « lavé » ou « vert » (b) : qui est commercialisé sur les marchés internationaux.

I.1.6 Valorisation des sous-produits du café.

D'après les études menées par le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), dans les pays producteurs de café, les déchets et les sous-produits du café à savoir :

- Les pulpes et les marcs (sous-produits humides) ;
- Les parches et les coques (sous-produits secs) ;
- Les grains défectueux.

Sont une source importante de pollution et un grave problème écologique. Pour faire face à cela, les techniques de valorisation retenues sont : pour la pulpe : digestion anaérobie avec production de biogaz, fermentation pour la préparation d'engrais ou de substrats agricoles, préparation d'aliments; pour les marcs : production d'énergie par combustion après pressage et séchage, engrais; pour les déchets secs : fabrication de charbon, production d'énergie par combustion et gazéification, aliments pour animaux; pour les écarts de triage : extraction de substances chimiques (huiles, acides chlorogéniques, caféine).

En ce qui concerne les parches de café, ils sont constitués pratiquement de lignocellulose pure et n'ont aucune valeur d'engrais. On les brûle généralement dans des fours de base pour sécher le café vert. La plus grande partie du café vert est partiellement séchée au soleil pour des raisons de qualité et il est possible, même avec les séchoirs à air de base actuels à une seule passe, d'économiser du combustible lors d'un séchage de finition. On peut brûler les parches dans un générateur de gaz et alimenter un moteur à partir de ce générateur de gaz pour produire de l'électricité. Comme dans le cas du biogaz, la chaleur récupérée du générateur et du moteur peut servir à chauffer de l'air qui pourra sécher une plus grande quantité de café.

I.1.6.1. Estimation du tonnage de parches café.

La transformation du café parche en café vert génère environ 20% de déchet sous forme de parche. Ainsi le tableau ci-dessous nous donne une estimation de la quantité (en tonne) de parches issu du traitement du café sur six ans.

Tableau I-2: Estimation du taux de parche obtenu après transformation du café parche en café vert (adapté par nos soins)

Année	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	Total
Qté de café produit (en t)	26 340	35 100	16 140	32 820	23 880	24 540	158 820
% de parche	5 268	7 020	3 228	6 564	4 776	4 908	31 764

Ce tableau nous montre à suffisance que la production d'environ 158 820 tonnes de café entre 2010 et 2016 a générée environ 31 764 tonnes de déchets en parche.

I.1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description du caféier, défini sa morphologie, son aire de répartition au Cameroun ainsi que les quantités estimées de cette espèce. D'après les travaux qui ont été réalisés sur le café, on peut noter un certain nombre de points essentiels sur la gestion des sous-produits issu du traitement du café, notamment la parche de café :

- Les parches de café représentent près de 20% du tonnage de café transformé chaque année au Cameroun et provenant d'une source renouvelable ce qui permet sa mise en œuvre dans plusieurs domaines afin de le substituer aux bois de nos forêts. Les quantités issues de l'usinage du café doivent avoir une utilisation judicieuse. Actuellement, ces déchets lignocellulosiques n'ayant aucune valeur d'engrais sont simplement brûlés.
- Absence de toute valorisation de cette fibre végétale en panneaux de particules, qui est l'objectif de notre étude.

I.2. PANNEAUX DE PARTICULES LIGNOCELLULOSIQUES : SITUATION DES CONNAISSANCES

I.2.1 Introduction

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 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.

Face au risque d'épuisement des matières premières non renouvelables et aux émissions de gaz à effet de serre, 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 inscrites dans la perspective d'une réponse aux défis 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 :

- 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 Camerounais, la démarche nous a conduits à rechercher une source de fibres renouvelable.

I.2.2 Définition

Un panneau de particules lignocellulosiques 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 sont de formes et de compositions différentes à l'échelle macroscopique et peuvent être physiquement identifiables avec leur interface remarquable [6].

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 constituées 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[7].

I.2.3 Importance des panneaux de particules lignocellulosiques

Les panneaux de particules, offrent des propriétés spécifiques qui les rendent très utiles et bien appropriés dans des applications ciblées et diversifiées.

Ils sont utilisés dans les applications courantes et variées telles que l'emballage (palettes et conteneurs), l'habitat (installations fixes de magasin, lambris, portes et pièces de menuiserie, plans de travail, platelage des maisons préfabriquées, sous-couches de plancher, etc.). Le mobilier (meubles résidentiels et de bureaux, armoires de cuisine, rayonnage, etc....), la construction automobile et maritime, les constructions industrielles, le génie civil, le sport, la décoration (bardage, boiserie extérieure, parement de porte, etc.).

Les caractéristiques des fibres lignocellulosiques telles que la morphologie, la structure et la composition chimique des fibres lignocellulosiques ont un effet sur les propriétés et le comportement physicochimique des composites dont ils y sont issus.

Les particules lignocellulosiques sont donc des structures à renfort fibreux issues de bois natifs ou recyclées (copeaux, sciures, et chutes), de déchets de bois de post-consommation (palettes et matériau d'emballage rejetés, débris de la construction), de résidus agricoles (chaumes, tiges de cotonnier, etc.), de plantes à fibres (kénaf, chanvre, jute, etc.) [8].

La disponibilité, le coût de production relativement bas, la capacité de renouvellement, la légèreté, la capacité acoustique, la faible conductivité thermique et les bonnes propriétés mécaniques militent en faveur du choix des fibres végétales pour leur transformation en matériaux composites [9].

La morphologie, la structure et la composition chimique des fibres lignocellulosiques ont un effet sur les caractéristiques et le comportement physicochimique des composites qui en sont issus.

I.2.4 Définition de la fibre végétale

Les fibres lignocellulosiques sont des structures biologiques fibrillaires d'origine végétale majoritairement composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine [10], et en proportions relativement faibles d'extractibles non azotés, de matière protéique brute, de lipide et de matière minérale. Les proportions de ces différents constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [11].

I.2.5 Classification des fibres végétales

La classification des fibres végétales n'est pas aisée car il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- ✚ Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (kénaf, jute, lin, ramie, etc.), de feuilles (sisal, abaca, paille de graminées,
- ✚ Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicelluloses) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides provenant de matériels ligneux tels que bois d'œuvre, résidus d'industrie du bois, etc.), les plus utilisées pour la fabrication des panneaux de particules, et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que kénaf, chanvre, sisal, jute, lin, etc.) [12].
- ✚ De par leur longueur, les fibres végétales peuvent être sériées en deux catégories : les fibres longues et les fibres courtes. Les fibres longues, dites libériennes, provenant de tiges et d'écorces de tiges de plantes annuelles sont douces. Par contre, les fibres longues lignocellulosiques issues de feuilles, de tronc d'arbres, d'enveloppe de fruits, etc, sont plus dures et rigides du fait de leur richesse en lignines. Les fibres courtes ou étoupes sont des fibres lignocellulosiques qui sont associées aux fibres longues.

1.2.6 Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de leur origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'espèce (tableau 3) et au sein de la même espèce, de l'organe de provenance, de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante.

Tableau I-3: propriétés morphologiques de quelques fibres végétales [13]

Nature des fibres	Longueur (mm)	Diamètre (µm)	Angle microfibrillaire (°)	Ratio L/D
Lin	4-77	5-76	10	1 687
Chanvre	5-55	10-51	6,2	960
Ramie	40-250	16-126	7,5	3500
Kénaf (filasse)	1,4-5	14-23	-	124
Kénaf (bois)	0,4-1,1	18-37	-	20
Jute	-	25-200	8	110
Sisal	0,8-8	7-47	20	100
Noix de coco	0,3-1	12-24	45	35
Tremble	0,7-1,6	20-30	-	48

I.2.7 Composition chimique des fibres végétales

De nombreuses études ont confirmé l'irrégularité de la composition chimique des fibres végétales variable d'une espèce à l'autre, pour un même type de fibre (longue ou courte) [14]. Dans la même espèce, la composition chimique dépend du degré de maturité de la plante [15], de la géomorphologie de cette dernière, de l'organe de provenance de la fibre. Suivant l'espèce, la teneur de la fibre en cellulose peut varier de 35 % à plus de 90 % pour la fibre technique de coton [16]. De même, pour une espèce, cette teneur peut connaître des variations de l'ordre de 50 % [17]. A l'instar de la teneur en cellulose, le taux de lignine dans la fibre végétale montre une variabilité aussi bien interspécifique qu'intraspécifique (tableau4). La teneur en lignine de la fibre végétale varie également par rapport à la géomorphologie de la plante. Les fibres végétales se caractérisent par des proportions cellulose-hémicellulose-lignine très variables d'une espèce à l'autre. Dans la même espèce, ces proportions dépendent de l'organe de provenance des fibres, de l'état de maturité et de l'environnement de croissance des plantes.

Tableau I-4: Composition Chimique de quelques plantes à fibres [17] (adapté par nos soins)

Types de fibre	Cellulose	Hémicellulose/Pentosanes	Lignine	Cendre
Chanvre	57 - 77	14 - 17	9 - 13	2,5
Kénafe (Ecorce)	44 - 60,8	20,3 - 23	10 - 19	2 - 5
Kénafe (bois)	37 - 49	18 - 24	15 - 21	2 - 4
Jute (Ecorce)	45 - 63	18 - 21	21 - 26	0,5 - 2
Jute (bois)	41 - 48	18 - 22	21 - 24	0,8
Sisal	47 - 62	21 - 24	7 - 9	0,6 - 1
Résineux	48	15	25,3	0,2
Café (Parche)	33,42 - 37,67	9,54 - 10,85	14,13 - 16,02	6,23 - 7,02
Feuillus	52,8	21,8	22,3	0,4

I.2.7.1. La cellulose

C'est un polymère régulier du glucose, de formule $(C_6H_{10}O_5)_n$. Des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires, dues aux nombreux groupements hydroxyles de la chaîne, favorisent l'arrangement de celle-ci en domaines cristallins, avec des zones amorphes à intervalle d'environ 30 nm [18].

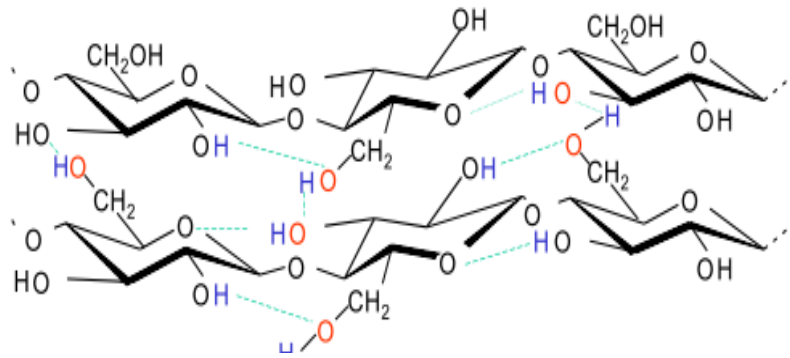


Figure I-11: Structure des chaînes polymères de cellulose [18].

Les micro fibrilles de cellulose forment un système élastique de résistance mécanique, chimique et thermique. La cellulose est responsable de l'essentiel des propriétés mécaniques du bois.

I.2.7.2. Les hémicelluloses

Ce sont des polysaccharides (pentosanes, xylanes, ...) à chaînes plus courtes que celles de la cellulose. Elles sont hydrophiles et susceptibles de gonfler au contact de l'eau, ce qui les rend responsables de l'instabilité dimensionnelle du bois.

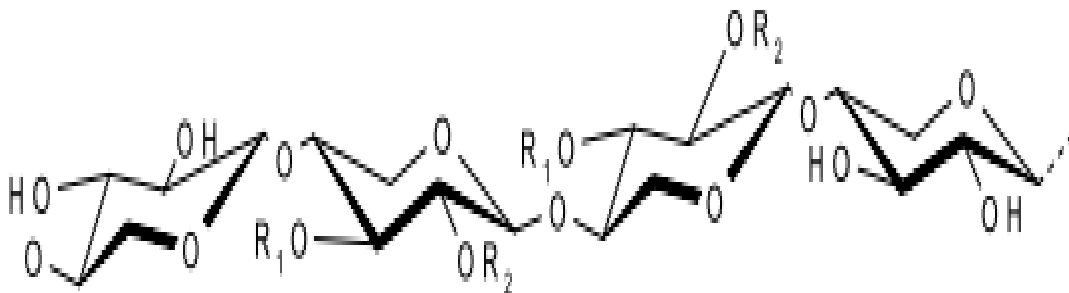


Figure I-12: Structure des chaînes polymères des hémicelluloses [18].

La composition des monomères de départ dépend de la famille de bois (résineux ou feuillu) considérée. Le groupe des hémicelluloses peut donc être scindé en sous-groupes nommés selon le monomère : xylanes, mannanes, galactanes, glucanes [18].

I.2.7.3. Les lignines

Ce sont des polymères tridimensionnels complexes, essentiellement phénoliques, et dont la structure est différente selon la famille de bois et les éléments morphologiques (fibres, rayons, vaisseaux).

