

REPUBLIQUE DU CAMEROUN  
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEURE  
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

Département de Génie Mécanique

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



REPUBLIC OF CAMEROON  
Peace – Work – Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TECHNICAL TEACHER  
TRAINING COLLEGE

Department of Mechanical Engineering

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

**ELABORATION ET CARACTERISATION D'UN MATERIAU  
COMPOSITE A BASE DE FIBRE DE PSEUDO-TRONCS DE  
BANANIER**

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

OPTION : **Fabrication Mécanique**

Par

**NOUBOU SILATCHOM Marcellin**

Licence de Technologie en Génie Mécanique et Productique

Matricule : 19W1230

Sous la Supervision de

**Pr. ATANGANA ATEBA**, Professeur

Devant le Jury constitué de :



<b>Président</b>	: <b>Pr. ATANGANA ATEBA</b>	Professeur, FASA de Dschang
<b>Rapporteurs</b>	: <b>Pr. KANAA Thomas</b>	Maitre de Conférences, ENSET Ebolowa
	: <b>M. CHENGOUE Anatole</b>	Assistant, ENSET Ebolowa
<b>Examineur</b>	: <b>Dr. TOGUEU Bertrand</b>	Assistant, ENSET Ebolowa

Année Académique : **2020/ 2021**



## *DEDICACE*

---

*A mes parents, Papa SILATCHOM TABOKO et Maman  
WOUANGANG Delphine pour leur soutien sur tous les plans*





# REMERCIEMENTS

C'est avec un immense plaisir que je profite de l'occasion qui m'est offerte ici, pour exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur : **M. CHENGOUE MBOUYAP Anatole** et à mon superviseur de mémoire : **Pr. ATANGANA ATEBA** pour leur encadrement, l'interminable motivation et la constante inspiration dont ils ont fait preuve tout au long des travaux qui ont abouti à la forme finale de ce document. Je souhaite adresser à **M. CHENGOUE Anatole** toute ma gratitude pour m'avoir accepté et intégré au sein du Laboratoire de Mécanique de Solide (LMS).

Mes sincères remerciements au **Pr. NDJANKOMO SALOME Essiane** directeur de l'ENSET de l'Université de Yaoundé 1 et au **Pr. KANA'A Thomas**, chef du département du génie mécanique de l'ENSET de l'Université de Yaoundé 1 pour l'aide, les conseils et la formation dont nous avons pu bénéficier auprès d'eux.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de tous les membres du Laboratoire de chimie organique de la faculté des sciences de l'université de Yaoundé 1 ; plus particulièrement à : **M. CHENGOUE Anatole, M. MEWOLI Amel, M. ASSOFAK Herman, M. FANKOU Rodrigue** ; pour leurs critiques, les aides diverses, et leurs contributions lors des séances de présentations scientifiques.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à tout le personnel enseignant et d'appui du département du génie mécanique de L'ENSET de l'université de Yaoundé 1 pour leurs conseils et la relecture de la forme finale de ce document.

A ma famille pour leur compréhension, leur soutien infaillible, leurs encouragements incessants.

A mon Amie **Brinda Gisèle** pour son soutien inconditionnel

A tous mes camarades pour leur aide et les moments agréables passés ensemble.

A tous ceux qui se sont de près ou de loin associés à ce travail.

MERCI.





# RESUME

L'objectif principal des travaux présenté dans ce mémoire est d'une part l'élaboration d'un matériaux composite écologique à base de fibre de pseudo-tronc de bananier, et d'autre part la caractérisation physique et mécanique de ce dernier. Pour cela, les fibres ont été extrait selon la méthode de rouissage à l'eau vue dans l'état de l'art et traité à la soude caustique concentré à 5% dans le but de se débarrasser des impuretés et de la lignine. L'élaboration du composite *fibres de pseudo-troncs + tanin+ exsudat + latex*, s'est fait à partir de quatre formulations dans lesquelles nous avons varié le taux de latex de 0%, 5%, 10% et 15% dans chaque formulation. Puis les caractérisations physiques ont été déterminés notamment la densité apparente  $\rho_{moy} = 826.255 \text{kg/m}^3$ ; le taux d'humidité  $H_{moy} = 3.53\%$ ; le taux d'absorption  $TA_{moy} = 62.39\%$ ; la cinétique d'absorption  $Vi_{moy} = 0.00245 \text{g/s}$ , en suite les caractérisations mécaniques telles que : -la traction avec un module d'Young  $E_t = 1155.47 \text{Mpa}$ , une contrainte de résistance à la traction  $\sigma_{t.moy} = 0.8443 \text{Mpa}$  et la force maximale supporté en traction  $F_{t,max} = 123.25 \text{N}$ ; -la flexion avec un module d'Young moyen  $E_{f.moy} = 176.101 \text{Mpa}$  et une contrainte moyenne de résistance à la flexion  $\sigma_{f.moy} = 1.973 \text{Mpa}$  et la force maximale supporté en flexion  $F_{f,max} = 10.620 \text{N}$ . De ces travaux il ressort que les composites *fibres de pseudo-tronc* à matrice *tanin+ exsudat + latex* sont en accord avec la normale EN 310. Il ressort également que les composites élaborés avec les formulations de 5% et 10% de latex présentent des meilleures caractéristiques.

**Mots clés :** extraction, caractérisation, tanin, latex, fibres pseudo-troncs de bananier, matériaux composite.





# ABSTRACT

The main objective of the work presented in this thesis is on the one hand the development of an ecological composite material based on banana pseudostem fiber, and on the other hand the physical and mechanical characterization of the latter. For this, the fibers were extracted using the state-of-the-art water retting method and treated with 5% concentrated caustic soda in order to get rid of impurities and lignin. The development of the pseudostem fiber + tannin + exudate + latex composite was made from four formulations in which we varied the latex content of 0%, 5%, 10% and 15% in each formulation. Then the physical characterizations were determined in particular the apparent density  $\rho_{\text{moy}} = 826.255 \text{ kg / m}^3$ ; the humidity level  $H_{\text{avg}} = 3.53\%$ ; the absorption rate  $TA_{\text{avg}} = 62.39\%$ ; the kinetics of absorption  $V_{\text{moy}} = 0.00245 \text{ g / s}$ , following the mechanical characterizations such as: -the traction with a Young's modulus  $E_t = 1155.47 \text{ Mpa}$ , a tensile strength stress  $\sigma_{\text{ (t.moy) }} = 0.8443 \text{ Mpa}$  and the maximum force supported in traction  $F_{t.\text{max}} = 123.25 \text{ N}$ ; -the bending with an average Young's modulus  $E_{f.\text{max}} = 176.101 \text{ Mpa}$  and an average stress of bending strength  $\sigma_{\text{ (f.moy) }} = 1.973 \text{ Mpa}$  and the maximum force supported in bending  $F_{t.\text{max}} = 10.620 \text{ N}$ . Of these The work shows that the composites of pseudo-trunk fibers with a tannin + exudate + latex matrix are in accordance with the standard EN 310. It also appears that the composites produced with the formulations of 5% and 10% latex exhibit better characteristics.

**Key words:** extraction, characterization, tannin, latex, banana pseudostem fibers, composite materials.





# LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Classification des fibres végétales.....	5
Figure 1.2 : Différents niveaux d'observation d'une fibre végétale .....	6
Figure 0-3 : Schéma de la structure d'une fibre végétale .....	7
Figure 1-4 : Structure détaillé d'une fibre Végétale .....	7
Figure 1.5: Structure chimique de la cellulose .....	7
Figure 1.6: Liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires .....	7
Figure 1.7: Morphologie d'une micro fibrille cellulosique .....	8
Figure 1.8: Structures chimiques des unités de base de l'hémicellulose .....	8
Figure 1.9: Structure chimique des unités composant la lignine .....	11
Fig. I.10: Variation du diamètre le long de la fibre de lin [19].....	15
Figure 1-11 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [23].....	16
Figure 1-12 : Racleur pour extraction manuel [12].....	17
Figure 0-13 : Ligne automatique d'extraction de fibres végétales [12], [13].....	18
Figure 1.14: Structure typique d'une fibre cellulosique non traitée [15].....	23
Figure 1.15 : Schéma de principe de la benzoilation [13].....	25
Figure 0-16 : Pseudo tronc /Rejets selon Champion (1967) [17].....	28
Figure 1.17: Classification schématique des différents types de composites [24].....	31
Figure 1-18 : Types de matrice.....	32
Figure 1.19: Classification des renforts courants.....	35
Figure 1-20 : Moulage au contact [27].....	40
Figure 1-21 : Méthode de projection simultanée [27].....	41
Figure 1-22 : Méthode de moulage par compression [28].....	41
Figure 1-23 : Méthode du moulage sous vide [28].....	42
Figure 1-24 : Principe du moulage par injection de résine [27].....	42
Figure 2-1 : processus de traitement de fibres de pseudo-troncs de bananier.....	52
Figure 2-2 : schéma du principe de la flexion 3 points.....	69
Figure 2-3 : dispositif d'essais de traction.....	70
Figure 2-4 : principe d'essais de dureté.....	71
Figure3-1 : Fibres de FBP extrait à la soude.....	74
Figure 3-2 : digramme des moyennes des extraits secs.....	76
Figure 3-3 : variation de la densité en fonction des formulations.....	78
Figure 3-4 : Diagramme des moyennes du taux d'humidité.....	79
Figure 3-5 : diagramme des moyennes du taux d'absorption d'eau.....	81
Figure 3-6 : moyenne des cinétiques d'absorption.....	81
Figure 3-7 : moyenne de la cinétique d'absorption.....	83
Figure 3-8 : graphe de comportement en flexion.....	82





ÉLABORATION ET CARACTERISATION D'UN MATERIAU  
COMPOSITE A BASE DE FIBRES DE PSEUDO-TRONCS DE  
BANANIER



---

<i>Figure 3-9 : variation du module d'Young en fonction des formulations</i> .....	84
<i>Figure 3-10 : variation de la contrainte en flexion</i> .....	84
<i>Figure 3-11 : comportements à la traction</i> .....	85
<i>Figure 3-12 : variation du module d'Young en traction dans différentes formulations</i> .....	86
<i>Figure 3-13 : variation de la contrainte en traction</i> .....	86





# LISTE DES PHOTOS

<i>Photo 2-1 : Objets réalisés à partir des fibres de bananier</i>	31
<i>Photo 2-1 : Echantillon primaire du pseudo-tronc de bananier</i>	46
<i>Photo 2-2 : Echantillon secondaire du pseudo tronc de bananier</i>	46
<i>Photo 2-3 : Décorticage du pseudo-troncs de bananier</i>	46
<i>Photo 2-4 : Section droite du pseudo-tronc de bananier</i>	47
<i>Photo 2-5 : Section centrale du pseudo-tronc de bananier</i>	47
<i>Photo 2-6 : a) pseudo-troncs ;</i>	48
<i>Photo 2.7 : matériels utilisé pour l'extraction des fibres de pseudo-tronc de bananier</i>	48
<i>Photo 2.8 : découpage des fibres en petites dimensions</i>	55
<i>Photo 2.9 : broyeur de fibres du laboratoire de chimie organique de l'université de Yaoundé 1</i>	55
<i>Photo 2-10 : Matériel utilisé pour formulation de la résine</i>	56
<i>Photo 2-11 : formulation de résine</i>	57
<i>Photos 2.11 : étuve du laboratoire de chimie organique de l'université de Yaoundé 1</i>	57
<i>Photo 2.12 : mélange</i>	59
<i>Photo 2-13 : séchage</i>	60
<i>Photo 2-14 : parties du moule</i>	60
<i>Photo 2-15 : installation du papier aluminium</i>	61
<i>Photo 2-16 : fibres versé dans le moule</i>	61
<i>Photo 2-17 : recouvrement avec le papier aluminium</i>	61
<i>Photo 2.18 : ensemble en cours de pressage</i>	62
<i>Photos 2-19 : découpages des panneaux</i>	62
<i>Photo 2-20 : matériel utilisé ; pied à coulisse numérique du laboratoire génie mécanique de ENSPY</i>	63
<i>Photo 2.21 : prises des différentes mesures</i>	64
<i>Photo 2-22 : Etuve du laboratoire chimie organique de de Université de Yaoundé 1</i>	64
<i>Photo 2-23 : Dessiccateur du laboratoire chimie de l'université de yaoundé1</i>	66
<i>Photo 2-24 : déroulement de la manipulation au laboratoire chimie de Yaoundé 1</i>	66
<i>Photo 2-25 : manipulation ; a) rinçage des bols, b) mise en solution</i>	68
<i>Photo 3-1 : Fibres extraite du pseudo-tronc de bananier par la méthode de rouissage biologique</i>	73
<i>Photo 3-2 : fibres traitées</i>	75
<i>Photo 3-3 : Matériau composite obtenu après démoulage</i>	75
<i>Photo 3-4 : éprouvettes prêtes pour différents essais</i>	77







# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Exemples de composition chimique de fibres végétales .....	12
Tableau 1.2: Propriétés physiques de différentes fibres végétales .....	13
Tableau 1.3: Propriétés mécaniques de différentes fibres végétales .....	14
Tableau 1.4: Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales .....	15
Tableau 1-5 : Récapitulatif des rendements des méthodes .....	22
Tableau 1.6: Exemples de traitement de fibres végétales et de leur application envisagée .....	25
Tableau 1.7 : Principaux avantages et inconvénients des fibres naturelles .....	26
Tableau 1-8 : Superficie de la récolte, la production des fruits majeurs en Inde (1999 – 2000).....	29
Tableau 1-9 : Productions et superficies cultivées du bananier au CAMEROUN .....	34
Tableau 1.10 : caractéristiques de quelques résines thermodurcissables .....	38
Tableau 1.11 : Caractéristiques de quelques Résine thermoplastiques .....	50
Tableau 1-12 : caractéristiques de quelques composites de fibres végétales .....	54
Tableau 3-1 : Récapitulatif d'extraction .....	73
Tableau 3-2 : Récapitulatif du traitement .....	74
Tableau 3-3 : relevé des données de l'extrait sec .....	75
Tableau 3-4 : relevé des données de la densité apparente .....	77
Tableau 3-5 : Données de l'analyse du taux d'humidité .....	79
Tableau 3-6 : analyse du taux d'absorption .....	80
Tableau 3-7 : donné des résultats de calculs de la cinétique d'absorption .....	82
Tableau 3-8 : caractéristiques mécaniques de flexion .....	83
Tableau 3-9 : caractéristiques mécaniques de traction .....	85



## *LISTE DES SYMBOLES*

Symboles	Significations	Unités
$\epsilon$	Déformation	%
C	Concentration	g/l
v	volume	m <sup>3</sup>
E	Module de Young	GPa
F	Effort	N
k	Coefficient	
L <sub>0</sub>	Longueur initiale	mm
m <sub>0</sub>	Masse à l'instant initiale	g
m <sub>t</sub> = m(t)	Masse à l'instant t	g
r	Rayon	mm
H	Taux d'humidité	%
S	Section	mm <sup>2</sup>
TA	Taux d'absorption	%
$\Delta L$	Allongement	mm
R <sub>m</sub>	Résistance mécanique	MPa
R <sub>e</sub>	Résistance élastique	MPa
$\sigma$	Contrainte normale	MPa
$\rho$	Densité volumique	Kg/m <sup>3</sup>
V <sub>i</sub>	Vitesse	g/s

## *LISTE DES ABREVIATIONS*

Abréviations	Significations
Max.	Maximum
Min.	Minimum
TE	Température Extérieur
TI	Température Intérieur
FORM	Formulation
PT	Pseudo-tronc
moy	moyenne
TA	Taux d'absorption





# TABE DES MATIERES

<i>DEDICACE</i> .....	i
<i>REMERCIEMENTS</i> .....	ii
<i>RESUME</i> .....	iii
<i>ABSTRACT</i> .....	iv
<i>LISTE DES FIGURES</i> .....	v
<i>LISTE DES PHOTOS</i> .....	vii
<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	viii
<i>LISTE DES SYMBOLES</i> .....	ix
<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i> .....	ix
<i>TABE DES MATIERES</i> .....	x
<i>INTRODUCTION GENERALE</i> .....	1
A. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	2
1. <i>REVUE DE LA LITTERATURE</i> .....	4
<i>Description</i> .....	4
<i>Aperçu</i> .....	4
1.1. GENERALITE SUR LES FIBRE VEGETALE.....	5
1.1.1. Classification des fibres végétales.....	5
1.1.2. Structure d'une fibre végétale.....	6
1.1.3. Composition chimique des fibres végétale.....	8
1.1.4. Propriétés physico-mécaniques des fibres.....	12
1.1.5. Morphologie de la fibre végétale.....	14
1.1.6. Méthodes d'extraction des fibres.....	16
1.1.6. Etude comparative des différentes méthodes d'extraction.....	21
1.1.7. Traitement des fibres végétales.....	22
1.1.8. Avantages et limites d'utilisation des fibres végétales.....	25
1.1.9. Présentation du bananier.....	27
1.2. GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES.....	31
1.2.1. Types de matériaux composites.....	32
1.2.2. Matrices des matériaux composites.....	32
1.2.3. Architecture des renforts des matériaux composites.....	33





1.2.4.	Caractéristiques mécanique de quelque composites de fibres vegetales .....	39
1.2.5.	Mise en forme des matériaux composites renforce par les fibres végétales .....	39
1.3.	Conclusion .....	43
<b>2.</b>	<b>METHODES ET MATERIELS</b> .....	<b>44</b>
	<i>Description</i> .....	44
	<i>Aperçu</i> .....	44
2.1.	METHODES EXPERIMENTALES DE SELECTION D'ECHANTILLON .....	45
2.1.1.	Site de collecte .....	45
2.1.2.	Phase préparatoire .....	45
2.2.	EXTRACTION DES FIBRES DU PSEUDO-TRONC DE BANANIER .....	47
2.2.1	Matériels utilisés .....	47
2.2.2.	Procédé d'extraction des fibres de pseudo-troncs de bananier .....	49
2.3.	TRAITEMENT DES FIBRES DU PSEUDO-TRONCS .....	52
2.3.1	Prétraitement des fibres à partie de la soude acoustique .....	52
2.3.1.	Traitement à 5% NaOH.....	52
	Détermination de la masse de soude en fonction du volume d'eau .....	53
2.4.	ELABORATION DE LA RESINE .....	56
2.4.1.	Formulations de la résine .....	56
2.4.2.	Détermination de l'extrait sec de la résine .....	57
2.5.	ELABORATION DU COMPOSITE .....	58
2.5.1.	Détermination des quantités à mélanger .....	58
2.5.2.	Mélange résine + particule .....	59
2.5.3.	Mise en forme par thermo compression .....	60
2.5.4.	Découpage des panneaux .....	62
2.6.	CARACTERISATION DU MATERIAU COMPOSITE.....	62
2.6.1.	Caractérisation physique .....	62
2.6.2.	Caractérisations mécaniques .....	67
2.7.	CONCLUSION .....	70
<b>3.</b>	<b>RESULTATS ET INTERPRETATIONS</b> .....	<b>71</b>
	<i>Description</i> .....	71
3.2.	Traitement des fibres du pseudo-troncs .....	71
3.3.	Analyse de l'extrait sec de la résine .....	71
3.4.	Résultats de la thermo compression.....	71
3.5.	Caractérisation du matériau composite.....	71
3.1.	RENDEMENTS DU PROCEDE D'EXTRACTION .....	72





3.2.	TRAITEMENT DES FIBRES DU PSEUDO-TRONCS .....	72
3.2.1	Prétraitements des fibres .....	72
3.3.2	Traitements des fibres .....	73
3.3.	RESULTATS DE L'ANALYSE DE L'EXTRAIT SEC DE LA RESINE .....	74
3.4.	RESULTATS DE LA THERMO COMPRESSION .....	75
3.5.	PREPARATION DE L'EPROUVETTES.....	76
3.6.	CARACTERISATION DU MATERIAU COMPOSITE.....	76
3.6.1.	Caractérisation physique .....	76
3.6.2.	Caractérisation mécaniques.....	84
3.7.	JUSTIFICATION DU DOMAINE D'APPLICATION.....	88
	<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	89
	<b>ANNEXES</b> .....	97
	Annexes 1: .....	97
	Histogrammes d'extrait-sec des formulations de résine .....	97
	Annexes 2 : .....	98
	Tableau des donnes de l'analyse de la densité .....	98
	Annexes 3 : .....	99
	Variation du taux d'humidité dans chaque formulation .....	99
	Annexe 4 : .....	100
	Annexes 5 : .....	101
	Annexes 7 .....	101
	Annexes 8 .....	103





# *INTRODUCTION GENERALE*





La sensibilisation croissante aux questions environnementales amène aujourd'hui de nombreux scientifiques et chercheurs à prendre conscience que des efforts sont essentiels pour assurer la survie de l'humanité à l'avenir. Afin d'être en accord avec cet objectif, les ingénieurs en matériaux ont mené des études pour remplacer les fibres synthétiques actuelles dans les composites par des fibres naturelles qui sont plus écologiques et respectueuses de l'environnement [1]. Les fibres végétales en tant que structures de renforcement dans les composites offrent divers avantages par rapport aux matériaux synthétiques, comme le verre et le carbone. Au-delà de leur caractère écologique, les fibres naturelles possèdent de bonnes propriétés mécaniques plus ou moins compétitives aux fibres de verre et d'une esthétique unique.

Toutefois, les fibres naturelles sont très répandues dans les nombreuses applications et dans de nombreux secteurs industriels (textiles, automobiles, bâtiments, aéronautiques...). Il est important que ces matériaux de remplacement puissent présenter des capacités similaires à celles de leurs homologues tout en introduisant d'autres caractéristiques "vertes" [2]. Par ailleurs, la concurrence qui sévit sur les marchés des composites comme le plâtre est très forte car ce secteur utilise les fibres de sisal importées et leur coût influence négativement la balance commerciale camerounaise. Pourtant, la biomasse locale est très riche et diversifiée.

Les pseudo-troncs de bananier, après récolte des régimes de bananes, sont abandonnés pour se dégrader dans la nature pourtant elles renferment de nombreuses fibres végétales et peuvent être valorisées comme renforts des matériaux composites. C'est dans ce contexte global de développement de matériaux composites conçus à partir de cette matière végétale, que nous a été confié le thème « **ELABORATION ET CARACTERISATION D'UN MATERIAU COMPOSITE A BASE DES FIBRES DE PSEUDO-TRONCS DE BANANIER** » dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude du second cycle à L'ENSET d'Ebolowa en vue de l'obtention du Diplôme des Professeurs d'Enseignement Technique du second grade DIPET II.

## A. OBJECTIFS DE L'ETUDE

La présente étude a pour objectifs :

- Extraire et traiter les fibres de pseudo-troncs de bananier
- Choisir une résine naturelle : Tanins + Durcisseurs
- Elaborer un matériau composite à base des fibres de pseudo-troncs de bananier ;
- Chercher les caractéristiques physiques du composite des fibres du pseudo-troncs de





bananier ;

- **Chercher** les caractéristiques mécaniques du composite des pseudo-troncs de bananier.

Au regard des différents grands axes énumérés plus haut, dans le but d'atteindre ces objectifs, notre travail sera subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre intitulé Revue de la littérature sera consacré aux généralités sur les matériaux composites et sur les fibres végétales, notamment les fibres des pseudos troncs de bananier, puis à l'état de l'art sur les travaux de recherche effectués sur l'extraction, la caractérisation et le comportement physico-mécanique composites.

L'élaboration, l'échantillonnage et la caractérisation du matériau composite, les matériels et les méthodes utilisés pour le génie des procédés d'extraction et des essais de caractérisation du composite de pseudo-troncs de bananier feront l'objet du deuxième chapitre intitulé Matériels et méthodes.

Le dernier chapitre intitulé Résultats et discussions présentera le résumé des résultats obtenus et abordera leurs interprétations et leurs comparaisons à ceux évoqués dans le chapitre 1.

La conclusion et les perspectives viendront clore le travail.





## Chapitre

# 1

## *CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE*

---

### *Description*

---

Dans ce chapitre il sera question pour nous de présenter les fibres végétales de manière générale, et en particulier la tige du *musa* dont les fibres du pseudotrunc constituent l'objet de notre étude proprement dite et par la suite présenter des matrices et des bio composites déjà élaboré.

### *Aperçu*

---

- 1.1. Généralités sur les fibres végétales
- 1.2. Généralités sur les résines naturelles
- 1.3. Généralités sur les matériaux composites
- 1.4. Conclusion

## 1.1. GÉNÉRALITÉ SUR LES FIBRES VÉGÉTALES

Les fibres végétales, dites encore fibres ligno-cellulosiques, sont des structures rigides microfibrillaires [1] principalement composées de cellulose, d'hémicellulose, de lignine, en proportions relativement réduites d'extractibles, de protéines, de lipides et de matières minérales.