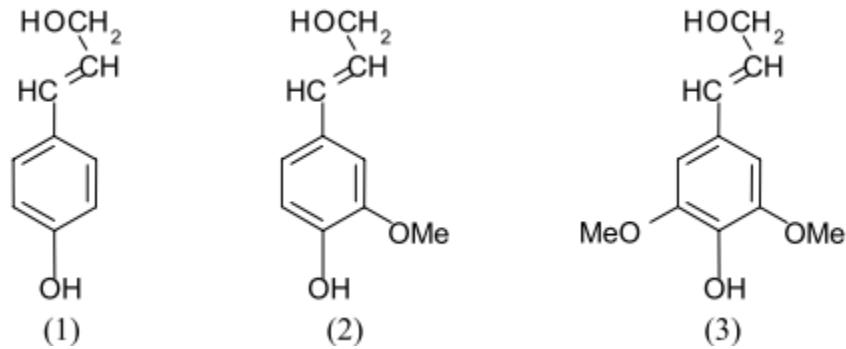


Figure I-13: Monomères des lignines [18].

Les lignines sont totalement amorphes, et présentes dans la lamelle mitoyenne sous forme d'un réseau 3D aléatoire ainsi que dans la paroi secondaire sous forme d'un réseau 2D organisé. Les trois monomères sont des alcools phénylpropénoïques : p-coumarylique (1), coniférikque (2) et sinapylique (3) (voir Figure I-13).

1.2.8 Classification des panneaux

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 contres plaqués.

Suivant la densité, il y a les panneaux d'isolation thermique et acoustique de faible densité ($150 \leq p \leq 450$), les panneaux de fibres (MDF) et les panneaux de particules de densité moyenne ($450 < p \leq 800$) pour l'ameublement principalement et enfin les panneaux structuraux de haute densité ($p > 800$).

Suivant le procédé de fabrication, on distingue les panneaux obtenus par voie sèche et ceux produits par voie humide.

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 revêtus d'un papier sec ou d'un stratifié décoratif.

Selon la forme, les panneaux de particules sont plats. La dimension et la forme des particules font distinguer des panneaux de particules arrondies, plates (waferboard), en lamelles

minces, longues et orientées OSB (Oriented Strand Board) 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 (NF EN 309). Certaines propriétés des panneaux sont présentées en Annexe 4.



Figure I-14: panneaux de bois : (a) panneaux de particules, (b) panneaux de copeaux, (c) panneaux MDF, (d) panneaux OSB, (e) contreplaqué

I.2.9 Procédés de fabrication des panneaux de particules

Les panneaux de bois peuvent être fabriqués selon deux procédés :

- Procédé humide ou sous atmosphère humide : les fibres lignocellulosiques se lient entre elles par des liaisons naturelles de type pont hydrogène lors du rapprochement des fibres par séchage et par pression. Ce procédé suit les étapes suivantes : défibrage des morceaux de bois pour former des fibres, mélange des fibres avec de l'eau, formage, essorage, pressage et enfin mise à dimension.
- Procédé sec ou à sec : un liant est utilisé. Ce procédé se fait en 4 étapes principales : le fractionnement, l'imprégnation, le formage et la finition [19].

I.2.9.1. Le taux d'encollage :

Le taux d'encollage correspond à la quantité de résine consommée pour la fabrication d'un panneau. Il est couramment exprimé comme le pourcentage de résine solide sur la masse

moyenne de copeaux anhydres, utilisés pour la fabrication des couches internes et externes du panneau. Classiquement le taux d'encollage varie de 8-10% pour la couche interne et de 11-13% pour les couches externes.

La résine représente environ 40 % du prix d'un panneau, il est donc important que la quantité de résine utilisée soit toujours la plus basse possible pour des raisons économiques [20].

Néanmoins, du point de vue technologique, un taux minimum de résine est nécessaire pour garantir un collage correct des particules et par conséquent améliorer les propriétés du panneau. Cette quantité minimale de résine varie dans des intervalles assez étroits et dépend du type de résine utilisée. Par ailleurs, une quantité excessive de résine présente des inconvénients technologiques, comme un taux élevé d'humidité qui se traduit par des problèmes de pression de vapeur élevée pendant le processus de pressage à chaud.

Une quantité inférieure de résine utilisée ne signifie pas seulement un coût inférieur du panneau mais cela élimine aussi certains désavantages liés à l'apport d'humidité de la part de la résine. Si cette quantité d'eau est assez basse, spécialement dans les copeaux de la couche interne du panneau, il n'y aura pas de problèmes de pression de vapeur trop élevée pendant le cycle de pressage. Si au contraire, la quantité d'eau présente dans la couche interne du panneau est trop élevée, la pression de vapeur élevée dans le panneau tendra à faire éclater le panneau à la fin du cycle de pressage. Si la différence de pression de vapeur entre les couches externes et interne est plus petite, le transfert de chaleur sera retardé. Donc, si la quantité d'humidité de la couche interne est élevée, la quantité d'eau des couches externes doit être réduite.

Le taux d'humidité des copeaux collés, influence la plasticité des particules. Cette plasticité est importante car elle influence la déformation des particules, afin d'augmenter l'aire de contact entre les particules et assurer une bonne liaison.

Un autre facteur influençant le taux d'encollage sur les propriétés hygroscopiques et mécaniques du panneau est la taille et la forme des copeaux, qui a été étudié par de nombreux auteurs [21]. Le point commun de toutes ces études est l'augmentation des forces de flexion, compression et traction du panneau mais une diminution de la cohésion interne avec l'augmentation de la longueur des copeaux.

I.2.9.2. 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.2.10 Imprégnation du matériel fibreux avec la résine ou 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, 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.

I.2.11 Mise en forme ou formage

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

I.2.11.1. Le thermopressage

Le thermopressage 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.

I.2.11.2. 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 [14].

I.2.11.3. 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.

I.2.11.4. 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.2.12 Conclusion

Nous avons constaté dans cette partie l'importance de la matière lignocellulosique dans l'élaboration de panneaux de particules et le processus de fabrication d'un panneau de particules, ainsi que l'influence de certains paramètres et les méthodes d'élaborations des panneaux sur leurs caractéristiques intrinsèques.

La fabrication des panneaux de particules s'est beaucoup développée ces dernières années, mais la réglementation sur la réduction des phénols contenue dans les colles est très stricte, ce qui a poussé les fabricants à orienter leurs domaines de recherches vers la confection de colles moins polluantes. Cet aspect fait l'objet du chapitre suivant.

I.3. LES MATRICES, LIANTS DES PANNEAUX DE PARTICULES LIGNOCELLULOSIQUES

La matrice est le constituant du matériau composite qui assure la liaison des éléments de renfort. Elle joue des rôles de protection, de transmission des sollicitations et de limitation de la propagation des fissures. Bien que souvent de propriétés mécaniques relativement faibles, la matrice influence beaucoup les propriétés mécaniques des panneaux de particules (rigidité, résistance aux contraintes transversales, aux contraintes de cisaillement, aux contraintes inters

laminaires, au comportement en fatigue et la résistance à la compression). La matrice est un polymère adhésif thermodurcissable ou thermoplastique de composition et de caractéristiques physiques variables.

I.3.1 Résines thermoplastiques

Les thermoplastiques sont dérivés de monomères linéaires ou légèrement ramifiés qui forment le motif de base d'une chaîne où ils sont maintes fois répétés. Sous l'action de la chaleur, le thermoplastique se ramollit conduisant à l'apparition de mouvements à longue portée dans les chaînes moléculaires. Le thermoplastique peut alors être solidifié par refroidissement en prenant la forme souhaitée. Ce processus de ramollissement par excitation thermique et de durcissement par refroidissement peut être répété indéfiniment (La transformation est réversible) [22] car, contrairement aux résines thermodurcissables, quasiment aucune modification chimique ne vient altérer les thermoplastiques. Il s'agit plutôt d'une modification de l'agencement intermoléculaire. Cette aptitude confère aux déchets thermoplastiques des propriétés de recyclage très intéressantes [23].

Les principales familles de thermoplastiques sont les polyoléfines (les polyéthylènes, les polypropylènes), les plastiques à base de polychlorure de vinyle, les acryliques et les polystyrènes. Certains polymères cellulosiques ayant fait l'objet de modification chimique se retrouvent parmi les thermoplastiques comme les acétates de cellulose. La chaîne élémentaire de l'essentiel des thermoplastiques vinyliques est constituée d'un axe carbone-carbone (polymère vinylique) dont les radicaux changent en fonction des différentes familles. Cette structure conduit à différentes propriétés notamment en ce qui concerne le polypropylène. Ce dernier est, de par sa composition et sa structure, chimiquement inerte, résistant à l'humidité (hydrophobe) et à la putréfaction. Il possède aussi une bonne résistance à la fissuration ou aux chocs. Sa plage de thermoformage, située entre 110-130°C [23, 24], est assez élevée pour une polyoléfine mais elle convient toutefois aux fibres cellulosiques qui se dégradent réellement à partir d'une température supérieure à 200°C [23]. Le tableau 1 représente quelques propriétés des polymères thermoplastiques.

Tableau I-5: Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées [23].

Polymère	Tg (°C)	Tf (°C)	Thermoformage (°C)	Densité	σ_t Mpa	Module Elastique Gpa	α_d à 20°C
PP	5	165	150-195	0.92	30	1.2	9
HDPE	-100	134	130-205	0.95	28	1.1	3.4-4.0
PVC	75-105	160-220	100-180	1.39	58	2.9	1.6-7.7
PS	90-100	-	130-155	1.05	55	3.2	1.8-2.4
PET	70	255-265	120-170	1.30	47	2.6	-
ABS	90-120	-	130-200	1.05	50	2.5	-
PMMA	100	-	150-190	1.18	72-80	3.3	1.6-2.8

PP: polypropylène, HDPE: polyéthylène à haute densité, PVC: polychlorure de vinyle, PS: polystyrène, PET: polyéthylène, ABS: acrylonitrile butadiène styrène, PMMA: poly méthacrylate de méthyle.

I.3.2 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables représentent la grande majorité des résines adhésives. Elles sont largement utilisées pour le collage du bois ou dans les composites à base de bois [22]. La réticulation chimique permet la formation d'un réseau tridimensionnel amorphe irréversible par multiplication et fusion d'agrégats. L'essentiel des colles employées sont l'urée formaldéhyde (UF), les résines phénoliques (phénol formaldéhyde : PF) et les colles isocyanates. La nature de la distribution des résines thermodurcissables sur les fibres revêt différents aspects selon le type de colle utilisée et selon la nature des matériaux encollés. Les liens créés par l'UF montrent une tendance à la formation de zones de concentration de résine. Une distribution de petits paquets de colle dispersés sur les fibres (moins de 5% de recouvrement selon [25]). La résine PF se distribuerait de façon beaucoup plus uniforme sur des fibres similaires [26]. Parmi les autres résines les plus courantes, on peut citer les résines époxy (ou époxydes) [27], très employées dans les applications « hautes performances » et la résine polyester [28, 29], peu coûteuses et souvent utilisées dans les applications « grande diffusion ». Les propriétés mécaniques des principaux types de matrices thermodurcissables sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau I-6: Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables non renforcées [30, 23].

Résine	Densité ρ (Kg/m ³)	Module d'Elasticité E (Gpa)	Résistance à la Traction σ (Mpa)	Module d'allongement Rupture (%)	$\nu_{Poisson}$	T_{max} (°C)	α_d (10 ⁻⁵ K ⁻¹)
UF	1.2 – 1.5	6 - 10	40 - 80	-	-	140	0.7 – 1.1
PF	1.1-1.3	3-4	35-60	-	0.36	80-300	-
Polyester	1.2	2.9-4	50-80	2-3	0.4	60-200	0.4-1.6
Epoxyde	1.1-1.4	3-4.5	50-130	3-8	0.4	90-200	0.3-1.6
Phénolique	1.3	3.8-7	50-79	1-1.5	0.4	120-200	1.0-2.3
Uréthane	1.1	0.7-7	30	-	-	100	-
Vinylester	1.1	3.4-3.5	70-85	2-5	-	100-140	-
Polyamide	1.1-1.5	4-20	30-40	<1	-	250-300	-

T max : température maximale d'utilisation, α_d : coefficient de dilatation thermique

Les résines polyépoxydes (E.P) sont comme les polyesters insaturés thermochimiodurcissables. Elles constituent la résine type des composites HP.

1.3.3 Différence entre les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables

La différence essentielle entre ces deux types de polymères est la nature des phénomènes physiques assurant leur cohésion. Les thermoplastiques sont constitués de longues molécules linéaires, maintenues entre elles par des liaisons physiques de faible énergie (liaisons hydrogène ou de Van der Waals, Figure I-15 a) ; ces liaisons se cassent lorsque l'on chauffe le polymère et se rétablissent lorsqu'on le refroidit, de façon réversible. A l'inverse, les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenus par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes, Figure I-15. b) établies de manière irréversible lors de la polymérisation.

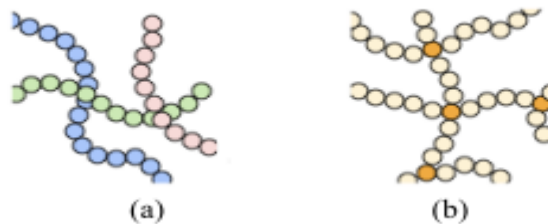


Figure I-15: Structures moléculaires [31] (a) d'un polymère thermoplastique, (b) d'un polymère thermodurcissable

Cette différence fondamentale est à l'origine de propriétés bien distinctes. Voici quelques différences [31] :

- Les thermoplastiques sont moins rigides et moins résistants que les thermodurcissables (mais cela importe peu sur les composites à fibres longues, car la rigidité et la résistance proviennent essentiellement des fibres) ;
- Les thermoplastiques sont plus ductiles que les thermodurcissables, donc résistent mieux à la fissuration ;
- Les déchets thermoplastiques sont recyclables, les déchets thermodurcissables ne le sont pas ;
- Les granulés thermoplastiques peuvent être stockés indéfiniment et à température ambiante, les thermodurcissables doivent être stockés au froid et pendant une durée limitée si la résine et le durcisseur sont déjà mélangés ;
- Les thermoplastiques doivent toujours être portés à haute température pour être mis en forme, ce n'est pas toujours le cas pour les thermodurcissables ;

De manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées que les thermoplastiques en raison de leur plus grande facilité de mise en forme (il est plus facile d'imprégner des fibres avec un liquide qu'avec des granulés ramollis, et les températures à utiliser sont souvent plus raisonnables).

Cette revue bibliographique sur les différentes colles existantes, nous a permis de cerner l'importance des adhésifs dans la fabrication des panneaux de particules. En ce moment une priorité est mise en avant afin de développer des colles à faible impact environnemental.

I.4. CARACTERISATION DES MATERIAUX

La caractérisation est définie comme « l'action de marquer le caractère distinctif de quelqu'un, de quelque chose, en indiquer le caractère, mettre en relief leur trait dominant ; définir ». Elle est définie aussi comme une action permettant « d'analyser les propriétés de cette chose » ou plus précisément un « processus analytique aboutissant à une définition puis à une classification des éléments d'un ensemble ». Nous pouvons donc comprendre que la caractérisation d'un matériau est son examen en utilisant les méthodes et moyens requis pour cerner ses particularités, ses possibilités pour un usage donné. Nous exposons dans ce paragraphe, les principales méthodes de caractérisations des matériaux qui reposent sur les principes physiques de base utilisées pour connaître ou prévoir le comportement d'un matériau en service lorsqu'il est soumis à des sollicitations mécaniques [25].

I.4.1 Caractérisation mécanique des matériaux

Les essais mécaniques sont les plus couramment utilisés en production car ils permettent d'avoir des données sur les propriétés mécaniques, rapidement avec des appareils de mesure relativement simples. Le dimensionnement d'une structure exige aussi la connaissance du matériau et ses caractéristiques mécaniques. Les plus utilisés sont notamment, les essais de traction, de flexion et de compression [26].

I.4.2 Caractérisation physique des matériaux

La caractérisation physique d'un matériau consiste à analyser les propriétés physiques de ce matériau. Il s'agit ici de déterminer la masse volumique apparente, le taux de porosité, la densité et en fin le taux d'absorption d'eau et d'humidité.

I.5. SYNTHÈSE DES TRAVAUX RÉALISÉS

En ce qui concernent les travaux de recherche réalisés dans le domaine des bio-composites, bon nombre d'auteurs ont travaillé sur les méthodes de valorisation des fibres lignocellulosiques pour des domaines d'emploi diversifiés, il est important de nous inspirer de ces travaux menés dans la caractérisation des matériaux composites élaborés à base de ces dernières. Ainsi nous présentons dans ce paragraphe, certains travaux sur des matières premières utilisées comme agents de renforcement. C'est le cas de : tige du Kénaï ; épinette ; sapin baumier ; chènevotte ; anas de lin ; paille de colza et l'écorce de tournesol.

I.5.1 La tige de kénaï

NENONENE Amen Yawo, chercheur à l'Université de Toulouse en France, sur le thème : *Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaï et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage*, en 2010. Ces travaux lui ont permis au travers de l'étude des conditions opératoires du thermopressage (température, durée) de ces particules de tiges écorcées, broyées en présence de résine-urée formaldéhyde (taux d'incorporation de résine, humidité du MAT) de définir un protocole de thermopressage des panneaux. Dans les meilleures conditions (10 % d'UF, 27 % d'humidité du MAT, 180 °C, 1 min à 1,6 MPa et 4 min à 2,7 MPa), les caractéristiques des panneaux obtenus (densité = 540 kg.m⁻³ ; MOE = 450 MPa ; MOR = 4,2 MPa ; IB = 0,4 MPa et TS = 30 %) sont satisfaisantes pour une utilisation comme panneaux de particules de faible densité, à applications générales en milieu sec (type P1).

I.5.2 Epinette blanche, Epinette noire et Sapin baumier)

MOSTAFA TAZI, chercheur à l'Université du QUÉBEC À CHICOUTIMI, le thème : *valorisation des sciures de bois dans des composites thermoplastiques (hdpe-bois) : élaboration, caractérisation et modélisation en soufflage libre*, en Decembre 2015. Il a étudié l'effet de la concentration en bois et celui de la température sur les propriétés rhéologiques de même que les propriétés thermo-physiques, et les caractéristiques structurales des thermo-composites ont été étudiés dans son analyse numérique par la méthode de soufflage libre des membranes composites. Il est arrivé à la conclusion selon laquelle, au cours de la phase de soufflage, le volume et la pression interne de la membrane thermoplastique sont fonction de la proportion de particules de bois dans le composite. La distribution finale des contraintes de Von-Mises et des taux d'amincissement des thermo-composites est également fonction de la teneur en bois. On constate que le comportement des composites avec des proportions élevées en particules de bois (50% et 60%) change et le composite devient rigide. En conséquence, la mise en forme par moulage-soufflage ou par thermoformage se limiteront donc seulement à des produits qui ont des formes géométriques simples, faiblement creuses et ne comportant pas des détails.

I.5.3 Chênevotte, anas de lin, écorce de tournesol, paille de colza

Hélène Lenormand, Angélique Mahieu, Nathalie Leblanc et Alexandre Vivet, dans leur article intitulé *Nouvelles agroressources pour panneaux de particules 100% biosourcés*, ayant pour objet d'étude la comparaison de quatre agroressources au travers de l'étude des propriétés physicochimiques de panneaux agglomérés 100% biosourcés. Les mesures de conductivité thermique démontrent que les matériaux élaborés sont de bons isolants. Cette performance thermique est due à la caractéristique naturelle de ces matières végétales à être naturellement poreuse. Les mesures de sorption à la vapeur d'eau et de résistance mécanique des matériaux mettent en évidence que deux de ces quatre agroressources présentent des performances comparables voire supérieures à celle du matériau de référence élaboré avec des particules de bois et de colle UF. Il s'agit de la chènevotte et des anas de lin. Globalement, cette étude a démontré la faisabilité à l'échelle laboratoire, de panneaux 100% biosourcés sans ajout de colle synthétique en utilisant les caractéristiques naturelles des matières végétales (porosité, composite). Les agroressources étudiées ici, notamment la chènevotte et les anas de lin, semblent donc de bons candidats au remplacement du bois pour la fabrication de panneaux agglomérés de faible densité.

I.6. CONCLUSION

Afin de pouvoir réaliser notre travail, une étude préliminaire sur le café et les panneaux de particules était nécessaire. Nous avons pour cela, dans cette partie présenté l'état de la production du café dans le monde et plus précisément au Cameroun. Il s'avère que, la transformation du café génère 20% du poids du café brut en parche ; ce qui représente 31 764 tonnes de parche en 6 ans, qu'on se propose de valoriser dans la production des panneaux de particules. Nous avons présenté les travaux de certains auteurs qui se sont servi des fibres lignocellulosiques pour la production des panneaux, ce qui nous permis d'avoir une idée sur la méthode d'élaboration et les caractéristiques du matériau composite à obtenir. On se rend compte que les résines les plus utilisées sont des matrices thermodurcissables. Dans la suite de notre travail nous considérons une production de panneaux avec l'endocarpe comme renfort et l'époxyde comme liant, au vu de ses caractéristiques physico-mécaniques élevées par rapport aux autres résines présentent dans la littérature.

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

Chapitre II: **MATERIELS ET METHODE**

II.1. INTRODUCTION

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de " nouveaux matériaux ". En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite (matrice + renfort), qui fait le sujet de notre étude. Dans ce chapitre, nous présentons le processus d'obtention de la parche de café. Et ensuite, décrivons les étapes d'élaboration du composite parche de café/résine époxyde et enfin nous étudierons le comportement des éprouvettes normalisées avec taux de renforcement différents cas la flexion 3-points.

II.2. PROCÉDÉ

Le procédé que nous allons suivre pour réaliser notre panneau de particules de l'endocarpe de café s'articule comme suit :

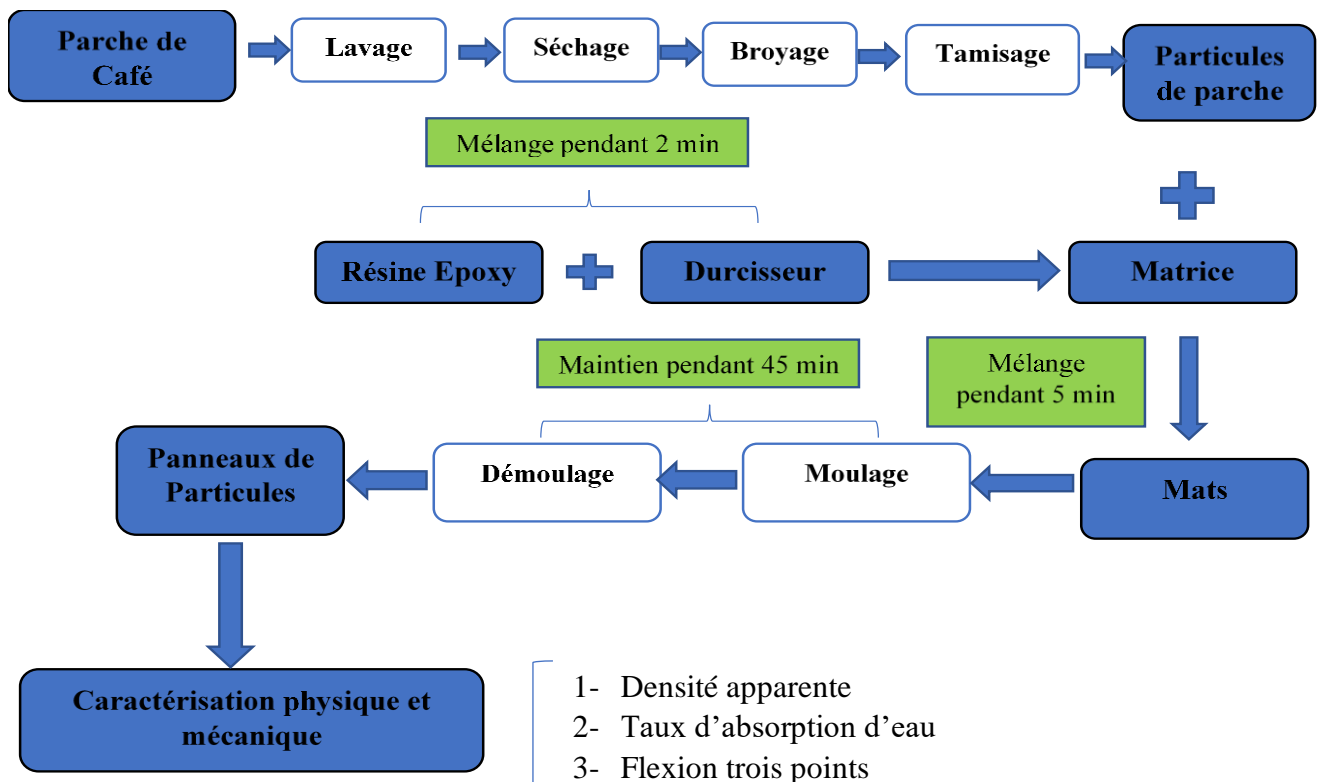


Figure II-1: Schéma du procédé de fabrication de panneaux de particules de parches de café

II.3. MATIÈRE PREMIÈRE

II.3.1 Renfort : particule de Parche de café

La matière lignocellulosique (endocarpe de café) utilisée comme renfort dans notre étude provient des déchets de la transformation des fruits de caféier (figure II-3). Ces déchets représentent 20% du poids total du café transformé. Cette matière fut collectée auprès d'une usine locale de torréfaction de café.



Figure II-2 : Café parche



Figure II-3 : endocarpe de café

II.3.1.1. Caractéristique chimique

Le parche de café est une fibre végétale lignocellulosique essentiellement constitué de cellulose, d'hémicellulose et de lignine.

Tableau II-1: composition chimique de l'endocarpe de café [5].