### 1.1.1. Classification des fibres végétales

Selon leurs origines, les fibres végétales peuvent être classifiées comme le montre l'organigramme de la Figure 1.1 ci-dessous :

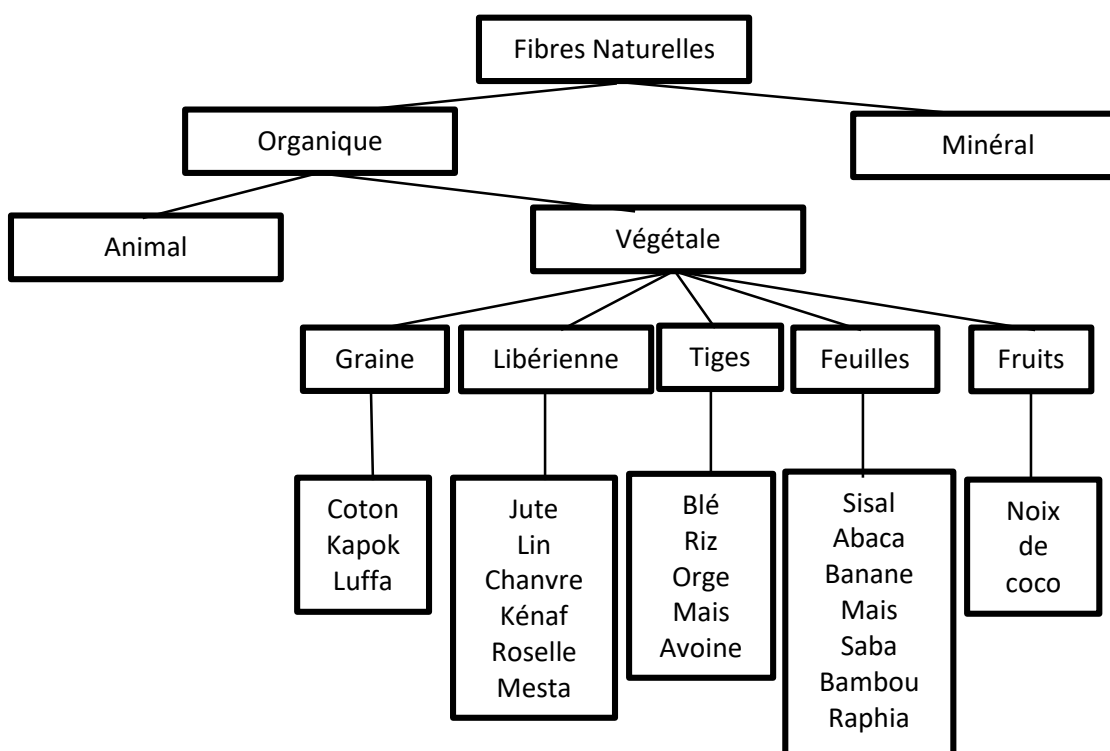


Figure 1-1 : Classification des fibres végétales [2].

Cet organigramme nous montre que les fibres végétales sont classées en fonction de la partie de la plante d'où elles sont extraites. C'est ainsi que nous distinguons :

- Les fibres végétales issues des fruits : noix de coco, noix de palme... ;
- Les fibres végétales issues des tiges : blé, riz, orge, maïs... ;
- Les fibres végétales issues des feuilles : banane, maïs, bambou ; sisal... ;
- Les fibres végétales issues des graines : coton, luffa... ;
- Les fibres végétales libériennes : lin, chanvre, ramie, jute...

Les fibres végétales sont traditionnellement utilisées dans le secteur du textile pour l'habillement, dans l'industrie du papier, dans l'industrie automobile en tant qu'isolant thermique et acoustique, dans l'agriculture pour le paillage des cultures, dans l'emballage pour la sacherie, et dans l'ameublement pour le rembourrage des matelas et des meubles [1].

### 1.1.2. Structure d'une fibre végétale

La fibre végétale peut être assimilée à un matériau composite dont le renfort est assuré par les fibrilles de cellulose enrobées d'une matrice formée d'hémicellulose et de lignine (Figure 1.2). Les fibrilles sont organisées en hélice et forment un angle avec l'axe de la fibre appelé « angle micro fibrillaire » (Figure 1.3)

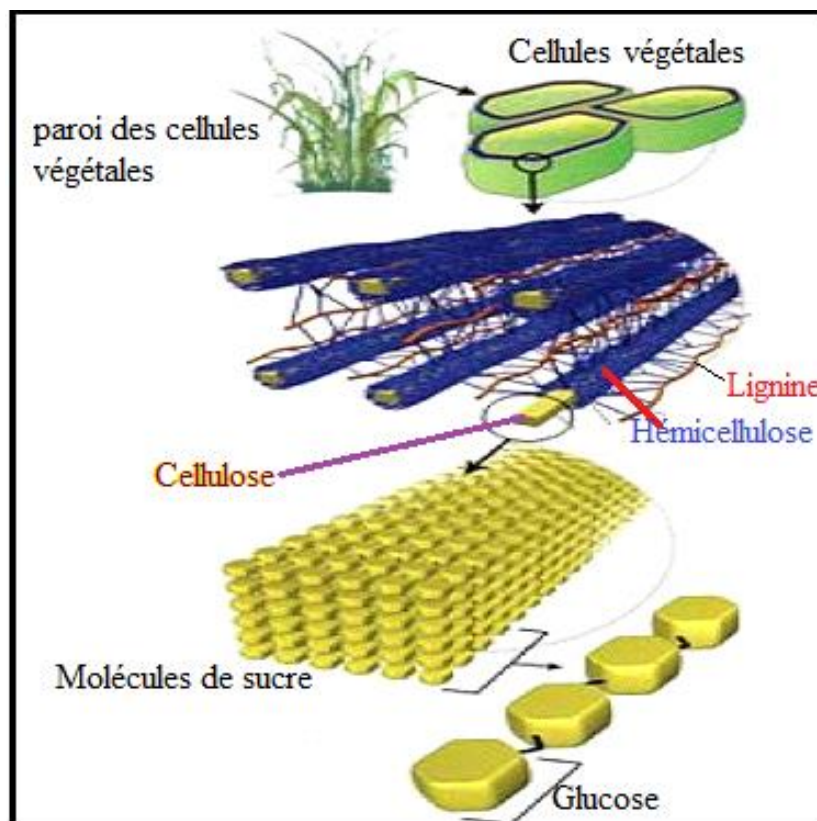


Figure 1.2 : Différents niveaux d'observation d'une fibre végétale[2].

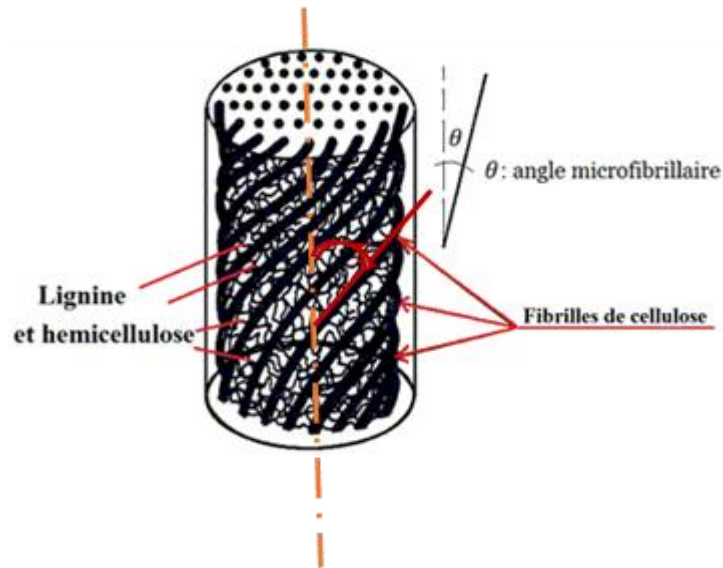


Figure 0-3 : Schéma de la structure d'une fibre végétale[2].

La structure détaillée de la fibre végétale est donnée dans la Figure 1.4.

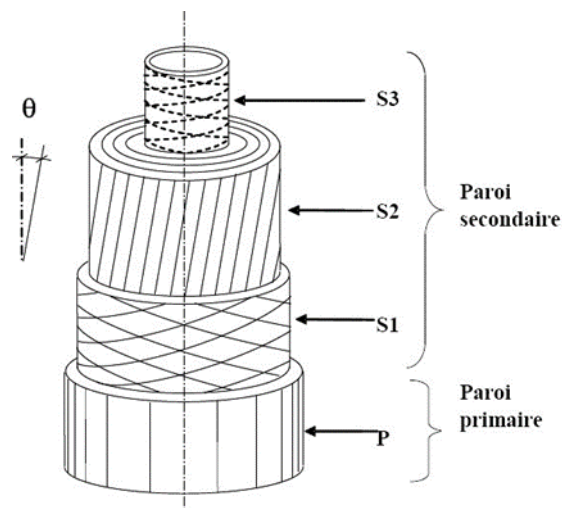


Figure 1-4 : Structure détaillé d'une fibre Végétale [2].

- La lamelle moyenne est la couche intercellulaire. Elle constitue un ciment formé de pectine d'où le caractère hydrophile et polyanionique de cette enveloppe. Son épaisseur varie entre 0,5 et 1,5 $\mu\text{m}$  [2].
- La paroi primaire dont l'épaisseur varie entre 1 à 3 $\mu\text{m}$  renferme de l'eau (90 %), de la cellulose (80 %), d'hémicellulose, de lignine (parfois), d'extractibles ainsi que de substances pectiques. Les microfibrilles celluloseuses enchevêtrées forment un réseau poreux. Cette paroi constitue une continuité à la lamelle moyenne et présente une grande élasticité [3].

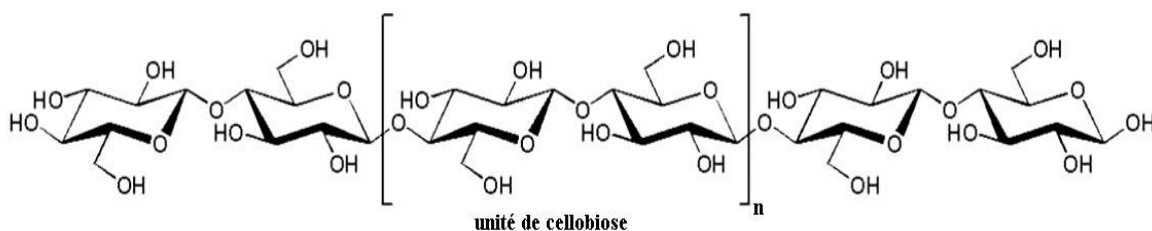
- La paroi secondaire est rigide et inextensible à cause de l'absence de pectines et la présence d'une structure fibrillaire très compacte due au degré de cristallinité élevé de la cellulose. Elle est riche en lignine, en cutine et en subérine, par contre, elle est peu hydratée (< 20 %). Cette paroi est formée de trois sous-couches qui sont :
  - La couche S1 est constituée de microfibrilles croisées formant un angle compris entre 60° et 80° par rapport à l'axe de la cellule. Son épaisseur est comprise entre 0,1 et 0,35 µm.
  - La couche S2 est la partie la plus volumineuse de la paroi. Les microfibrilles se présentent en hélice en formant un angle de 5° à 50° par rapport à l'axe de la cellule. Son épaisseur varie entre 1 et 10µm. Elle présente 15 à 85 % de l'épaisseur totale de la couche.
  - La couche S3 présente une épaisseur entre 0,5 et 1,1 µm. Dans cette couche, les microfibrilles sont orientées suivant un angle variant entre 60° et 90° par rapport à l'axe de la cellule.

### 1.1.3. Composition chimique des fibres végétale

La cellulose, l'hémicellulose et la lignine constituent les composés majeurs des fibres végétales. Leurs teneurs varient d'une espèce à une autre. Pour le même type de fibre, la composition chimique dépend de l'état de la maturité de l'espèce, de l'organe de provenance de la fibre, des conditions climatiques et des conditions d'extraction utilisées pour l'obtention des fibres [4,5].

#### 1.1.3.1. La cellulose

La cellulose est le polymère naturel le plus abondant dans la nature. 830 millions de tonnes de cellulose sont produits annuellement par photosynthèse. Il s'agit d'un homopolymère formé par l'enchaînement d'unités de cellobiose (formé de 2 unités de glucose) liées entre elle par une liaison glucosidique.



*Figure 1.5: Structure chimique de la cellulose [4].*

L'orientation des molécules de la cellulose ainsi que la présence des groupements hydroxyles libres permettent la formation des liaisons hydrogènes inter et intra-caténares, ce qui est à

l'origine de formation des « microfibrilles » (Figure 1.6). Le repliement de ces dernières donne les macrofibrilles [4].

Les liaisons hydrogènes jouent également un rôle important dans la formation des zones cristallines. Plus la densité de la cellulose est élevée, plus les zones cristallines sont formées. Les microfibrilles de cellulose présentent donc des régions bien ordonnées et cristallines et des régions désordonnées, dites amorphes (Figure 1.7). La plupart des plantes cellulosiques présentent 80 % de régions cristallines de leur structure. Le degré de polymérisation (DP) varie entre 10000 et 150000 selon l'espèce végétale [5].

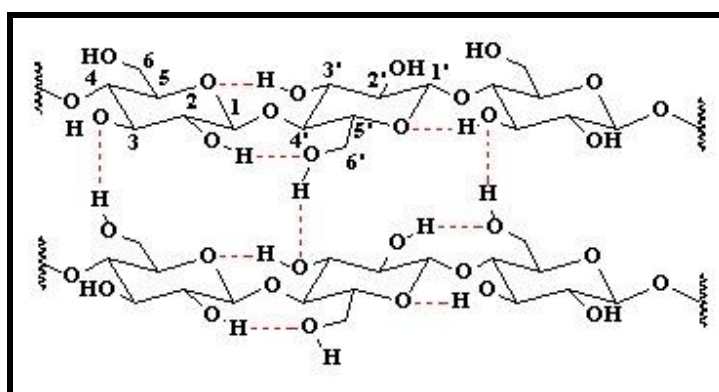


Figure 1.6: Liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires entre deux chaînes cellulosiques [4].