Fibre	Cellulose	Hémicellulose/Pentosanes	Lignine	Cendre
Endocarpe de café	33,42 - 37,67	9,54 - 10,85	14,13 - 16,02	6,23 - 7,02

II.3.2 Matrice : Résine Epoxyde

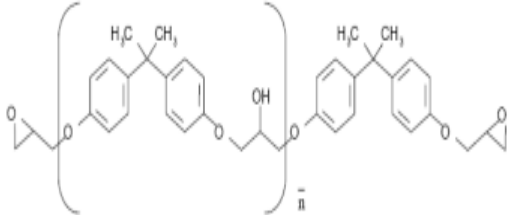
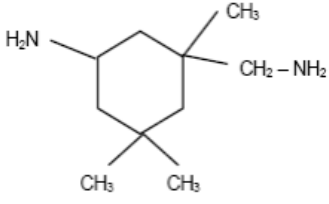
Le prépolymère diépoxyde utilisé est un diglycidyl éther de bisphénol A avec un nombre moyen n de groupement hydroxyle pour deux groupements époxydes présents sur le prépolymère époxyde de $n = 0,15$ (DGEBA ; LY 556 ; commercialisée par l'établissement SUPERMESURE, Douala rue FOCH501).

La diamine cycloaliphatique utilisée est l'isophorone diamine qui contient un groupement aliphatique et un autre cycloaliphatique. Ce durcisseur est sous forme de liquide à la température ambiante avec une masse molaire de 170g/mol et une fonctionnalité égale à 4.

II.3.2.1. Caractéristique physique et chimique de l'époxyde

Le tableau ci-dessous englobe les structures chimiques et les propriétés physiques de ces réactifs :

Tableau II-2:Caractéristiques des produits utilisés

Réactifs	Structure chimique	Propriétés physiques
Prépolymère DGEBA		$n = 0,15$ $M = 380 \text{ g/mol}$ $d = 1,169$ $f = 2$
L'isophorone diamine		$M = 170 \text{ g/mol}$ $d = 0,92$ $g = 4$

II.3.3 Elaboration des panneaux de particules

La structure du panneau fabriqué correspond à un panneau monocouche, mélangé à 15 % de résine en poids solide. Les dimensions des panneaux sont de $200 \times 200 \times 15 \text{ mm}^3$.

Ce matériau sera élaboré par simple formage dans un moule en bois au dimension de notre panneau de particule.

Les paramètres de fabrication des panneaux de particules sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau II-3:Les paramètres de fabrication des panneaux de particules

Paramètres de fabrication	Panneau de particules
Dimensions du panneau	$200 \times 200 \times 15 \text{ mm}^3$
Poids	800 g
Teneur en renfort	80%
Type d'adhésif	Epoxyde

Cette élaboration sera faite selon les étapes suivantes :

II.3.3.1. LA PREPARATION DES PARTICULES DE PARCHE

a. Lavage et séchage

Ces parches de café ayant un taux d'humidité de 8% lors de l'acquisition ont été lavées abondamment à l'eau pour éliminer les poussières puis séchées au soleil pendant 72 heures environ afin d'enlever les impuretés et réduire au maximum le taux d'humidité (2%).



Figure II-2: Endocarpe lavé puis séché

b. Broyage et tamisage

Pour un bon mélange, nous avons besoin de broyer et tamiser les parches de café préalablement séché. Pour cela nous avons utilisé un broyeur à couteaux de marque SANTOS modèle A06 suivant deux étapes. Les particules obtenues sont ensuite tamisées à l'aide d'un premier tamis ayant un grillage de 5mm de maille. Ensuite, les particules obtenues sont tamisées une seconde fois avec un tamis qui laisse passer uniquement les poussières et son grillage à un diamètre de 0,02mm.



Figure II-3: broyage et tamisage des parches

Les tamis ont été fabriqués à la main. Le grillage de forme carrée, mesurant approximativement 1 m par 1 m, est entouré de quatre planches de bois d'une hauteur de 10 cm. Pour tamiser, il suffit de brasser le tamis suffisamment longtemps pour que les particules de la taille désirée soient passées à travers le tamis.



Figure II-4: (1) parche brute ; (2) parche haché ; (3) particules de parche

II.3.3.2. Méthode d'élaboration

Les parches de café et la résine époxy sont mélangés selon la proportion (massique) souhaitée. Quantifier par une balance électronique de cuisine calibrée au centième près,



Figure II-5: Balance électronique de cuisine SF-400

Les échantillons ont été confectionnés avec les proportions de parche suivant :

$$P(\%) = \frac{M_{PC}}{M_{RE} + M_{PC}} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

Avec : $P(\%)$: Pourcentage massique des particules de parche ;

M_{PC} : Masse des particules de parche ;

M_{RE} : Masse de la résine.

Au cours de notre étude la méthodologie adoptée est la suivante (figure : II.3-6) :

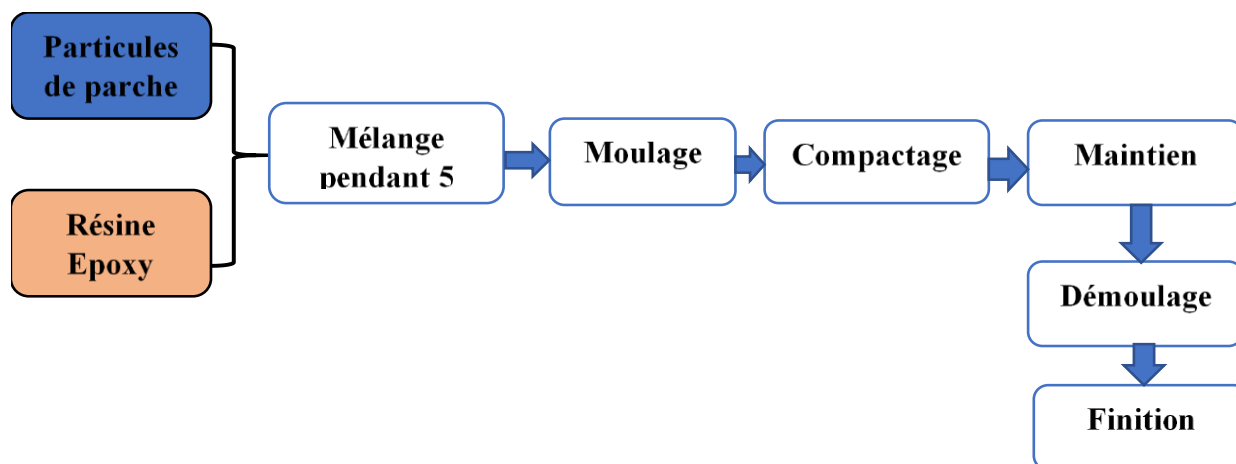


Figure II-6: Méthodologie à adopter pour l'élaboration du panneau

1-Melange :

Les particules de parche sont mélangées avec de la résine époxyde préalablement avec son durcisseur.

2-Moulage :

Le mat obtenu après mélange est introduit par garnissage manuel dans un moule. Pour faciliter le démoulage, l'intérieur du moule en bois a été habillé par du ruban adhésif (scotch).

Pour les essais de flexion et de taux d'absorption d'eau, cette étape a été faite suivant les normes NF-EN 310 et NF-EN 317.

3-Compactage manuel :

Dans le souci d'avoir un panneau d'épaisseur uniforme sur toute sa surface et éviter des faibles concentrations de contrainte en un point quelconque de la surface susceptible d'affaiblir le matériau, la répartition du mélange dans le moule est effectuée à l'aide d'une règle et d'un taquet en forme de T.



Figure II-7: Compactage manuel

4-Compactage à la presse

Pour une bonne mise en forme, le mélange introduit dans le moule est comprimé par une presse manuelle (figure II-8)



Figure II-8: Compactage a la presse

5-Démoulage :

Après 8 heures de compactage, la presse est desserrée, le moule récupéré, ouvert et tapoté à l'aide d'un marteau pour retirer le panneau. Apres démoulage, les panneaux de particules sont séchés à la température ambiante puis pesés à l'aide d'une balance électronique (Figure II.7).



Figure II-9: Démoulage du panneau

6-Finition :

La finition ici a consisté à stabiliser les dimensions du panneau après démoulage en le polissant à l'aide d'un papier abrasif.

II.3.4 Caractérisation physico-mécanique des éprouvettes

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.3.4.1. Découpe des éprouvettes de panneaux de particules

Chaque panneau de particules est découpé suivant les recommandations des normes suivantes :

- NF EN 310 pour les essais en flexion trois points ;
- NF EN 317 pour le gonflement en épaisseur et la densité.

II.3.4.2. Caractérisation Physique

a. Masse volumique apparente

La masse volumique ou bien densité est sans doute de toutes les caractéristiques de panneau, la plus importante, c'est un paramètre physique qui vise à préciser à un état d'humidité donné, la quantité massique de matière ligneuse contenue dans un volume.

La masse volumique apparente d'un panneau de particules est déterminée suivant les exigences de la norme NF-EN 323 sur les éprouvettes de dimension 50x50x12mm³. 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.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{avec : } \begin{cases} \rho: \text{Masse volumique de l'éprouvette (Kg/m}^3\text{)} \\ M: \text{Masse de l'éprouvette (Kg)} \\ V: \text{Volume de l'éprouvette (m}^3\text{)} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

b. Taux d'absorption d'eau

L'analyse du pouvoir d'absorption d'eau est effectuée sur les différents éprouvettes, séchés, en les immergeant dans l'eau potable à température ambiante. Ces échantillons sont pesés avant et pendant l'immersion jusqu'à obtention d'une masse constante. Ce taux d'absorption est donné par les relations suivantes :

$$T_A = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad \text{avec : } \begin{cases} M_f: \text{Masse finale de l'éprouvette après l'immersion} \\ M_i: \text{Masse initiale de l'éprouvette avant l'immersion} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

II.3.4.3. Caractérisation Mécanique

a. Essai de flexion trois points

L'essai de flexion trois points est un test mécanique statique, qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps (comme le choc, la dureté...). Cet essai permet de caractériser les propriétés intrinsèques et extrinsèques du matériau étudié. Il est très facile à mettre en œuvre (absence de système de fixation d'éprouvette, géométrie simple des échantillons), et il reproduit assez bien les sollicitations courantes auxquelles sont soumises les pièces industrielles.

b. Présentation de la machine d'essai de flexion trois points

Pourvu de deux rouleaux d'appui de 10 mm de diamètre distants de 100 mm, et d'un rouleau de chargement de même diamètre. La machine d'essai de flexion trois points, est la même que celle qui effectue l'essai de compression. Le bloc de compression est remplacé par un bloc de flexion trois points. Les trois plans verticaux passant par les axes des trois rouleaux doivent être parallèles pendant l'essai, un des rouleaux d'appuis et de chargement doivent pouvoir osciller légèrement par rapport à leur milieu dans leur plan vertical, pour permettre une distribution uniforme de la charge sur la largeur de l'éprouvette prismatique. En évitant tout effort de torsion, ces plaques sont en acier dure et sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale. L'une d'elles peut être inclinée légèrement pour permettre le contact parfait avec l'éprouvette. La figure (II-10) présente la machine d'essai de flexion trois points avec une l'éprouvette en phase d'essai, utilisée dans le Laboratoire National de Génie civil de Yaoundé.



Figure II-10: Machine d'essai de flexion trois points INSTRON

c. Présentation des éprouvettes de l'essai de flexion trois points

Les échantillons du matériau composite moulés pour l'essai de flexion trois points sont de forme prismatique de section $40 \times 40 \text{ mm}^2$ et de longueur 160 mm. Le dispositif de moulage

est parfaitement étanche, démontable et rigide afin d'éviter toute déformation lors de la mise en œuvre des éprouvettes. Il permet l'exécution simultanée de trois éprouvettes grâce à ses trois compartiments assemblés sur un socle de fixation boulonnés. D'après la norme EN 196/01 – NF/ISO 676 qui traite l'essai de flexion trois sur la presse électro hydraulique Impact Test Equipment Limited utilisée dans le laboratoire de chimie inorganique de la faculté des sciences appliquées de l'université de Yaoundé I, la tolérance sur les dimensions du dispositif de moulage est plus ou moins 0,5mm. La figure (II-11) présente les éprouvettes Pour l'essai de flexion trois points.



Figure II-11: Eprouvettes pour essai de flexion

d. Mode opératoire pour l'essai de flexion trois points

Avant de placer l'éprouvette sur la machine d'essai, celle-ci est soumise à une détermination de la longueur L par mesure et traçage. Puis l'essai se déroule suivant les étapes suivantes :

- La charge F est appliquée grâce au plateau mobile via le rouleau de chargement sur l'éprouvette à une vitesse de 0,1mm/s jusqu'à la rupture ;
- L'afficheur multifonction fait apparaître la courbe contrainte en fonction du temps au fur et à mesure que la rupture se prononce ;
- Dès qu'il y'a rupture complète, arrêter la machine, relever la valeur de la force maximale de rupture et filmer la courbe ;
- La valeur de la déformation est obtenue par mesure à l'aide d'un pied à coulisse électronique de la longueur de la tige du plateau mobile.