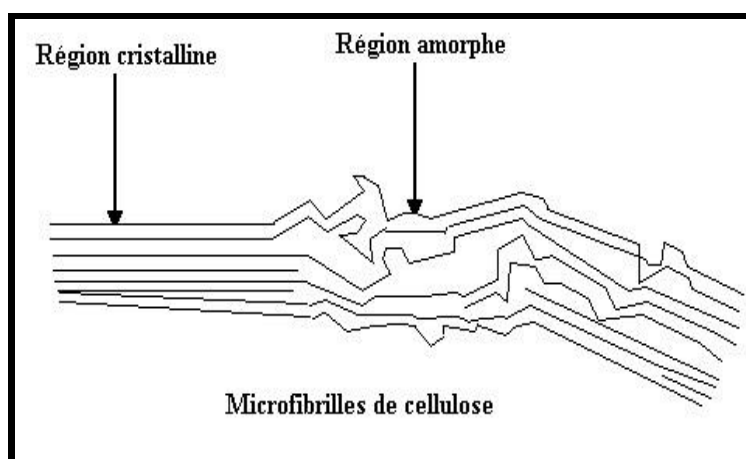
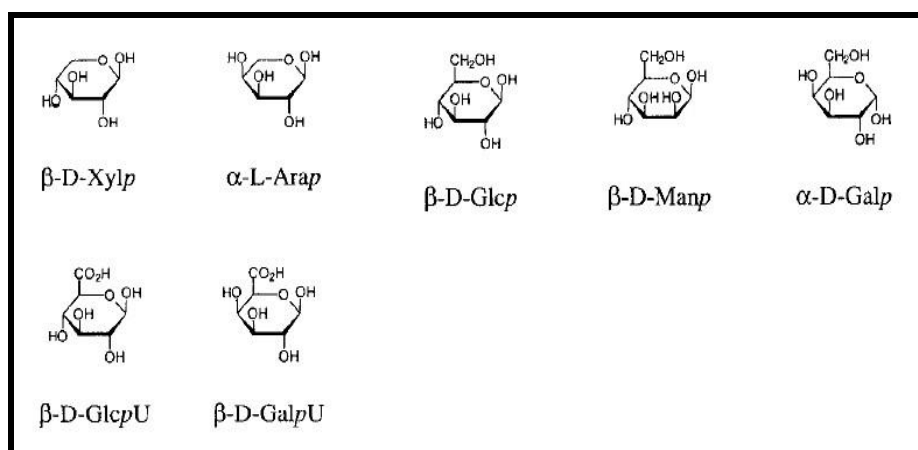


Figure 1.7: Morphologie d'une microfibrille de cellulose [6].

La cellulose n'est pas hydrosoluble mais est fortement hydrophile. Elle est insoluble dans la plupart des solvants mais en même temps elle est sensible à l'hydrolyse acide ce qui conduit à des sucres solubles dans l'eau [8].

### 1.1.3.2. Les hémicelluloses

Contrairement à la cellulose, l'hémicellulose est un polysaccharide formé d'unités saccharidiques de nature différente. Elle est composée principalement de xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose et d'acide uronique (Figure 1.8). Sa structure diffère selon l'origine végétale [8].



*Figure 1.8: Structures chimiques des unités de base de l'hémicellulose [4].*

Les hémicelluloses se caractérisent également par leurs chaînes moléculaires courtes et ramifiées ( $50 < DP < 300$ ), d'où leur caractère amorphe.

Les hémicelluloses forment une matrice de soutien pour la cellulose. Elles sont hydrophiles, solubles dans les solutions alcalines et facilement hydrolysables par les acides [9].

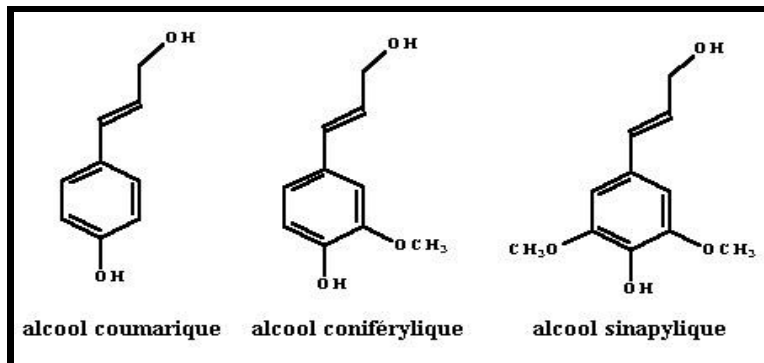
### 1.1.3.3. Les lignines

De polymères tridimensionnels résultant de la copolymérisation de trois monomères aromatiques qui sont : l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique (Figure 1.9). La structure de la lignine est variable selon la nature de l'espèce végétale. On donne un exemple de structure de lignine sur la figure 1.10. La proportion majeure de lignine se trouve au niveau de la paroi secondaire (70 %), le reste se trouve au niveau de la lamelle moyenne. C'est le constituant qui confère la rigidité aux parois des plantes en incrustant la cellulose et l'hémicellulose [8].

La lignine est une macromolécule de poids moléculaire élevé, totalement amorphe et hydrophobe. C'est un polymère thermoplastique ayant une température de transition vitreuse égale à  $90^{\circ}\text{C}$  et une température de fusion aux alentours de  $170^{\circ}\text{C}$ . Il est résistant à l'hydrolyse acide, soluble dans les solvants alcalins à chaud, oxydable et condensable avec le phénol [Jacob



John and Thomas, 2008]. En général, les fibres ayant une faible teneur en cellulose possèdent au contraire une teneur élevée en lignine [7].



*Figure 1.9: Structure chimique des unités composant la lignine [Satge, 2002].*

#### 1.1.3.4. Les pectines

Elles caractérisent les premières assises formées dans la paroi cellulaire ainsi que la substance intercellulaire qui consolide les parois des cellules contiguës chez les dicotylédones et dans une moindre mesure chez les monocotylédones. Les pectines sont des polysaccharides très hydrophiles et l'eau qu'elles introduisent dans la paroi cellulaire rend la paroi plastique [7].

#### 1.1.3.5. Les extractibles

Ce sont des composés chimiques constitutifs de la paroi cellulaire. Ils renferment essentiellement des matières grasses, d'acides gras, d'alcool gras, des phénols, des terpènes... etc. ils peuvent être extraits par différents types de solvants [10].

#### 1.1.3.6. Les cendres

C'est le résidu en sels minéraux et en matières inorganiques obtenu après combustion de la fibre à température égale à  $575 \pm 25^\circ\text{C}$ . La teneur en matière minérale peut être élevée dans les plantes contenant une quantité importante de silice [11].



Le tableau 1.1 présente la composition chimique de quelques fibres végétales.

*Tableau 1.1: Exemples de composition chimique de fibres végétales [38].*

fibres	Cellulose (%)	Lignine (%)	Hémicellulose (%)	Cendres (%)
Riz	28-48	12-16	23-28	15-20
Orge	31-45	14-15	24-29	5-7
Seigle	33-50	16-19	27-30	2-5
Bagasse	32-48	19-24	27-32	1.5-5
Bambou	26-43	21-31	15-26	1.7-5
Alfa	33-38	17-19	27-32	6-8
Chanvre	57-77	9-13	14-17	0.8
Ramie	87-91	-	5-8	-
Abaca	56-63	7-9	15-17	1-3
Sisal	43-62	7-9	21-24	0.6-1
Coton	85-96	0.7-1.6	1-3	0.8-2
Mais	40-43	13-15	28-30	-
Canne à sucre	32-48	19-24	27-32	-
Bois conifères	40-45	26-34	7-14	<1
Bois feuillus	38-49	23-30	19-26	<1

#### 1.1.4. Propriétés physico-mécaniques des fibres

La densité, la résistivité électrique, la force de traction, le module de Young, la reprise d'humidité et le degré de cristallinité dépendent de la composition chimique et de la structure interne de la fibre. En général, on admet que les fibres ayant une forte teneur en cellulose, un



haut degré de polymérisation de la cellulose et un faible angle microfibrillaire sont des fibres qui possèdent les meilleures propriétés mécaniques [12]. Le tableau 1.2 présente des exemples de propriétés physiques de fibres lignocellulosiques.

**Tableau 1.2: Propriétés physiques de différentes fibres végétales [Mwaikambo, 2006].**

Nature des fibres	Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	Longueur (mm)	Facteur de forme (L/D)	Angle micro fibrillaire (degrés)	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Reprise de l'humidité (%)
Abaca	17,0-21,4	4,6-5,2	257	-	1500	14,00
Bagasse	20	1,7	-	-	550-1250	-
Banane	-	2-3,8	-	11-12	1300-1350	-
Bambou	10-40	2,7	-	-	1500	-
Coco	16,2-19,5	0,9-1,2	64	39-49	1250	13,00
Coton	11,5-17,0	20-64	2752	20630	1550	8,50
Lin	17,8-21,6	27,4-36,1	1258	5	1400-1500	12,00
Chanvre	17,0-22,8	8,3-14,1	549	6,2	1400-1500	12,00
Jute	15,9-20,7	1,9-3,2	157	8,1	1300-1500	17,00
Kapok	15-35	32	724	-	384	10,90
Kénaf	17,7-21,9	2,0-2,7	119	-	1220-1400	17,00
Ananas	20-80	-	-	6-14	1520-1560	-
Ramie	28,1-35,0	60-250	4639	-	1550	8,50
Sisal	18,3-23,7	1,8-3,1	115	10-22	1300-1500	14,00

Le tableau 1.3 présente les propriétés mécaniques de quelques fibres végétales.

**Tableau 1.3: Propriétés mécaniques de différentes fibres végétales [Mwaikambo, 2006].**

Propriétés	Force de traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Abaca	12	41	3,4
Banane	529-914	27-32	1-3
Ananas	413-1627	60-82	0-1,6
Sisal	80-840	9-22	2-14
Bambou	575	27	-
Lin	500-900	50-70	1,3-3,3
Chanvre	310-750	30-60	2-4
Jute	200-450	20-55	2-3
Kénaf	295-1191	22-60	-
Ramie	915	23	3,7
Coco	106-175	6	15-40
Coton	300-700	6-10	6-8
Kapok	93,3	4	1,2

### 1.1.5. Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale (Fig. 1.11) [19]. La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de la porosité des fibrilles [21].

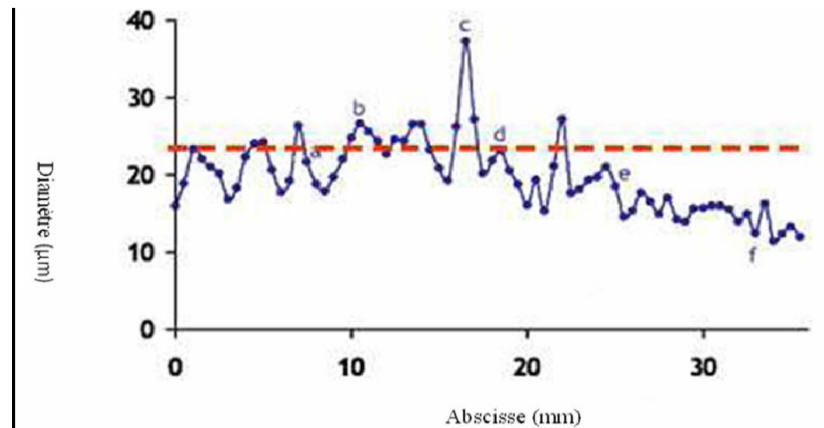
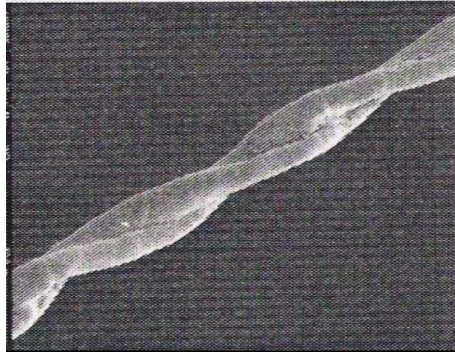


Fig. I.10: Variation du diamètre le long de la fibre de lin [19].

Tab I.4 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales.

Fibres	Longueur de la fibre (mm)	Diamètre de la fibre (µm)	Angle micro fibrillaire (°)	Normes
<b>Cotton</b>	35	10-45	-	SAT 09
<b>Lin</b>	4-77 5-	5-76	10	CHA 06
<b>Chanvre</b>	55	10-51	6.2	NEN 09
<b>Kénaf</b>	2.5-4.5	14-33	-	MIC 03 MIC
<b>Banane</b>	2.5	12-24	8	03
<b>Jute</b>	2-3.8	5-25		SAT 09 SAT
<b>Sisal</b>	900	8-50	20	09
<b>Rami</b>	900-1200	20-80	7.5	CHA 06
	03-1		45	SAT 09

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice. La (Fig 1.11) présente à titre d'exemple la structure torsadée d'une fibre de coton. D'autres fibres ont des morphologies, encore plus tourmentées. La géométrie des fibres végétales est donc un problème important et difficilement surmontable pour ce qui concerne la micromécanique des composites renforcée par de telles fibres [23].



*Figure 1-11 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [23].*

### 1.1.6. Méthodes d'extraction des fibres

L'extraction des fibres naturelles est un procédé classique. Souvent les fibres naturelles se présentent sous une forme qui ne permet pas leur filage, donc il faut transformer par extraction et purification de la matière première en une forme fiable. Vu la diversité des matières brutes, le procédé d'extraction diffère d'un type à l'autre. Ainsi nous distinguons plusieurs procédés d'extraction des fibres selon la nature et le domaine d'utilisation de celles-ci : le procédé mécanique, le procédé biologique et le procédé chimique.

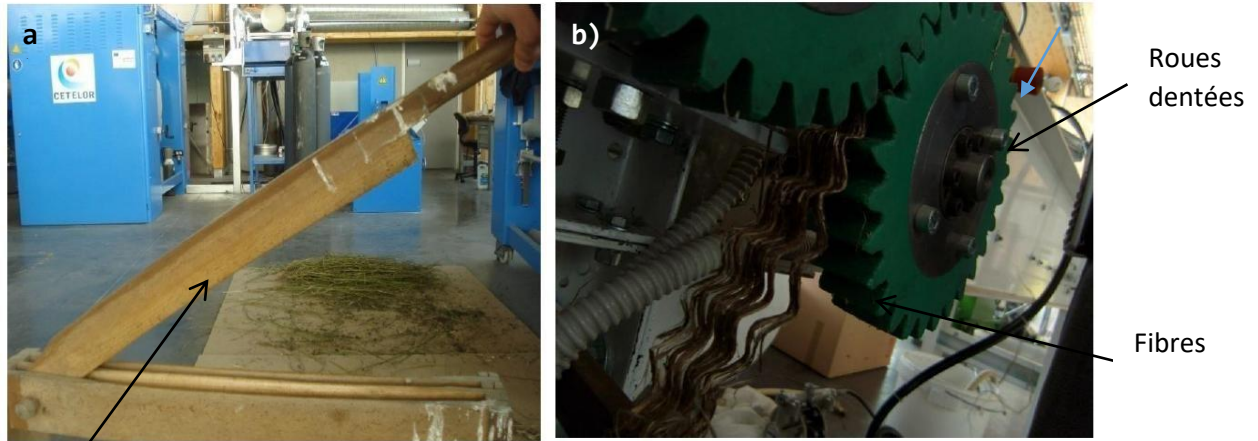
#### 1.1.6.1. L'extraction mécanique

##### 1.1.6.1.1. Le teillage

Cette méthode consiste à séparer le bois (le casser) des tiges par action mécanique : broyage et battage. Cette technique est plutôt utilisée pour extraire les fibres de lin ou de chanvre, les tiges sont prises par leurs extrémités et insérées dans le tilleul ou l'écang (instrument manuel à levier) si l'opération est manuelle. Les tiges sont battues pour enlever le bois, et cette opération est répétée jusqu'à ce que les fibres soient le plus souple possible. Les morceaux de bois récupérés sont appelés les « anas ». Cette méthode ancestrale a été toujours effectuée manuellement, avant de laisser la place aux machines, nous retrouvons aujourd'hui des systèmes complètement automatisés qui engagent, maintiennent et dégagent automatiquement les tiges sans aucune intervention humaine grâce à des systèmes de roues cannelées à grosses dentures au début puis à plus fines denture. Par la suite, elles passent sous la cannelure des rouleaux avec un angle proche de 90° pour rendre le broyage plus efficace selon [13] et [boiseau.free.fr/dossiers/lin](http://boiseau.free.fr/dossiers/lin) [12].

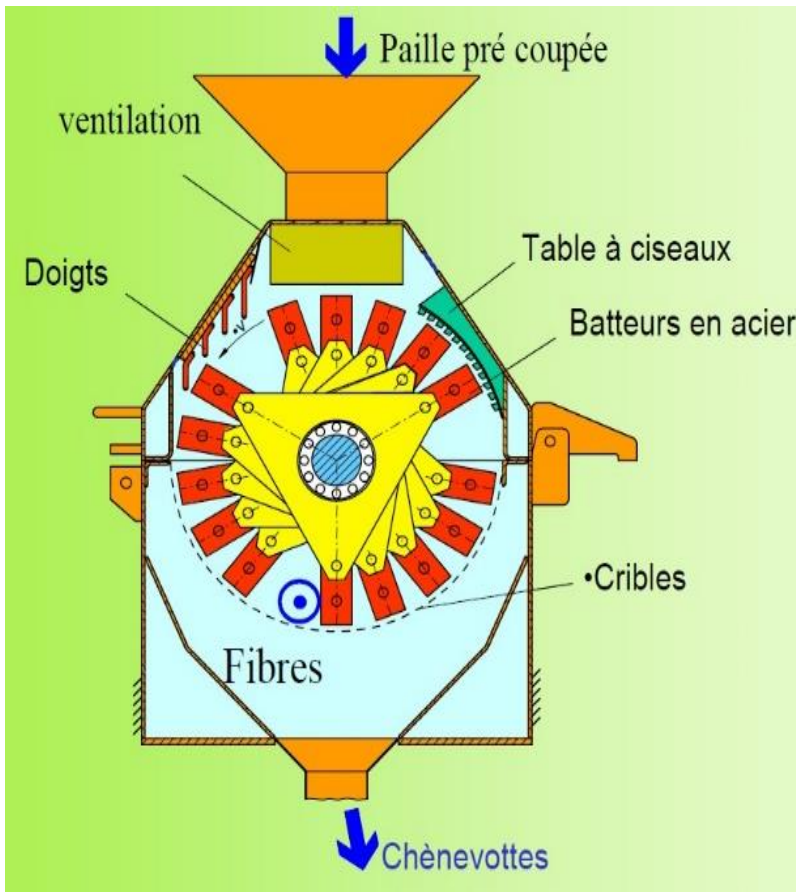
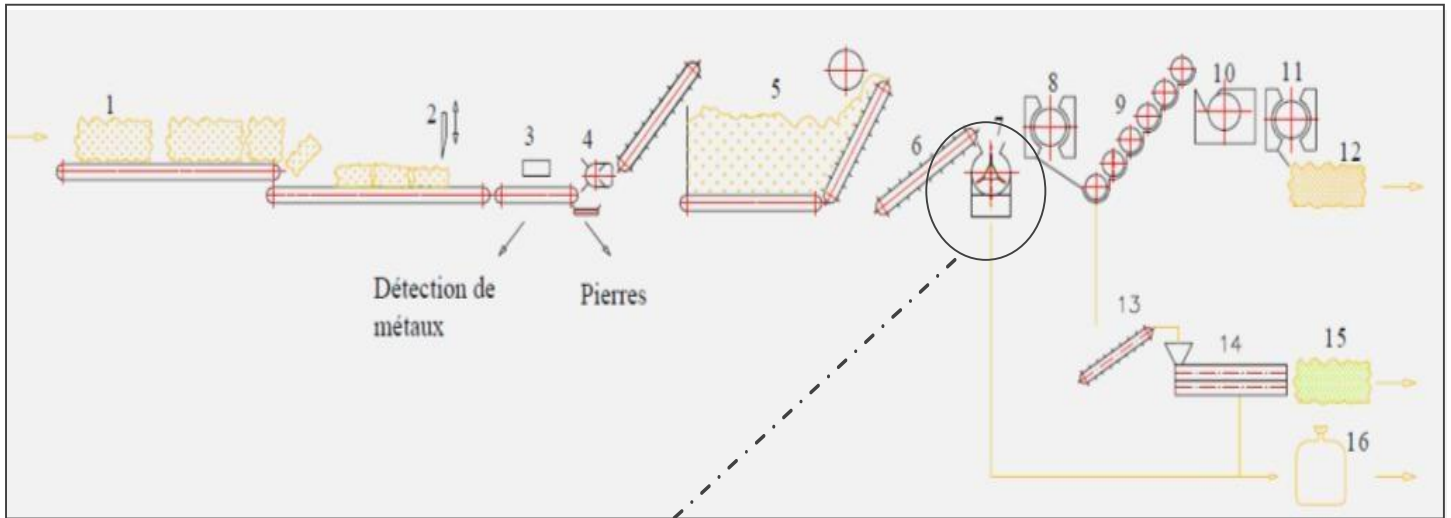
Cette technique est améliorée si les tiges au départ sont dures et sèches, d'où la nécessité d'une étape préliminaire qui consiste à chauffer les tiges dans un four ou par un

fumage. Enfin, pour donner aux fibres obtenues un meilleur aspect, les faisceaux de fibres sont divisés et parallélisés par une opération de peignage et séparées selon leur longueur.



*Figure 1-10-1 : Racleur pour extraction manuel (a)  
Cylindres cannelés pour extraction mécanique (b)[12], [13]*





- 1 . Balles de paille
- 2 . Découpage
- 3 . Détecteur de métaux
- 4 . Séparateur de pierre
- 5 . Système de dosage
- 6 . Transporteur
- 7 . Machine d'extraction
- 8 . Condensateur
- 9 . Nettoyeur
- 10 . Ouverture horizontale
- 11 . Condensateur
- 12 . Balles de fibres
- 13 . Transporteur
- 14 . Fraction axiale
- 15 . Fibres courtes
- 16 . Chènevottes

Figure 0-13 : Ligne automatique d'extraction de fibres végétales et son système de grattage [12], [13]

### 1.1.6.2. L'extraction biologique

Dans cette partie on présentera les différentes modes d'extraction des fibres par méthode biologique qui se distingue de la méthode traditionnelle par le fait qu'ici, les fibres se décomposent sur l'influence d'une action biologique alors la méthode traditionnelle renvoie à l'extraction plus ou moins directe des fibres. Ces différentes façons sont élaborées ci-dessous :

#### i. Le rouissage à terre

Le rouissage est un procédé naturel destiné à favoriser l'extraction des fibres, il consiste à étaler les tiges (de lin par exemple) dans un champ après sa récolte, afin de bénéficier de l'action combinée du soleil et de la pluie ce qui va favoriser le développement de microorganismes capables de dissocier les éléments non celluloseux de la partie fibreuse de la plante par élimination des liaisons qui les relient ensemble. Cette opération peut durer 6 à 8 semaines en fonction de la météo. Malgré l'efficacité de cette méthode, elle connaît plusieurs handicaps qui résident dans sa dépendance entière des conditions météorologiques, le moindre problème tel qu'un excès d'humidité ou un manque peut affecter directement la qualité des fibres obtenues. En effet si les tiges sont trop rouies, elles doivent être brûlées obligatoirement car elles pourrissent difficilement et lentement, et favorisent ainsi l'éclosion de maladies pour la culture suivante. Si la récolte n'est pas assez rouie, elle n'est pas transformable, et donc invendable. Un autre paramètre difficile à contrôler et qui nécessite un bon dosage, c'est le vent qui peut être à la fois un ennemi et un allié lors du rouissage. Quand il souffle trop fort, les tiges sont emportées vers l'extrémité du champ, mais il est nécessaire au séchage, c'est donc l'alternance des périodes de sec et d'humidité avec un vent léger qui favorise un bon rouissage. Une autre difficulté de ce procédé est sa durée très longue. Donc le rouissage à l'air ou à terre est un procédé efficace si la météo est bonne mais qui reste très lent, par conséquent, c'est un procédé aléatoire [26].

#### ii. Le rouissage à l'eau

Ce type de rouissage repose sur le même principe de développement de microorganismes que le rouissage à l'air, la différence est que les tiges (de chanvre par exemple) sont plongées dans l'eau pendant plusieurs jours. Les bottes de 5 à 7 Kg sont soumises à l'action de bactéries anaérobies. Dès que les fibres se détachent sur toute la longueur, la plante est sortie de l'eau pour être séchée. Cette technique donne des résultats moins aléatoires que la première mais elle présente un handicap majeur : la pollution de l'eau. En effet, le rouissage du lin et du chanvre très répandu au nord de l'Europe (France, Belgique, Pays Bas)



s'effectuait traditionnellement en rivière avant qu'il soit interdit au début du 20<sup>ème</sup> siècle pour des raisons environnementales, à cause de la décomposition bactérienne des bottes trempées au fond des rivières. L'eau devenait d'une couleur rousse et des nuisances olfactives gênaient les riverains, la Lys par exemple était très réputée. Le rouissage à l'eau est effectué ensuite en cuve, dans de l'eau tempérée (37°C) jusqu'à ce que les fibres soient délignifiées et non adhérentes. Cette technique est en régression continue, au profit du rouissage à terre.

### iii. Par action microbienne

Trois groupes d'agents microbiens sont capables de dégrader les composants non celluloseux présents dans les tiges ou les feuilles des plantes : les bactéries, les protozoaires et les champignons.

Dans la première catégorie de bactéries, il existe trois espèces, une qui possède une activité dépolymérase et une autre glycosidase capables d'hydrolyser la chaîne principale et de couper les chaînes latérales en utilisant les oligosaccharides et les oses libérés. La deuxième possède uniquement une activité dépolymérase mais incapable d'utiliser les produits d'hydrolyse des hémicelluloses. Enfin la troisième, qui possède des activités glycosidiques mais dépourvue d'activité dépolymérase.

Plusieurs espèces des protozoaires sont capables de dépolymériser les hémicelluloses, ainsi que pour les substances pectiques, mais elles n'ont qu'une capacité limitée à utiliser les produits d'hydrolyse comme source d'énergie.