Cet essai est réalisé sur des échantillons âgés de 20 jours après démoulage (Figure II-11).

Nous avons utilisé dix éprouvettes de dimensions 160mm x 40mm de chaque panneau de particules afin de déterminer la résistance mécanique en flexion trois points conformément à la norme NF-EN 310. Le module d'élasticité en flexion (MOE) et le module de rupture (MOR) sont calculés suivant les formules suivantes :

$$MOE = \left(\frac{L^3}{4 \times b \times e^3} \right) \left(\frac{F_2 - F_1}{a_2 - a_1} \right) \text{ avec : } \begin{cases} F_i: \text{ la force mesurée pour un déplacement } a_i \\ L: \text{ la distance entre les points d'appui} \\ b: \text{ la largeur de l'éprouvette} \\ e: \text{ l'épaisseur de l'éprouvette} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$$MOR = \left(\frac{3 \times L}{2 \times b \times e^2} \right) \times f_{rupture} \text{ avec : } \begin{cases} f_{rupture}: \text{ la charge mesurée à la rupture} \\ L: \text{ la distance entre les points d'appui} \\ b: \text{ la largeur de l'éprouvette} \\ e: \text{ l'épaisseur de l'éprouvette} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

II.4. CONCLUSION

Ce chapitre présente un ensemble d'informations sur le processus d'élaboration des panneaux de particules et les méthodes appliquées pour caractériser leurs différentes propriétés. Ce chapitre, traite aussi les différentes expérimentations réalisées afin de mieux connaître ce matériau nouveau à base des parches de café.

La partie suivante est dédiée aux résultats et discussions.

Chapitre III: **RESULTATS ET DISCUSSION**

III.1. INTRODUCTION

Pour l'élaboration d'un matériau à base d'endocarpe de café et de l'époxyde, il est nécessaire de chercher les proportions optimales des constituants afin d'obtenir un produit qui respecte les normes. Cependant leur entrée véritable dans la gamme des produits d'ameublement/construction sera basée sur leurs performances physiques et mécaniques. Ce chapitre présentera l'influence de chaque proportion sur les résistances mécaniques obtenues à partir des essais destructifs et non destructifs.



Figure III-1: Matériau composite obtenu

III.2. PROPRIÉTÉ PHYSIQUE

III.2.1 Densité apparente

Nous avons relevé les données de trois compositions différentes de dix éprouvettes chacune, après les avoir recouvertes d'une couche de paraffine nous les avons pesées et calculées les volumes, nous obtenons les résultats mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau III-1: Masse volumique des compositions

Composition	PA	PB	PC
Masse Totale (g)	800	800	800
Teneur en Parche (%)	85	80	75
Teneur en Epoxyde (%)	15	20	25
Masse volumique (Kg/m ³)	708,33	821,25	857,14

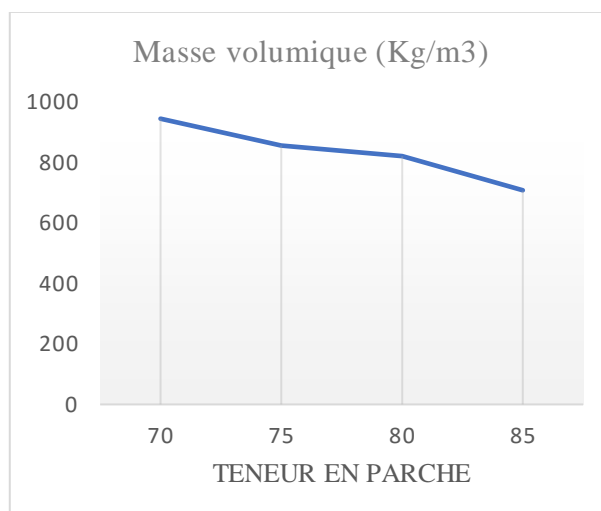


Figure III-2: Evolution de la masse volumique en fonction de la teneur en parche

Discussion :

Nous constatons que la masse volumique croit au fur et à mesure que la teneur en résine augmente et celui de l'endocarpe diminue car il y a eu solidification de la résine pendant le compactage et nous avons fait varier deux paramètres lors de cette étude : la teneur en résine et en parche. La masse volumique des panneaux variant entre $708,33 \text{ Kg.m}^{-3}$ et $857,14 \text{ Kg.m}^{-3}$ nous permet de classer le panneau PA ayant un renforcement de 85% parmi les panneaux de moyenne densité et les panneaux PB et PC, renforcés respectivement à 80% et 75% parmi les panneaux de haute densité [23].

III.2.2 Taux d'absorption d'eau

Nous avons mesuré les masses des éprouvettes à sec et trempées pendant 24 heures, elles sont à nouveau pesées puis retrempées dans l'eau ainsi de suite jusqu'à obtenir la masse finale où les éprouvettes ne peuvent plus absorber de l'eau. Les taux d'absorption sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III-2: Taux d'absorption d'eau

Composition	PA	PB	PC
Masse Totale (g)	800	800	800
Teneur en Parche (%)	85	80	75
Teneur en Epoxyde (%)	15	20	25
Taux d'absorption (%)	25	21,65	14,46

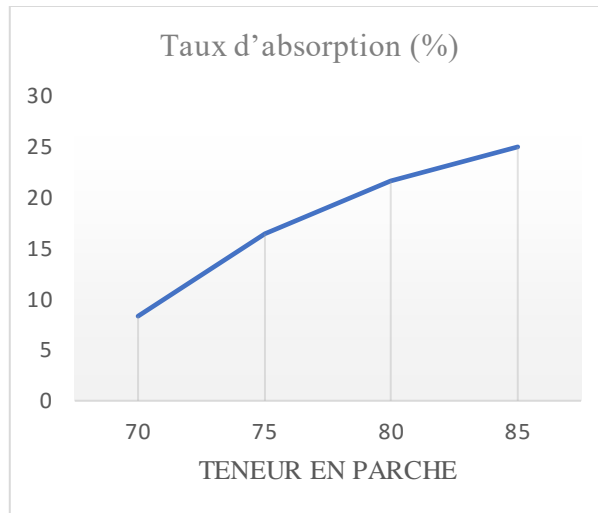


Figure III-3: Evolution du taux d'absorption d'eau en fonction de la teneur en parche

Discussion :

Nous remarquons que le taux le plus élevé est celui de la composition PA avec 25% tandis que le taux le plus faible est celui de la composition PC avec un taux de 14,46%.

La masse volumique des panneaux variant entre

III.3. PROPRIÉTÉ MÉCANIQUE : ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS

L'essai de flexion trois points nous a permis de déterminer les efforts maximums de flexion, les résistances maximums et les modules d'élasticité sur plusieurs échantillons du matériau composite parche/époxyde. Parmi les 45 éprouvettes réalisées nous avons fait les essais sur 15. Les résultats de ces essais sont récapitulés dans les tableaux ci-dessous, ainsi que les courbes donnant les déplacements en fonction des chargements. Dans les tableaux qui suivent, ont été consignées les valeurs des forces et allongement relevés lors des essais de flexion trois points.

III.3.1 Interprétation des résultats de l'essai de flexion trois points

III.3.1.1. Caractérisation de la composition PA (85% parche/15% époxyde)

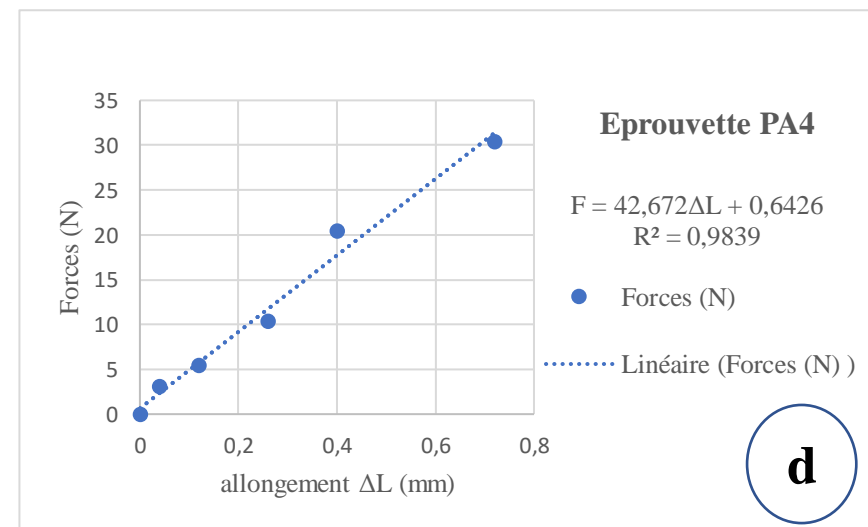
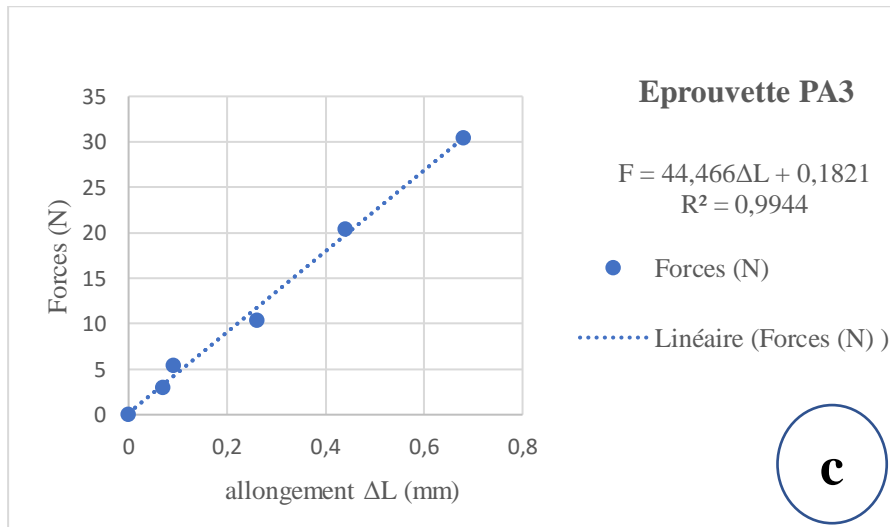
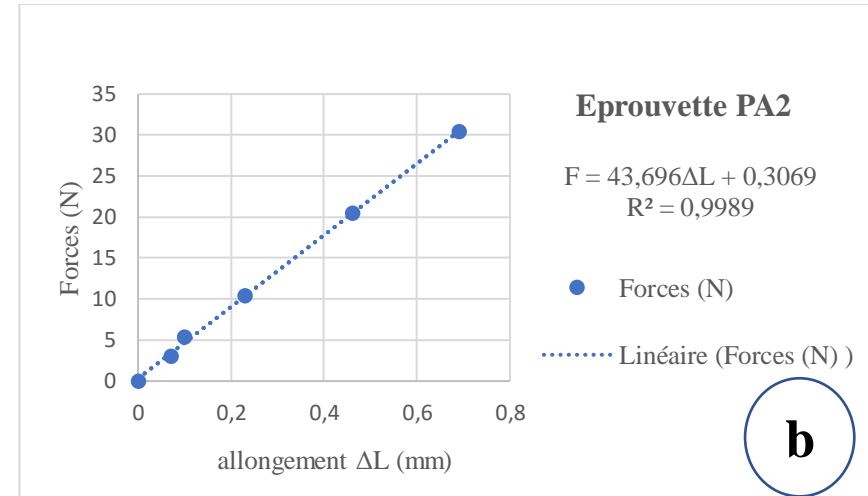
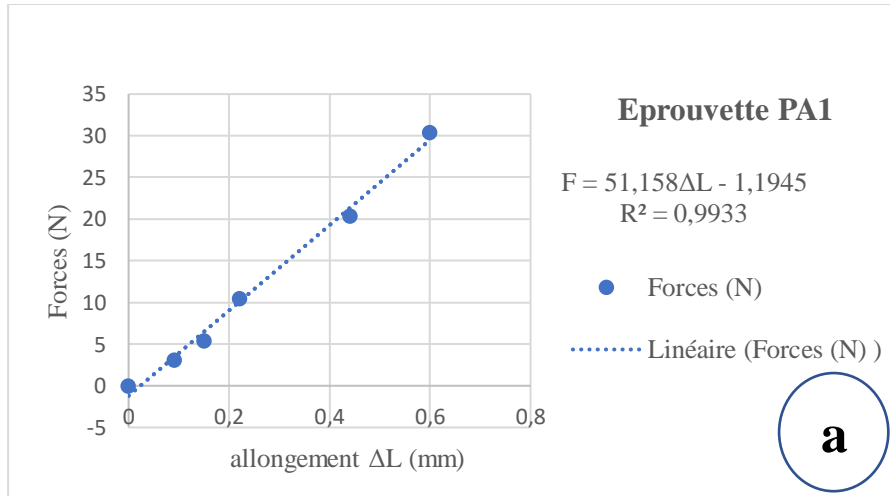
Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau particule renforcé à 85% de particules de parche a été testé en flexion trois points dans l'objectif de déterminer le module d'élasticité en flexion, la résistance à la rupture en flexion et l'effort maximal. Le tableau rassemble l'ensemble des résultats de ces essais de flexion trois points sur les panneaux renforcés à 85% de particules de parche.