Concernant les champignons, ils sont capables de dépolymériser les hémicelluloses et d'utiliser les oligosaccharides et les oses libérés, et de solubiliser partiellement la lignine.

#### 1.1.6.3. Méthode chimique d'extraction

Les méthodes les plus courantes comprennent les alcalis, les acides doux et les enzymes pour l'extraction des fibres. Sodium l'hydroxyde est le produit chimique le plus couramment utilisé pour l'extraction des fibres. L'acide sulfurique et l'acide oxalique dans 468 Recherche sur le design - Soutien au développement durable des produits. La combinaison avec un détergent peut également être utilisée pour l'extraction des fibres. La suppression chimique est une solution alcaline à faible concentration et processus à haute température. Les facteurs qui déterminent la qualité des fibres chimiquement extraites sont la concentration chimique, la durée du traitement et la température. L'extraction enzymatique des fibres



comprend une combinaison d'enzymes telles que les pectinases, les hémicelluloses et Cellulases qui sont généralement utilisées avec un traitement chimique pré ou post de fibres.

Dans cette section, nous présentons les principales méthodes d'extraction chimique des fibres végétales [28].

#### 1.1.6.3.1. Procédé Kraft

Ce procédé alcalin visant à éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses sous l'action d'une solution d'Hydroxyde de Sodium ( $NaOH$ ) et de Sulfure de Sodium ( $Na_2S$ ), ce dernier est un réducteur, il protège la cellulose et évite son oxydation. La température de cuisson est comprise entre  $170^{\circ}$  et  $175^{\circ}C$  pour une durée de 2 à 4 heures. Lors de la cuisson, le sulfure de sodium est hydrolysé en soude, en  $NaHS$  et en  $H_2S$ . Les différents composés soufrés présents réagissent avec la lignine pour donner des thiolignines plus facilement solubles. La soude joue aussi un rôle de délignification qui s'associe à celui du sulfure et de ses dérivés. La liqueur appliquée au matériau est appelée liqueur blanche. La liqueur extraite du réacteur contenant les composés éliminés de la paroi est appelée liqueur noire.

#### 1.1.6.3.2. Procédé acide

Les composants non cellulosiques sont éliminés par l'action d'un acide de préférence fort tel que l'acide sulfurique qui transforme la lignine en acide lignosulfonique soluble, ou l'acide chlorhydrique qui, grâce à ses ions chlorates, forme des chlorolignines solubles dans l'hydroxyde de sodium.

#### 1.1.6.3.3. Procédé à la soude

Ce procédé n'utilise que la soude  $NaOH$  pour dissoudre les substances non cellulosiques telles que la lignine, la pectine et l'hémicellulose, ainsi que les différents constituants formant la réserve et la paroi extérieure de la tige de plante. La température, la pression, la concentration et la durée du traitement sont à définir en fonction du lot, l'âge et le type de la plante de telle façon à ne pas dégrader les fibres cellulosiques. Il est conseillé de contrôler le pH de la solution et l'ajuster autour de 7. Des réducteurs peuvent être rajoutés pour empêcher l'oxydation de la cellulose.

#### 1.1.6.4. Etude comparative des différentes méthodes d'extraction

Dans cette partie, nous présenterons une étude comparative entre les différentes méthodes citées plus haute. De ce fait, nous comparerons les différentes caractéristiques des fibres extraites par chacune des méthodes telles que le rendement qui est le rapport des



déchets produits sur les fibres utiles résultant d'une méthode d'extraction bien précise, la vitesse, la cadence parmi tant d'autres. A la fin de cette étude comparative, nous choisirons la méthode la plus apte pour l'extraction des fibres du pseudo- tronc de bananier.

Globalement, il convient de reconnaître que l'extraction manuelle est difficile, car elle requiert un savoir-faire et un soin particulier pour éviter d'endommager la fibre. La fibre doit être peignée à la main pour retirer les résidus de fibres cassées, les pigments, l'excès d'humidité etc. Le filage des fils, lorsqu'il est réalisé à la main, est chronophage et empêche un développement à grande échelle. Et bien que les savoir-faire ancestraux et les méthodes traditionnellement manuelles doivent être préservés, l'utilisation de machine pour recycler les déchets de l'agroalimentaire à des fins vestimentaires pourrait être une grande avancée. La fibre de banane produite à grande échelle pourrait venir concurrencer le coton dont la culture est extrêmement dévastatrice.

Le **Tableau 1.5** nous donne un récapitulatif des rendements différentes méthodes d'extraction de fibres les plus couramment utilisés.

*Tableau 0-5 : Récapitulatif des rendements des méthodes[61].*

Méthode		Manuelle	Mécanique	Microbienne
<b>Propriétés</b>	Rendement	+++	+	++
	Rapidité	+	++	++
	Vitesse d'extraction	+	+++	+
	La cadence	+	+++	+
	La qualité	+++	+	++

Légende : + : faible ; ++ : moyenne ; +++ : élevé

Le rendement : quantité de fibres produit sur la quantité de déchet produit ;

La cadence : la quantité de matière à traiter ;

La qualité : il s'agit de l'uniformité et de la composition des fibres après traitement.

Il ressort de ce tableau que la méthode d'extraction manuelle nous offre le meilleur rendement et qualité en fibre, la meilleure vitesse et cadence d'extraction offerte par la méthode mécanique et la rapidité par les méthodes microbienne et mécanique.

### 1.1.7. Traitement des fibres végétales

Pour améliorer les performances mécaniques, accroître l'adhésion à l'interface fibre végétale/matrice et éviter la mauvaise dispersion des fibres dans la matrice et la formation d'un



matériau hétérogène, plusieurs approches ont été étudiées visant la modification de la surface des fibres végétales.

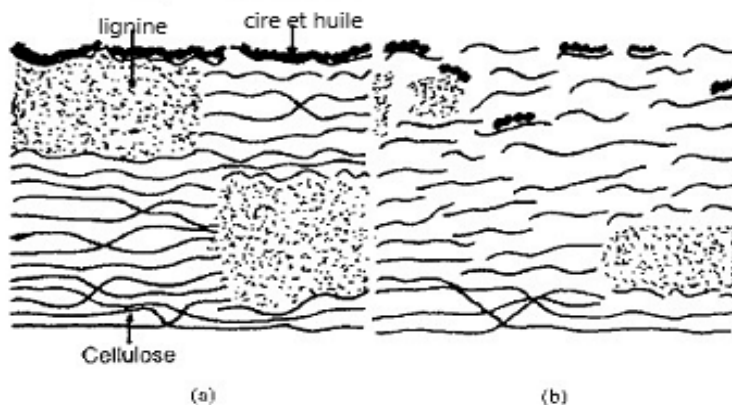
On distingue plusieurs méthodes de traitement des fibres végétales :

#### 1.1.7.1. Traitement alcalin (mercerisage)

Le traitement alcalin est la méthode couramment employée pour produire des fibres de haute qualité et ce par l'élimination d'une certaine quantité de lignine, des pectines, de cires et d'huiles naturelles couvrant la surface externe de la paroi cellulaire des fibres [12]. Ceci entraîne ainsi la fibrillation du faisceau de fibres et donne une topographie de surface rugueuse à la fibre (Figure 1.13).

En d'autres termes, le traitement alcalin réduit le diamètre des fibres et augmente ainsi le facteur de forme (L/d). Par conséquent, on assiste à une meilleure adhésion à l'interface fibre-matrice et à une amélioration des propriétés mécaniques.

Par l'élimination des impuretés et de certains composés cimentaires, la quantité de la cellulose exposée à la surface sera plus importante, ce qui accroît le nombre de sites de réaction possibles ainsi que leur accessibilité [26].



*Figure 1.14: Structure typique d'une fibre cellulosique non traitée (a) et mercerisée (b) [26].*

Le traitement des fibres naturelles par une solution aqueuse de soude favorise la réaction suivante. [16].



Le mercerisage influe sur la composition chimique des fibres, le degré de polymérisation et l'orientation moléculaire des cristallites de cellulose en raison de l'élimination de la lignine et de l'hémicellulose. Il conduit également à une augmentation de la quantité de la cellulose

amorphe au détriment de la cellulose cristalline et la destruction des liaisons hydrogènes dans la structure du réseau [26].

### 1.1.7.2. Traitement au peroxyde

Le traitement au peroxyde des fibres végétales a attiré l'attention de plusieurs chercheurs en raison de la facilité du processus de la modification chimique et l'amélioration des propriétés mécaniques des fibres. Les peroxydes organiques ont tendance à se décomposer aisément en radicaux libres (RO.) qui réagissent ultérieurement avec les groupements hydrogènes de la cellulose et de la matrice aussi [27].



On utilise pour ce traitement soit le peroxyde de benzoyle soit le peroxyde de dicumyle [15].

### 1.1.7.3. La Benzoylation

Le chlorure de benzoyle est souvent utilisé pour la benzoylation des fibres. L'insertion du groupement benzoyle ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}=\text{O}$ ) dans la structure des fibres permet de réduire le caractère hydrophile des fibres traitées.

Le principe du traitement repose sur un traitement initial avec la soude afin d'activer les groupements hydroxyles de la cellulose et de la lignine suivi d'un traitement au chlorure de benzoyle (Figure 1.17) [26].

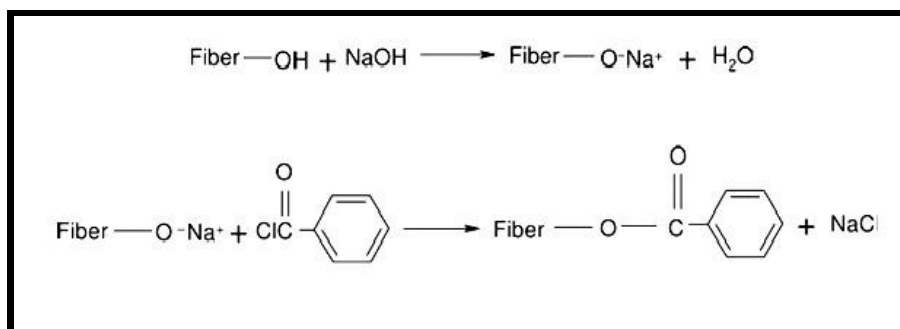


Figure 1.15 : Schéma de principe de la benzoylation [26].

**Tableau 1.6: Exemples de traitement de fibres végétales et de leur application envisagée**

Fibre	Traitement	Application	Spécificités étudiées	Auteurs
<b>Fibres de coco</b>	-Acétylation -Couplage chimique	Renforcer des matrices en polyester	-Influence du traitement sur la biodégradation du composite	<b>Abdul Khalil and Ismail, 2001</b>
<b>Fibres de bagasse</b>	-Traitement alcalin -Couplage chimique	Renforcer une résine de polyester insaturé	-Etude des propriétés mécaniques et hydrauliques et le vieillissement des composites	<b>Vilay et al, 2008</b>
	-Couplage chimique	Renforcer des matrices cimentaires	-Influence du traitement sur le temps de prise du ciment	<b>Bilba and Arsene, 2008</b>
<b>Fibres de banane</b>	-Traitement alcalin -Couplage chimique	Renforcer des composites à base d'une matrice de polyester	-Etude de la résistance à la flexion et la résistance à la traction	<b>Pathon et al, 2002</b>

### 1.1.8. Avantages et limites d'utilisation des fibres végétales

Bien que nous voulions développer des études sur ces fibres végétales, Nous notons qu'elles constituent une alternative intéressante par rapport aux fibres de verre en raison de leur recyclage. Néanmoins leurs propriétés doivent être encore améliorées. Elles présenteraient, toutefois, de nombreux avantages et inconvénients :

*Tableau I. 7 : Principaux avantages et inconvénients des fibres naturelles [10].*

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<b>Faible cout</b>	Absorption d'eau
<b>Biodégradabilité</b>	Faible stabilité dimensionnelle
<b>Ne polluent pas les océans</b>	mauvaise tenue au vieillissement
<b>Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation</b>	Faible tenue thermique 200-230 max
<b>Neutres en carbones</b>	Fibres anisotropes
<b>Ressource renouvelable</b>	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo, de l'humidité
<b>Propriétés mécaniques spécifiques proches de celle du verre (module d'Young)</b>	Demande la gestion des stocks pour des applications industrielles
<b>Bonne isolation thermique et acoustique</b>	Renfort discontinu
<b>Demande peu d'énergie pour être produite</b>	Méthode de mise en œuvre difficile
<b>Non abrasif pour les outillages</b>	La reprise en eau importante : 8 à 10% du taux d'humidité
<b>Recyclage facile</b>	Calibration difficile vu la panoplie de fibre

Comme tous les produits naturels, les propriétés mécaniques et physiques des fibres naturelles varient considérablement. Ces propriétés sont gouvernées par la composition chimique et structurale et dépendent du type de la fibre et des conditions de croissance. La cellulose, le composant principal de toutes les fibres végétales, varie d'une fibre à une autre.

La sensibilité à l'humidité est remarquable, les fibres naturelles sont facilement influencées par l'environnement. De manière générale la haute teneur en humidité réduit les propriétés mécaniques.

Les propriétés mécaniques des matériaux composites sont influencées principalement par l'adhérence entre la matrice et les fibres. Si de nombreux articles ont pu montrer que les fibres végétales possédaient des propriétés mécaniques comparables aux fibres de verre traditionnellement utilisées, en revanche, les propriétés des matériaux composites les intégrant





restent inférieures. De nombreuses études ont donc porté sur l'amélioration de ces propriétés, notamment par le biais de traitement physique ou chimique des fibres

### 1.1.9. Présentation du bananier

#### 1.1.9.1. Historique de la plante

La banane est l'un des fruits les plus anciennement cultivés par l'homme. En 327 avant Jésus-Christ, la banane fut remarquée dans la basse vallée de l'Indus en Inde. Tout comme dans le sud de la Chine, la culture de la banane est attestée de longue date. Les missions des prospecteurs effectuées en Asie au milieu du siècle dernier ont dévoilé la richesse insoupçonnée des ressources génétiques de *Musa* et montre que la banane a probablement son origine en Asie du Sud-Est. De là, elle aurait migré à travers le monde dans toutes les zones tropicales.

Mais la plus ancienne preuve de l'utilisation de la fibre de banane remonte au 13<sup>ème</sup> siècle au Japon. Le tissu à base de fibres de bananier était alors particulièrement recherché et destiné à la confection des habits de cérémonies les plus chères. Ce tissu s'appelle le bashôfu littéralement « tissu de fibre de banane ». Originaire de l'île d'Okinawa, le bashôfu fait partie du folklore et du savoir-faire de l'île. Bien que la production sur l'île ait connu un déclin important après la seconde Guerre mondiale, le bashôfu est aujourd'hui de nouveau populaire. En 1914, il a même obtenu le statut de « patrimoine culturel immatériel du Japon ».

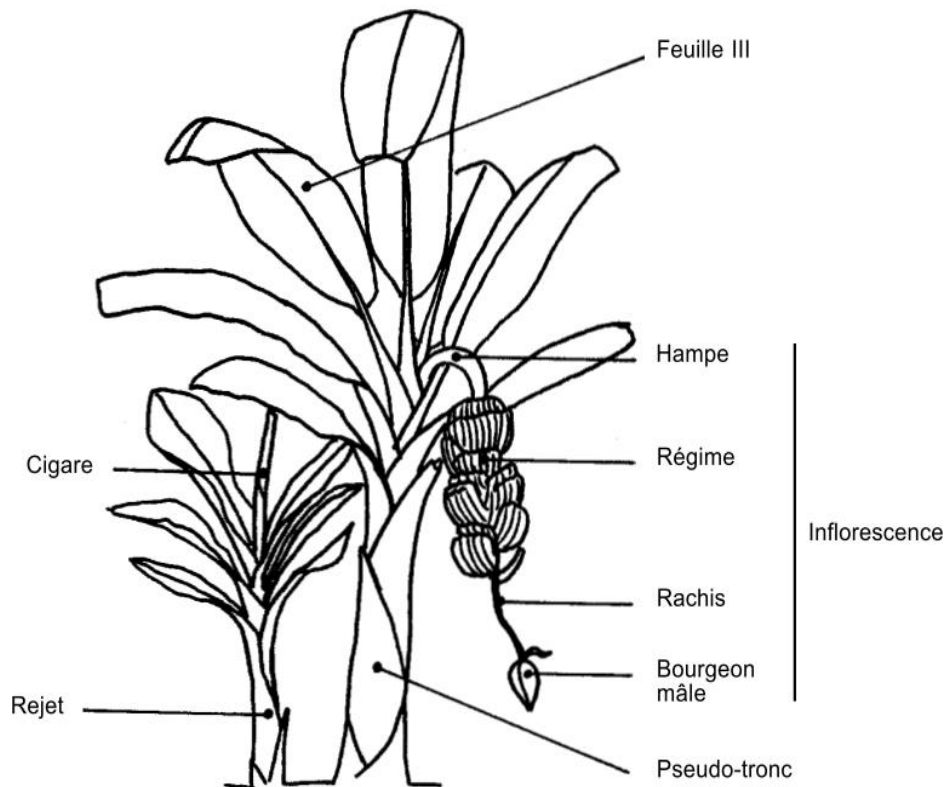
Durant des siècles, la fibre de bananier a également été utilisée à large échelle au Népal aux Philippines, avant d'être délaissée au profit d'autres fibres plus faciles à extraire et protéger par les lobbys industriels. La popularisation du coton et de la soie notamment, a sonné le déclin de la fibre de bananier.

#### 1.1.9.2. Description du bananier

Le bananier est une plante gigantesque, souvent désignée à tort comme arbre. Comme un monocoque, il a un système racinaire adventice pur avec la mort biologique de la racine de robinet dans les premiers stades. Les racines émergent en grappes de quatre et se propagent latéralement de la tige souterraine (corme). La corme est une tige condensée, parfois appelée rhizome. Il a des « yeux » sur elle à partir de laquelle les nouvelles plantules (ventouses) émergent. La tige aérienne vue au-dessus du sol est le pseudotrunc, qui est formé par des gaines de feuilles étroitement emballées encerclant la pointe de croissance. Chaque feuille a une gaine de la feuille basale formant une partie du pseudotrunc, du pétiole et de la lame. La gaine est la partie économique, ce qui donne des fibres d'importance commerciale.



L'endurance et la force du pseudotronc dépendent du niveau de ploïdie de la plante, qui peut être diploïde, triploïde ou tétraploïde. Les triploïdes et les tétraploïdes en raison de leur niveau de plissement plus élevé tendent à être plus rigoureux et gigantesques, produisant ainsi plus de biomasse que les diploïdes fins et minces. La **Figure 1.4** présente la structure du bananier :



*Figure 0-16 : Pseudo tronc /Rejets [17].*

Le bananier est composé :

- D'une tige souterraine encore appelée bulbe, souche ou rhizome est le centre vital du bananier, lieu de formation des racines, des feuilles et de l'inflorescence. Ce bulbe porte sur son pourtour latéral des œilletons qui se développent en rejets. Il émet en outre jusqu'à la floraison un grand nombre de racines qui restent le plus souvent groupées dans la couche des 30 cm superficiels du sol ;
- Des feuilles : au sommet de chaque gaine se développe le pétiole qui se prolonge par la nervure centrale et supporte le limbe, l'enroulement des gaines, les unes dans les autres, forme le pseudo-tronc ;
- D'une inflorescence appelée régime : quand le bananier a formé un certain nombre de feuilles, le bourgeon terminal du bulbe se développe. Il monte dans le faux-tronc et

donne l'inflorescence qui sort au centre du bouquet foliaire et se retourne vers le bas. C'est la formation du régime, ce régime allonge son axe ou hampe, il se compose des fleurs femelles, groupées en mains composées de doigts ou bananes, qui donneront les fruits et des fleurs mâles groupées dans le bourgeon mâle.

### 1.1.9.3. Production mondiale de la banane [17].

La banane est le 4ème produit alimentaire le plus important dans les pays en voie de développement après le riz, le blé et le maïs en termes de production. C'est de plus l'un des fruits les plus consommés dans le monde. Une comparaison en ce qui concerne la superficie cultivée, la production et la productivité des fruits majeurs poussés en Inde (**Tableau 1.5**) montre même que la mangue est cultivée sous une large superficie, mais par production et par productivité, la banane tend à être la meilleure récolte des fruits.

*Tableau 0-8 : Superficie de la récolte, la production et la productivité des fruits majeurs en Inde (1999 – 2000).*

Récolte	Superficie (ha)	Production (mT)	Productivité (mT / ha)
Pomme	238,3	1047,4	4,4
<b>Banane</b>	<b>490,7</b>	<b>16813,5</b>	<b>34,3</b>
Citron	526,9	4650,6	8,8
Raisin	44,3	1137,8	25,7
Goyave	150,9	1170,5	11,3
Litchi	56,4	433,2	7,7
Mangue	1486,9	10500,5	7,4
Papaye	60,5	1666,2	27,5
Ananas	75,5	1025,4	13,6
Saputa	64,4	8003	12,4
Autres	601,6	5707,6	-
<b>Total</b>	<b>3796,8</b>	<b>45496,0</b>	<b>120</b>

Ces différents fruits sont donc cultivés sur une superficie totale de **3796,8 ha** et la production totale est de **45496,0 mT**.

En ce qui concerne le Cameroun, une évolution de la production et des superficies cultivées est présentée dans le **Tableau 1.9**.

**Tableau 0-9 : Productions et superficies cultivées du bananier au CAMEROUN selon l'Annuaire statistique du Cameroun [18].**

Années	Banane douce (dessert)		Banane – plantain	
	Production (tonnes)	Aires cultivées (hectares)	Production (tonnes)	Aires cultivées (hectares)
2001	645 746	75145	1 199 820	225 712
2002	692 886	77399	1 237 014	232 483
2003	743 466	79721	1 275 362	239 458
2004	797 739	82113	1 314 898	246 642
2005	929 950	96612	2 012 548	252 453
2006	929 967	98336	2 175 434	272 406
2007	1 024 004	60236	2 338 036	193 836
2008	1 078 041	63414	2 500 639	208 387

Nous observons une évolution forte des superficies et de la production entre 2001 et 2008.

Les bananes et les plantains sont cultivés dans environ 120 pays dans les régions tropicales et subtropicales dans le monde. Ils poussent sur une superficie d'environ 10 millions d'hectares avec une production annuelle d'environ 88 millions de tonnes. Approximativement 1/3 est produit dans des régions suivantes : Afrique, Asie, Pacifique, Amérique Latine et Caraïbes. Ces 5 régions productrices de la banane comptent 44% de production totale.

#### 1.1.9.4 Usage du bananier et ses différentes parties

Les fibres de bananier sont employées notamment comme produits de rembourrage, de renfort ou d'isolation, comme éléments de construction et pour la fabrication de produits jetables ou durables, par exemple :

- Fils et textiles ;
- Emballages, paniers, poufs, ornements ;
- Cordages, ficelles et filets ;
- Textiles non tissés, papiers ménagers ;
- Produits en papier et carton ;
- Matériaux de construction, panneaux de fibres, fibres d'isolation, géotextiles ;
- Matériaux composites et pièces pour véhicules automobiles...



Les différents produits présentés ci-dessous proviennent du pseudo-tronc de bananier, particulièrement du type abaca.



Panier



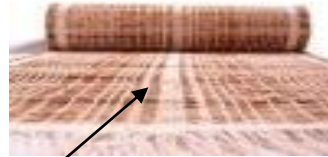
Sac



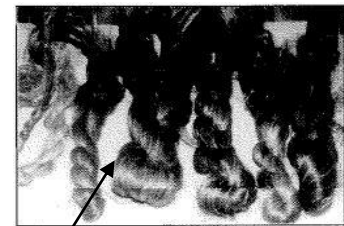
Pouf



Fil



Tapis



Mèche

*Photo 0-17 : Objets réalisés à partir des fibres de bananier [19]*

## 1.2. GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

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

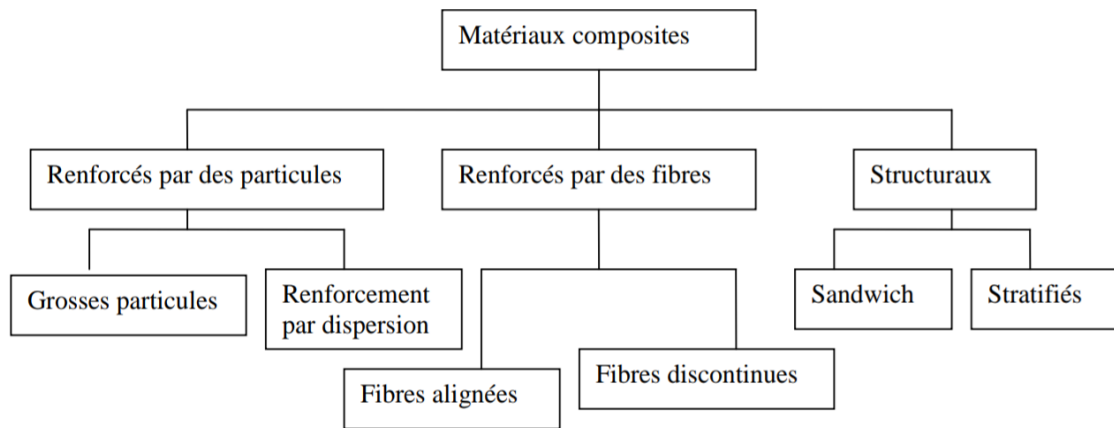


Figure 1.18: Classification schématique des différents types de composites [24]

### 1.2.1. Types de matériaux composites

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériau composite que l'on classe généralement en trois grandes familles et en fonction de la matrice [25]:

- Les composites à matrice organique (CMO) qui constituent de loin les volumes de production les plus importants à l'échelle industrielle ;
- Les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial.
- Les composites à matrice métallique (CMM) qui ont quelques applications spécialisées.

On distingue aussi les composites naturels parmi lesquelles :

- Les bois qui est un composite à base d'une matrice en lignine et de renforts en fibres de cellulose ;
- L'os qui est un composite à base de matrice en collagène et de renfort en apatite, la dent en est une belle illustration [25]

Les composites trouvent leurs principales applications dans les transports aérien (civil et militaire), maritime et ferroviaire, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs ; grâce à leurs bonnes tenues mécaniques comparables aux matériaux homogènes comme l'acier et leur faible masse volumique [26].