Tableau III-3: Relevés des essais des éprouvettes de la composition PA

Éprouvettes	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5
Déplacement ΔL (mm)	$\Delta L1$	$\Delta L2$	$\Delta L3$	$\Delta L4$	$\Delta L5$
Forces (en N)					
0	0	0	0	0	0
3,01	0,09	0,07	0,07	0,04	0,06
5,39	0,15	0,1	0,09	0,12	0,09
10,39	0,22	0,23	0,26	0,26	0,22
20,39	0,44	0,46	0,44	0,4	0,45
30,39	0,6	0,69	0,68	0,72	1,3
40,39	1,3	1,2	1,4	1,6	2,5
50,39	2,1	3,7	2,28	2,3	3,5
54,86	2,7		3,3	3,1	
74,86	5,7				

Pour cette composition, le chargement minimal est de 50,39N pour un allongement moyen de 3,7 et 3,5mm respectivement pour les éprouvettes PA2 et PA5. Seul l'éprouvette PA1 supporte un chargement élevé d'une valeur de 74,86N avant de se rompre à un allongement de 5,7mm.

ELABORATION ET CARACTERISATION MECANIQUE ET PHYSIQUE D'UN MATERIAU
COMPOSITE A BASE DE L'ENDOCARPE (PARCHE) DE CAFE



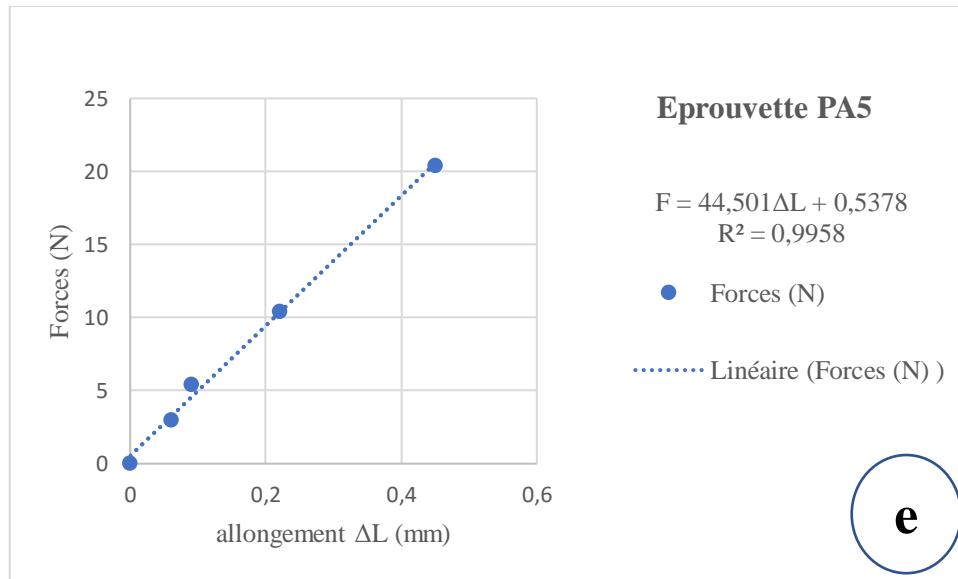


Figure III-4: Droites de régression des courbes force-déplacement de la composition PA ; a) composition PA1 ; b) composition PA2 ; c) Composition PA3 ; d) Composition PA4 et e) Composition PA5

La pente la plus faible de cette composition est celle de l'éprouvette PA4 avec 42.672 et la plus importante est celle PA1 avec 51.158, car seule l'éprouvette PA1 supporte un chargement élevé d'une valeur de 74.86N avant de se rompre à un déplacement de 5.7mm.

Tableau III-4: Résultats d'essai de flexion trois points sur le panneau renforcé à 85%

	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	Moyenne
Pente	51,158	43,696	44,466	42,672	44,501	/
MOE (MPa)	327,4112	279,6544	284,5824	273,1008	284,8064	289,91104
MOR (MPa)	2,2458	1,5117	1,6458	1,6458	1,5117	1,71216

On enregistre pour cette composition un module élastique (MOE) moyen de 289,91104MPa et un module de rupture (MOR) moyen de l'ordre de 1.71216MPa

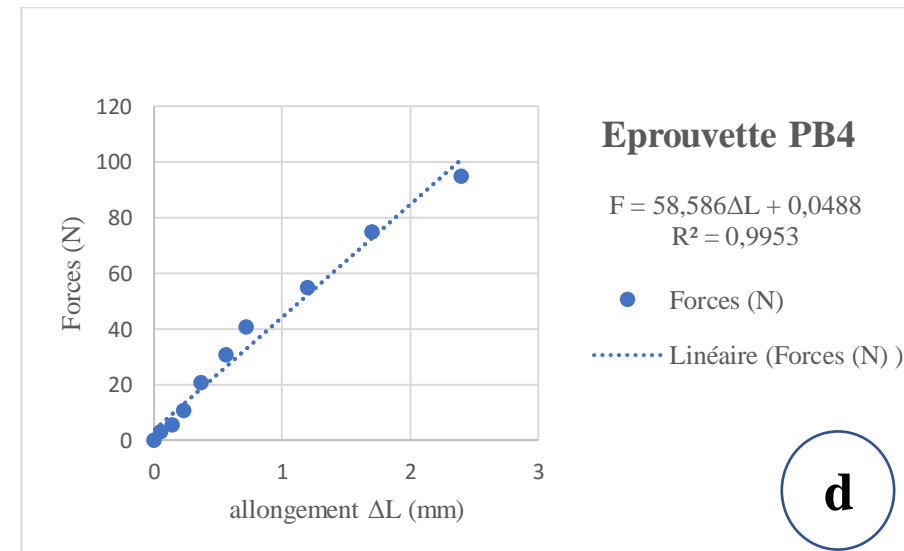
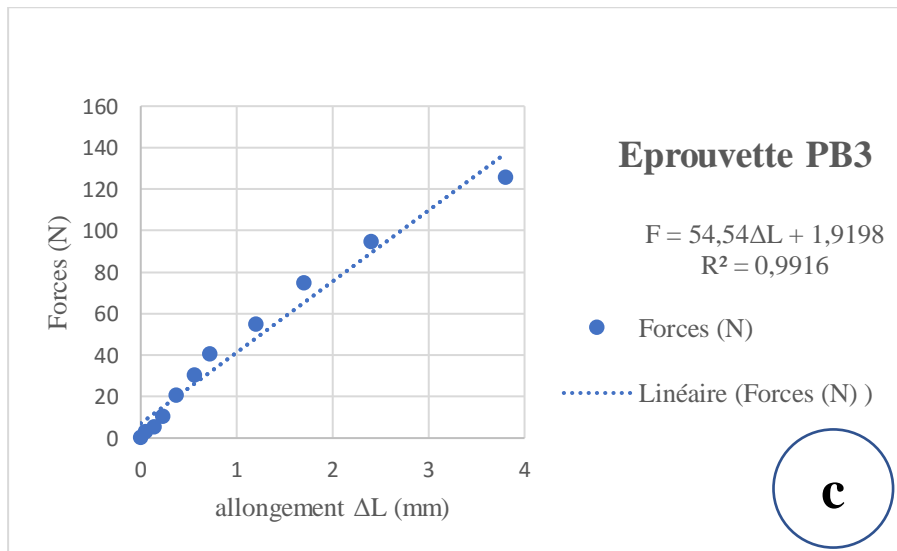
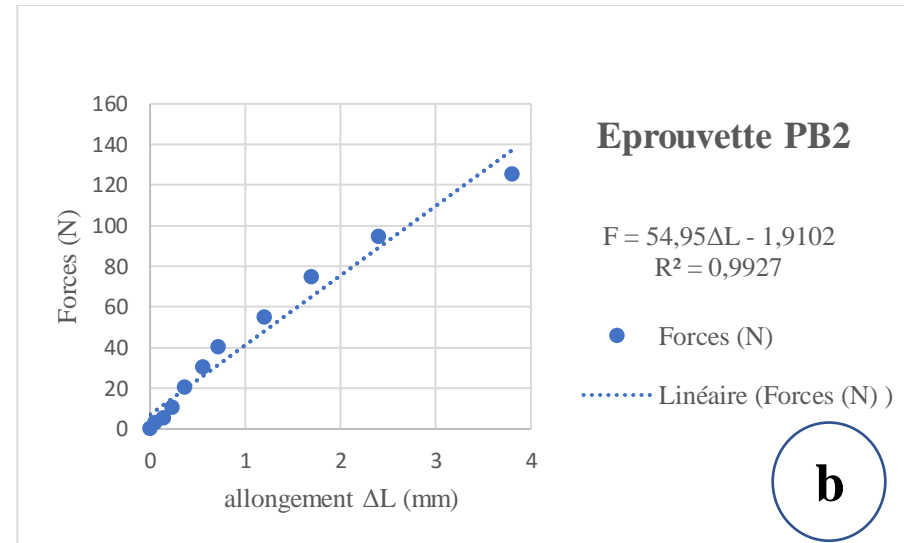
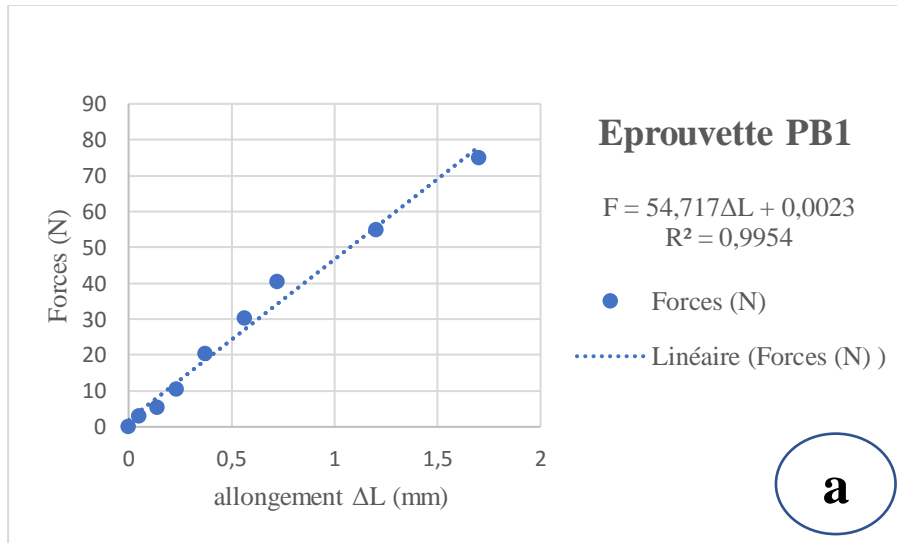
III.3.1.2. Caractérisation de la composition PB (80% parche/ 20% époxyde)

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau particule renforcé à 80% de particules de parche a été testé en flexion trois points. Le tableau (14) rassemble les résultats obtenus au terme de ces essais sur les éprouvettes de panneau renforcé à 80%.

Tableau III-5: Relevés des essais des éprouvettes de la composition PB

Éprouvettes	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5
Déplacement ΔL (mm)	$\Delta L1$	$\Delta L2$	$\Delta L3$	$\Delta L4$	$\Delta L5$
Forces (en N)					
0	0	0	0	0	0
3.01	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
5.39	0,1	0,1	0,16	0,18	0,14
10.39	0,22	0,23	0,22	0,23	0,23
20.39	0,4	0,37	0,39	0,37	0,37
30.39	0,5	0,53	0,55	0,56	0,56
40.39	0,69	0,85	0,7	0,72	0,72
54.86	1	1.05	1.02	1.01	1,2
74.86	1,4	1,3	1,35	1,42	1,7
94.86	2,2	1,55	1,9	1,88	2,4
125.44	5,6	2,17	2,65	3,1	3,8
149.85	5.9	2,98	3,9	4,01	5,4
160.54	6	4,4	5,2	4,7	
170.03				5,2	
173.19				6,5	

La composition PB supporte un chargement minimal de 149.85N, l'allongement moyen est de 4.43mm. L'éprouvette PB4 a rompu sous une charge de 173.19N à une flèche de 6.5mm.



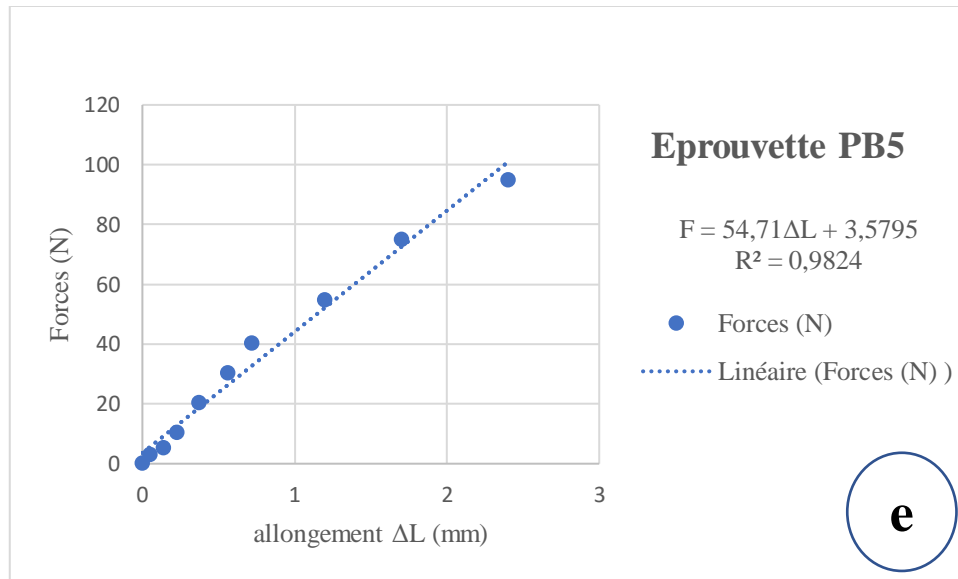


Figure III-5: Droites de régression des courbes force-déplacement de la composition PB ; a) composition PB1 ; b) composition PB2 ; c) Composition PB3 ; d) Composition PB4 et e) Composition PB5

Nous constatons que la pente la plus faible est celle l'éprouvette PB3 avec 54.54 alors que la plus importante est celle de l'éprouvettes PB4 car Seule cette éprouvette a atteint le chargement de 173.19N pour un allongement de 6.5mm.

Tableau III-6: Résultats d'essai de flexion trois points sur le panneau renforcé à 80%

	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	Moyenne
Pente	54,717	58,586	54,54	54,9	54,71	
MOE (MPa)	350,1888	374,9504	349,056	351,36	350,144	355,13984
MOR (MPa)	4,8162	4,8162	4,8162	5,1957	4,4955	4,82796

On enregistre pour cette composition un module élastique (MOE) moyen de 355,13984MPa et un module de rupture (MOR) moyen de l'ordre de 4,82796MPa.

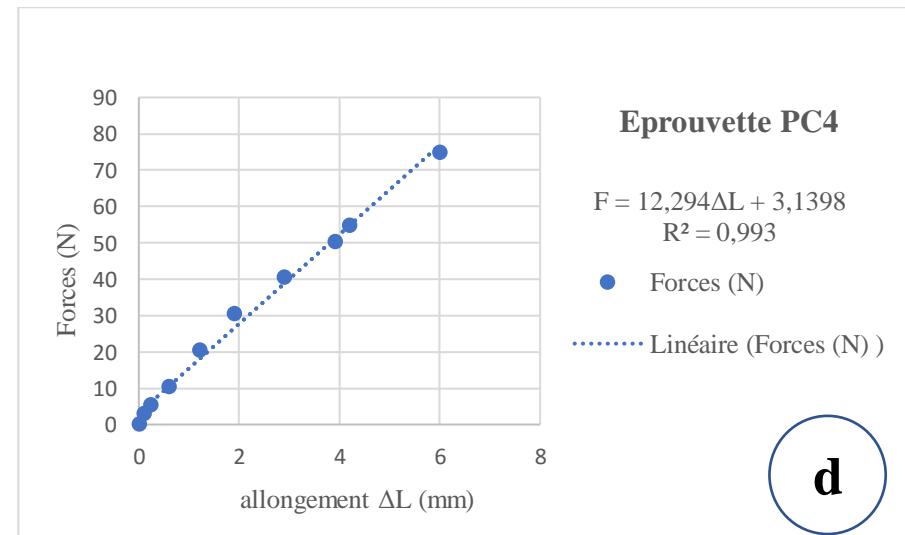
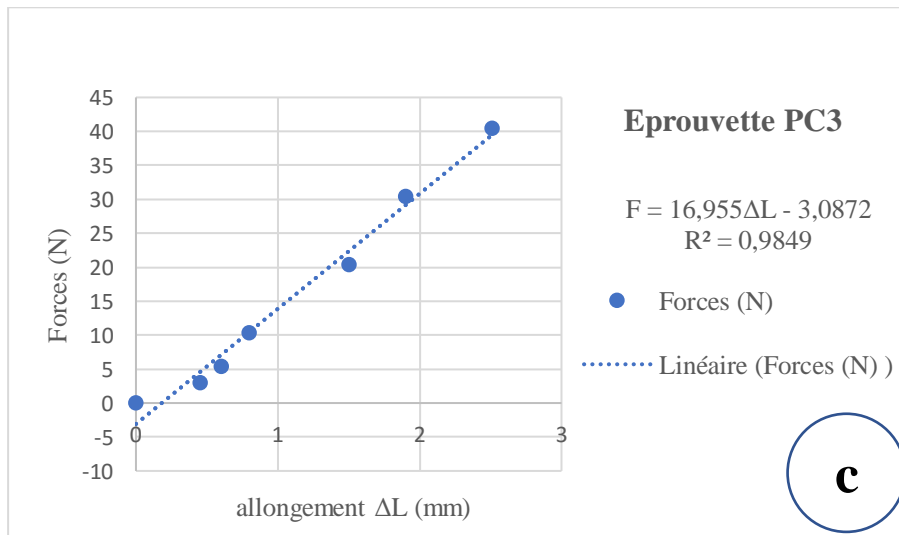
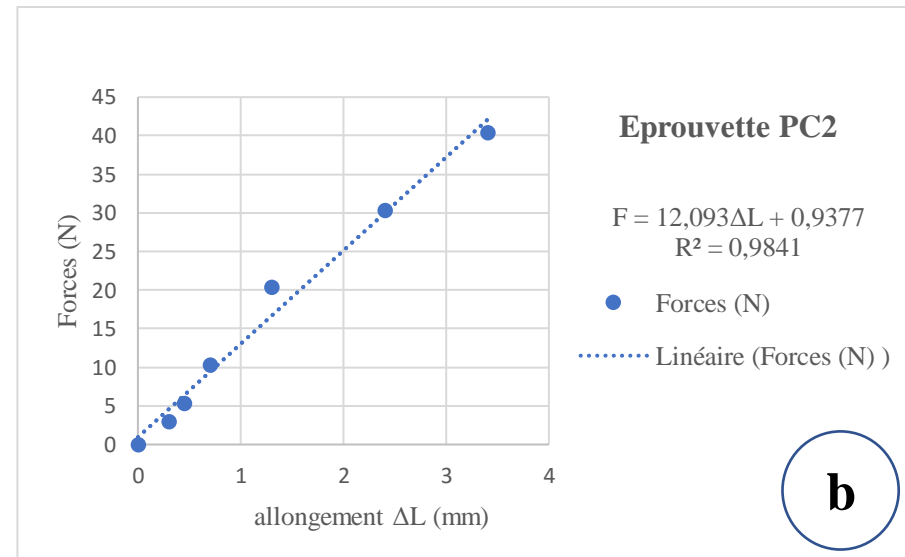
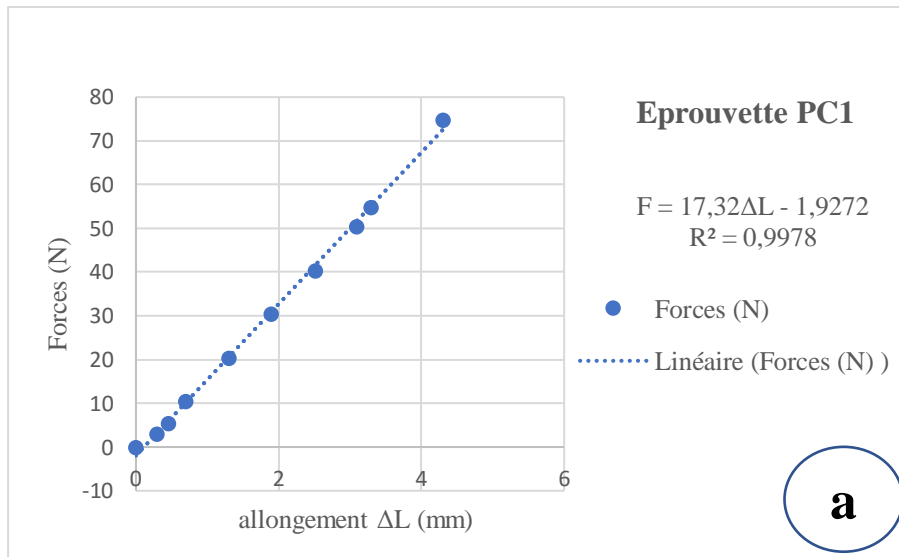
III.3.1.3. Caractérisation de la composition PC (75% parche/25% époxyde)

Un échantillon de cinq éprouvettes de panneau particule renforcé à 75% de particules de parche a été testé en flexion trois points. Le tableau (16) rassemble les résultats obtenus au terme de ces essais sur les éprouvettes de panneau renforcé à 75%.

Tableau III-7: Relevés des essais des éprouvettes de la composition PC

Éprouvettes	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Déplacement ΔL(mm)	$\Delta L1$	$\Delta L2$	$\Delta L3$	$\Delta L4$	$\Delta L5$
Forces (en N)					
0	0	0	0	0	0
3.01	0,3	0,3	0,45	0,1	0,3
5.39	0,45	0,45	0,6	0,24	0,42
10.39	0,7	0,7	0,8	0,6	0,7
20.39	1,3	1,3	1,5	1,2	1,3
30.39	1,9	2,4	1,9	1,9	1,9
40.39	2,51	3,4	2,51	2,9	2,5
50.39	3,1	4,89	8	3,9	3,2
54.86	3,3	6,7		4,2	3,9
74.86	4,3	11		6	5,8
94.86	6,4				10,2

Pour cette composition, le chargement minimal est de 50,39N pour un allongement moyen de 8mm pour l'éprouvettes PC3. Seul les éprouvettes PC1 et PC5 supporte un chargement élevé d'une valeur de 94,86N avant des allongements respectifs de 6,4mm et 10,2mm.



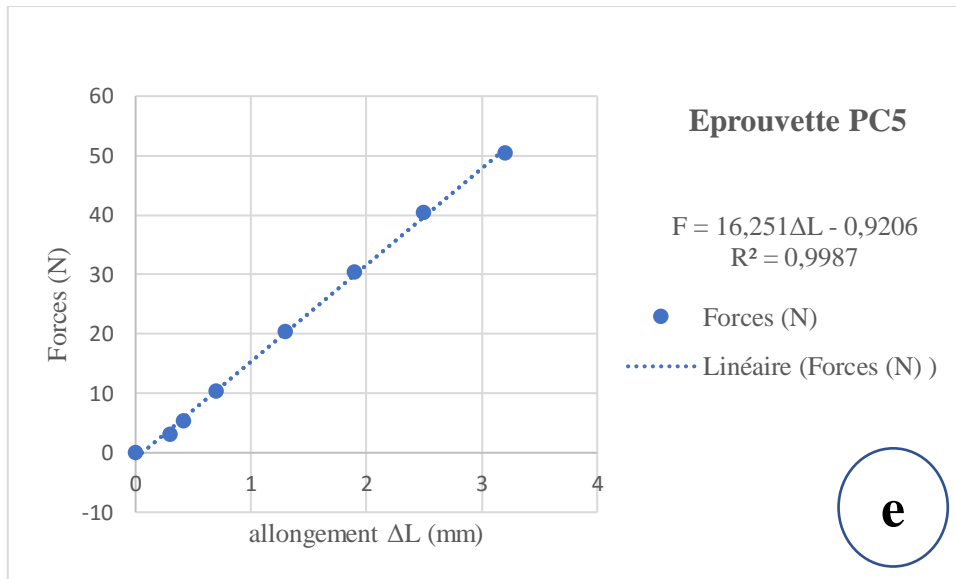


Figure III-6: Droites de régression des courbes force-déplacement de la composition PC ; a) composition PC1 ; b) composition PC2 ; c) Composition PC3 ; d) Composition PC4 et e) Composition PC5

Nous remarquons que la pente la plus faible est celle de l'éprouvette PC2 avec 12.093 tandis que les plus importantes sont celles des éprouvettes PC1 et PC5 (17,32 et 16.251 respectivement) avec un chargement de 94.86N pour un allongement moyen de 8.3mm.

Tableau III-8: Résultats d'essai de flexion trois points sur le panneau renforcé à 75%

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	Moyenne
Pente	17,32	12,093	16,955	12,294	16,251	/
MOE (MPa)	110,848	77,3952	108,512	78,6816	104,0064	95,88864
MOR (MPa)	2,8458	2,2458	1,5117	2,2458	2,8458	2,33898

On enregistre pour cette composition un module élastique (MOE) moyen de 95,88864MPa et un module de rupture (MOR) moyen de l'ordre de 2,33898MPa.

III.4. CONCLUSION

De par nos essais, nous avons mis en évidence la possibilité d'utilisation des particules issues de l'endocarpe de café dans la fabrication des panneaux et testé leurs propriétés physiques et mécaniques. Le matériau composite obtenu présente un taux d'absorption variant entre 14,46 et 25% ce qui signifie que notre matériau présente une imperméabilité élevée c'est à-dire qu'elle ne se laisse pas facilement traverser par l'eau. En outre, les résultats de la flexion

ont donné une valeur du module d'élasticité longitudinal le plus élevé 374,9504MPa, ce qui situe notre matériau entre le cuir et le bois (annexe 3). Ces caractéristiques sont satisfaisantes pour une utilisation comme panneaux de particules de faible densité, à applications générales en milieu sec (type P1).

Les résultats probants de nos investigations laissent entrevoir une réelle possibilité d'exploitation de cette matière résiduelle issues de la transformation du café. Une étude économique et de faisabilité est nécessaire afin de passer à une exploitation industrielle ce qui sera d'un apport appréciable pour une économie régionale. Il est aussi important dans les travaux à venir d'optimiser le ratio endocarpe/époxyde, qui fera ressortir les meilleures caractéristiques.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce mémoire *intitulé élaboration et caractérisation physique et mécanique d'un matériau composite à base de l'endocarpe (parche) de café* présenté vise la mise au point de panneaux de particules à partir des déchets issus de la transformation du café dont l'endocarpe. Cette espèce est très abondante dans les régions du Littoral, Ouest, Sud-Ouest, Est, Nord-Ouest, Sud et Centre. Sa présence en grande quantité au Cameroun pourrait avantageusement être mise au profit dans la réalisation des panneaux. Au-delà de la fabrication de produits de substitution avec l'endocarpe de café, il s'agit de favoriser le développement d'une activité économique aussi bien industrielle qu'artisanale. Les propriétés physico-chimiques et mécaniques montrent qu'il peut servir de source en matière première pour l'élaboration des panneaux de particules. La suite des essais effectués devait déterminer la performance et l'évaluation du potentiel de l'endocarpe de café pour la fabrication des panneaux de particules. Cette étape a permis de tester trois types de panneaux de particules. Le premier contient des particules d'endocarpe à 85% ; Le deuxième est élaboré à partir de 80% de particules d'endocarpe et puis le troisième ayant un renforcement de 70% de particules d'endocarpe, nous avons observé un meilleur comportement des panneaux à base du mélange lors des essais mécaniques réalisés. Les caractéristiques des panneaux obtenus avec les particules d'endocarpe de café (Masse volumique = 795.57 Kg/m^3 ; Taux d'absorption = 20.37% ; MOE = 374,9504MPa ; MOR = 4,82796MPa) sont satisfaisantes pour une utilisation 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 (cèdre, chênes etc.) et de la biodiversité en leur substituant un biomatériau dont la matière première est abondante et sans valeur commerciale.

L'étude menée sur l'endocarpe de café a montré qu'en valorisant ce sous-produit de la transformation du café, nous avons réglé deux 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 générerait donc d'autres polluants qui sont des gaz à effets de serre, nous permet de préserver la couche d'ozone

Il est intéressant de donner une suite à ce travail sous forme de projet de recherche. Cette suite doit axer sur des recherches en mettant en œuvre des colles naturelles à base de lignine ou d'hybrides (lignine + ajout). 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.

Références Bibliographiques

- [1] **Christophe Montagne**, « Cafés : terroirs et qualités », Edition scientifique,
- [2] **Stewart Lee Allen**, « The devil's cup: Coffee, the driving force in history, » Canongate Books, 2001
- [3] **Laure Waridel**, « Acheter, c'est voter : cas du café », Editions Ecosociété, 2005
- [4] **Yamoussoukro**, « PROFIL CAFÉ CAMEROUN », 25-29 Septembre 2017
- [5] **Djemaoun Nawel**, « Contrôle de la qualité physico-chimique et analyse sensorielle d'un mélange de café (Robusta et Arabica) », mémoire de master en nutrition et alimentation, Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen, 2017
- [6] **Cellule Technique de Suivi et de Coordination des filières Cacao et Café**, « plan de relance et de développement des filières cacao et café du Cameroun -horizon 2020- », Aout 2014
- [7] **C. Xing**. « Characterization of urea-formaldehyde resin efficiency affected by four factors in the manufacture of medium density fiberboard ». Thèse de doctorat, Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval, Québec, Canada, 2003.
- [8] **L. A. Donaldson, T. D Lomax**. « Adhesive/fiber interaction in medium density fiberboard. » Wood Sci. Tech., 23, 371-379, 1989.
- [9] **S. EVE**, « Comportement à la prise et caractérisation mécanique de matériaux, » PhD thèses, Université de Caen, 2003.
- [10] **R. Kamila**, « Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles, » Mémoire de Magister, Faculté des sciences de, 2014.
- [11] **M. Laarej**. « Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM. ». Thèse de PHD. Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [12] **S. Steven, V. A Guy, V. M. Bruno**, « Reaction Kinetics Modeling and Thermal Properties of Epoxy-Amines as Measured by Modulated-Temperature DSC. I. Linear Step-Growth Polymerization of DGEBA + Aniline, Journal of Applied Polymer Science », vol. 91, 2004, 2798-2813.
- [13] **L. Gornet**. « Généralité sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes, 2011.
- [14] **A.Y. Nenonene**. « Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage. » Thèse doctorat, Université de Toulouse, 2009.

- [15] **A. Alawar, A. M. Hamed, K. Al-Kaabi.** « Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. » *Compos Part B* ; 40, 2009, 601–606.
- [16] **H. Thi, T. Nga.** « Etude de L'influence de La Température et de L'humidité sur les Propriétés Mécaniques en Traction des Fibres de Chanvre et de Coco, ». PhD Thesis, Ecole De Technologie Supérieure, Université Du Québec, 2008.
- [17] **B. English, N. Starl, C. Clemons.** « Weight Reduction: Wood versus Mineral Fillers in Polypropylene. Proceeding of The Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites », 12-14, 1997, The Madison Concourse Hotel. P. 237-244.
- [18] **Chow P, Bagby M.O, Youngquist J.A.** 1992. « Furniture panels made from kenaf stalks, wood waste, and selected crop fiber residues. In: Proceedings of the 4th annual International Kenaf Association conference »; 1992 February 5-7; Biloxi, MS. p. 28. in Youngquist
- [19] **Youngquist J. A., Krzysik A.M., English B. W., Spelter H. N., Chow P.** 1996. « Agricultural Fibers for Use in Building Components. In: The use of recycled wood and paper in building applications: Proceedings of a 1996 symposium Proc. » 7286. Madison, WI : Forest Products Society., pp : 123-134.
- [20] **H. H. Molinaro.** « Matériaux composites et structures composites. » ENS Paris-Saclay, 2015.
- [21] **G. Tripathi, D. Srivastava.** « Effect of Carboxyl-Terminated Poly (Butadiene-co-Acrylonitrile) (CTBN) Concentration on Thermal and Mechanical Properties of Binary Blends of Diglycidyl Ether of Bisphenol-A (DGEBA) Epoxy Resin. *Materials Science & Engineering* » A, 443, 2007, 262-269.
- [22] **F. Michaud.** « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : aptitude au postformage ». Thèse doctorat, Université de Bordeaux I, Bordeaux, France 2003.
- [23] ANSI A 208 1, 1999. Medium density fibreboard, Published by National Particleboard Association, Gaithersburg, MD, 11P.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des types de panneaux de fibres de bois rigides (Norme NF EN 316)

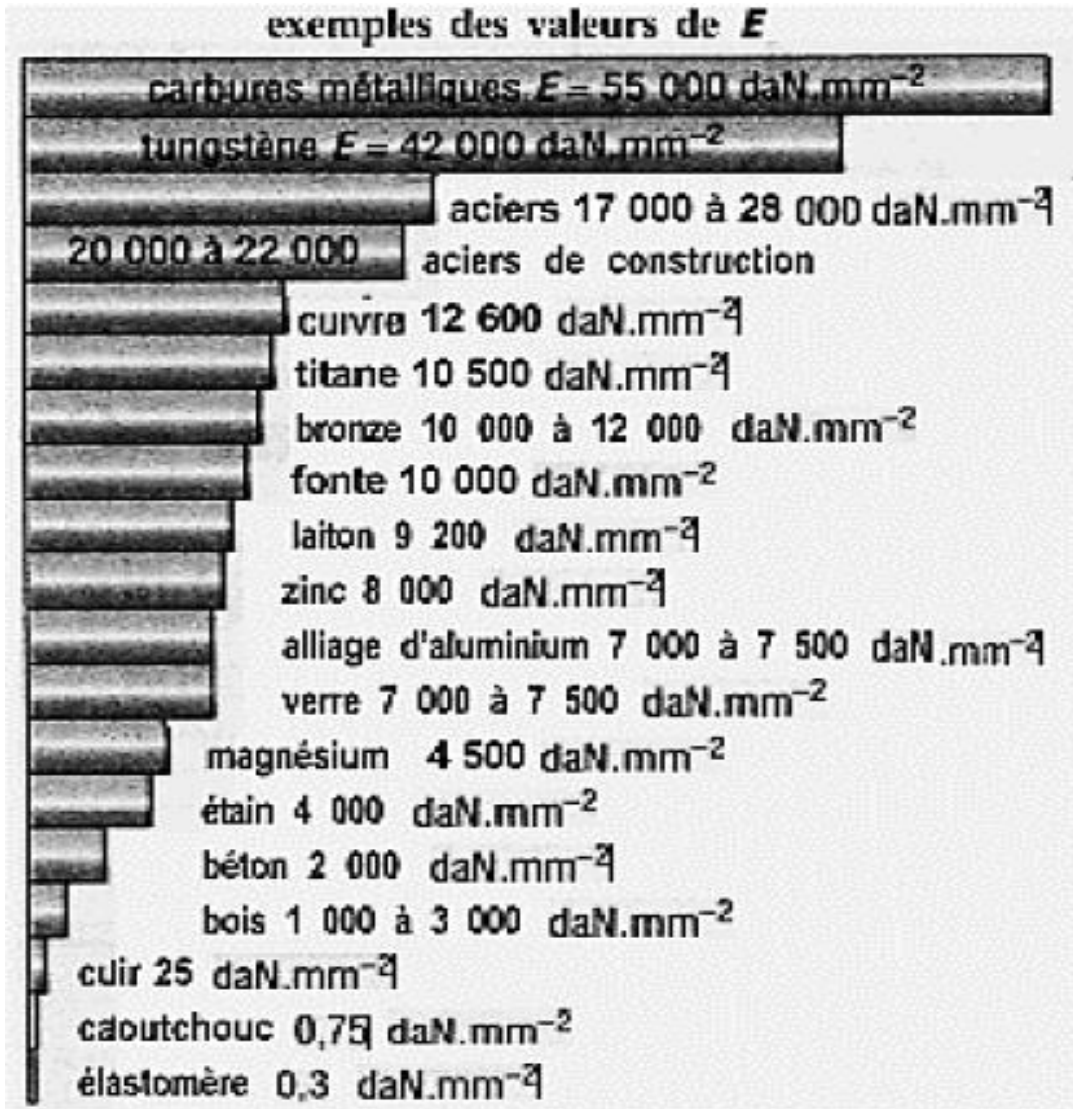
Nom	Caractéristiques	Exemples
SB - Isolants	Procédé humide, 230-400 kg/m ³	- Pare-pluie rigide et isolant thermique et phonique pour toiture et façade ventilée - Isolation thermique de murs par l'extérieur et support d'enduit
MB - Mi-durs	Procédé humide, 400-900 kg/m ³	- Contreventement des constructions à ossatures bois - Pare-pluie, écran rigide de sous-toiture - Complément d'isolation thermique et phonique - Faux plafonds
HB - Durs	Procédé humide, >=900 kg/m ³	- Contreventement des constructions à ossatures bois - Revêtement de sol, de mur ou sous-toiture
MDF - Moyenne Densité	Procédé à sec, >= 600 kg/m ³	- Contreventement des constructions à ossatures bois - Revêtement de sol, de mur ou sous-toiture

Annexe 2 : Liste des types de panneaux de particules (Norme NF EN 312)

Nom	Usage	Exemples	Marque CTB
P1	Usage général utilisés en milieu sec	Bricolage. Agencement.	
P2	Agencements intérieurs (y compris les meubles) utilisés en milieu sec	Agencement. Meubles.	
P3	Usage non travaillant en milieu humide		
P4	Usage travaillant en milieu sec	Agencement. Meubles. Plans de travail. Menuiserie. Plancher. Cloisons.	CTB-S
P5	Usage travaillant en milieu humide	Plancher. Supports de toiture et d'étanchéité. Contreventement. Plan de travail. Cloisons.	CTB-H
P6	Usage travaillant sous contrainte élevée en milieu sec	Utilisations structurelles en milieu sec. Plancher.	
P7	Usage travaillant sous contrainte élevée en milieu humide	Utilisations structurelles en milieu humide. Plancher. Supports de toiture et d'étanchéité. Cloisons.	

Remarque : Les panneaux de particules ne peuvent pas être utilisés en milieu humide confiné ou en exposition directe

Annexe 3 : des modules de YOUNG des matériaux usuels



Annexe 4 : Quelques étapes de l'élaboration du panneau de particule d'endocarpe