### 1.2.2. Matrices des matériaux composites

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure

aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes [10]. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure 1.1.

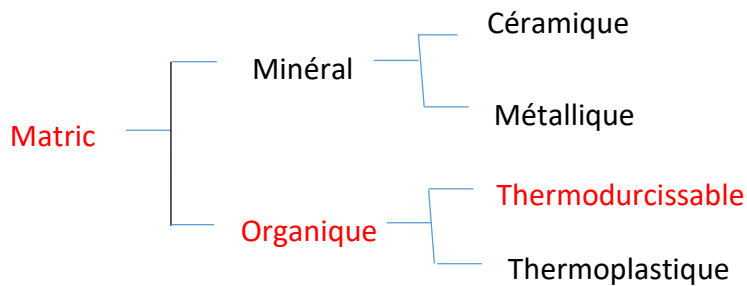


Figure 1-19 : Types de matrice

### 1.2.3. Architecture des renforts des matériaux composites

#### 1.2.3.1. Matrice des composites

Les fibres naturelles comme éléments de renfort dans les matériaux composites ont fait l'objet de nombreuses études durant les dernières décennies. L'automobile est un exemple de secteur qui utilise des fibres cellulosiques notamment dans les panneaux de porte, les dossiers de sièges, les tableaux de bord et les pièces intérieures. Ces renforts constituent une alternative aux fibres synthétiques. Ces dernières dures et rigides, en particulier les fibres de verre sont abrasives et présentent des dangers potentiels pour la santé notamment par les particules qu'elles génèrent pendant l'usinage. En contrepartie, les fibres de cellulose sont des renforts qui permettent :

- (i) d'abaisser le coût du composite,
- (ii) d'obtenir des matériaux avec de bonnes propriétés mécaniques,
- (iii) d'éviter les problèmes potentiellement causés par les fibres minérales.

Les matrices communément utilisées dans l'élaboration de composites à base de fibres naturelles vont des thermoplastiques, tels le polypropylène et le polyéthylène [47] aux thermodurcissables tels que certain polyester [48]. Elles ont pour rôle de lier les fibres de renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.

#### a) Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556 [9]. Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.

Tableau 1. 10 : caractéristiques de quelques résines thermodurcissables [19]

Résine thermodurcissable	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	G(MPa)	$\nu$	$\sigma$ (MPa)	A(%)
<b>Mélanie urée formaldéhyde</b>	1330	16,1	-	-	50	0,8
<b>Epoxyde</b>	1200	4500	1600	0,4	130	2 (100°) ; 6 (200°)
<b>Phénolique</b>	1300	3000	1100	0,4	70	
<b>Polyester</b>	1200	2000 à 4000	1400	0,4	80	2,5
<b>Polycarbonate</b>	1200	2400			60	

### b) Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.





**Tableau 1.11 : Caractéristiques de quelques Résine thermoplastiques [19]**

Résines thermoplastiques	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\sigma$ (MPa)	A(%)
Polypropylène "PP"	900	1200	30	20 à 40
Polysulfure de phénylène "PPS"	1300	4000	65	100
Polyamide "Pa"	1100	2000	70	200
Polyéther sulfone "Pes"	1350	3000	85	60
Polyéther imide "Pei"	1250	3500	105	60
Polyéther-éther-céton "Peek"	1300	400	90	50

#### 1.2.3.2. Additifs

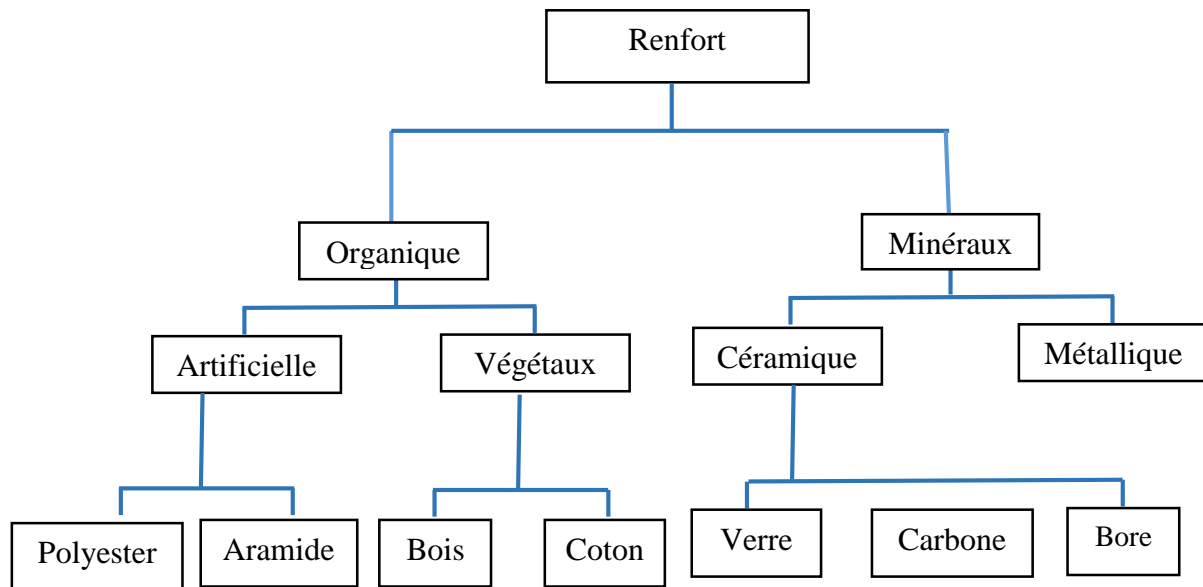
Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (Charges renforçantes, ex : charges sphériques creuses 5 à 150 $\mu$ m). Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites.

#### 1.2.3.3. Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).







*Figure 1. 20 : Classification des renforts courants*

#### a) Influence du taux de renfort

L'augmentation du pourcentage de renforts améliore quasi systématiquement la rigidité d'un composite. Cependant, une trop grande quantité de renforts implique une adhésion plus difficile qui conduit à une baisse de performances dans certains cas. D'après la littérature, il est assez peu fréquent de trouver des composites fabriqués qui contiennent un pourcentage de fibres supérieur à 50-60%, sans rencontrer de nombreuses difficultés lors du moulage. Klason et al [55] ont observé, qu'à partir d'un taux de 50% en fibres, le matériau devient rugueux et la surface présente des ruptures. L'augmentation de la proportion de fibres lignocellulosiques a aussi pour conséquence directe, la multiplication des problèmes liés à l'usage d'un matériau biologique hygroscopique et putrescible.

#### b) Influence de la morphologie du renfort

La taille de l'élément renforçant a naturellement une influence sur le procédé de fabrication mais aussi sur les propriétés mécaniques du composite. Le facteur de forme (L/d) est le paramètre le plus important. Des études consacrées à la comparaison entre des farines, des particules et des fibres ont montré que pour des facteurs de forme faibles (<10), les renforts se comportent comme des charges, alors que dans le cas contraire, les renforts confèrent des caractéristiques mécaniques améliorées. S'agissant des effets de la taille des particules de farine de bois, **Shaler et al** ont observé une meilleure résistance à la propagation de fissures pour de plus grandes particules alors que dans le même temps, il y avait une diminution de la résistance

à l'amorçage de fissures (la concentration des contraintes est plus importante). Dans une autre étude, Stark et **Sanadi** ont abouti à la conclusion que c'est bien le facteur de forme qui est le paramètre prépondérant qui influence les propriétés mécaniques. Ces résultats sont la suite des travaux de **Sanadi et al** où l'on distingue les particules, qui améliorent la rigidité, des fibres, qui améliorent la résistance mécanique.

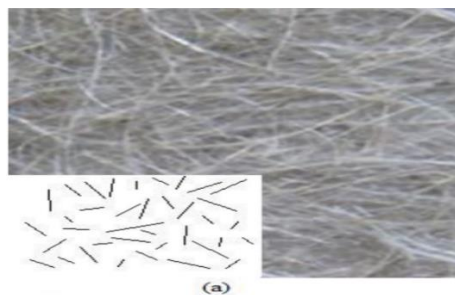
### c) Influence de l'orientation et de la dispersion du renfort

Il est évident que la dispersion du renfort qui conduit à un mélange plus ou moins intime des composants est un paramètre qui influence les propriétés physico-mécaniques du composite. En effet les particules ou renforts ont tendance à se regrouper et à s'agglomérer ce qui crée des défauts. L'orientation des fibres génère une anisotropie, qui détermine des axes forts, pour le matériau, selon lesquels les fibres seront sollicitées longitudinalement (direction la plus résistante de la fibre). **Klason et al** ont étudié à l'aide de deux extrudeuses le rôle de la dispersion des renforts (farines, fibres). Les deux types de mélanges ont été réalisés afin de déterminer l'importance du ratio géométrique et de l'homogénéisation du mélange. Les résultats montrent que l'amélioration du processus de mélange permet une augmentation du module d'élasticité et de l'élongation à la rupture supérieure à 10%.

L'agencement des mèches pour former un renfort n'est pas unique. On distingue plusieurs classes de renforts :

- ✓ Les mats (*Figure 1-22-a*) sont des renforts qui résultent d'un enchevêtrement aléatoire de fibres continues ou discontinues dans le plan, maintenues les unes aux autres par ensilage. Cette absence d'orientation conduit à un comportement mécanique isotrope.

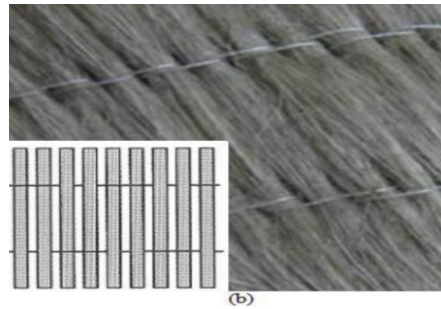
*Ce qui est le cas dans notre étude*



*Figure 1-21 –a*

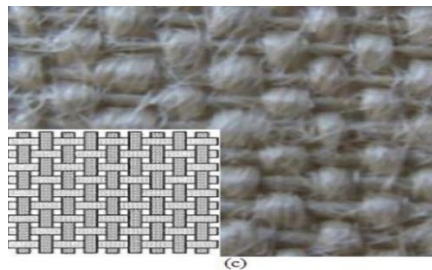
- ✓ Les renforts 1D (unidirectionnels dits UD) (*Figure 1-22-b*) : Les mèches sont orientées dans une seule direction et maintenues par des mèches de faibles sections. Les

propriétés mécaniques du composite sont fortement dépendantes de cette orientation et L'effet d'ondulation est grandement réduit.



*Figure 1-21-b*

- ✓ Les Non-Crimp Fabrics (NCF) sont un assemblage par fils de couture de nappes D'unidirectionnels, orientées différemment les unes par rapport aux autres. Ce type D'architecture ne présente aucune ondulation, le rendant très rigide en traction dans les directions des nappes.



*Figure 1-21 -c*

- ✓ Les renforts 2D sont des renforts qui résultent de l'entrelacement de mèches (chaîne et trame) pour former une surface à deux directions. On distingue les structures tressées, tissées et tricotées (*Figure 1-22-c et d*).



*Figure 1-21-d*

- ✓ Les renforts 3D : On parle de renforts 3D (*Figure 1-22-e*) lorsqu'on intègre des mèches dans la direction verticale (ou épaisseur) des renforts 2D, assurant la résistance dans les trois directions. De même que pour les renforts 2D, on retrouve des structures tressées, tricotées, tissées mais également cousues.

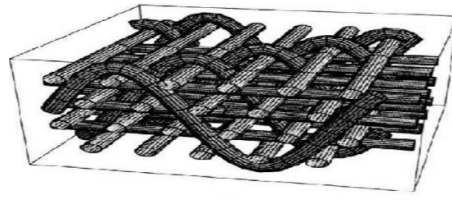


Figure 1-21-e

#### 1.2.4. Caractéristiques mécaniques de quelques composites de fibres végétales

Le tableau suivant présente les caractéristiques de quelques composites à matrice naturelles (tanin naturel), et LDPE

Tableau 1-12 : caractéristiques de quelques composites de fibres végétales

Matériaux	E(Mpa)		$\sigma$ (Mpa)		$\varepsilon$ (%)	densité	Reference
	Flexion	traction	flexion	traction			
Kéna /tanin	6665	4760	98.8	45.59	2.1	1.22	KEUNY.[54]
Chanvre/tanin	5051	4011	62.4	30.13	2.8	1.03	KEUNY.[54]
Lin/tanin	6006	4737	68.5	39.10	2.38	0.95	KEUNY.[54]
Banane/Epoxy	1850	1900	70	45	-	-	Maleque.[59]

#### 1.2.5. Mise en forme des matériaux composites renforcés par les fibres végétales

La réalisation d'une pièce en matériaux composites diffère notablement de celle utilisant des matériaux plus classiques tels que les métaux ou les polymères massifs. Le matériau final et la géométrie de la pièce sont souvent obtenus simultanément et les propriétés et qualités de la structure composite finale dépendent à la fois des composants (fibres et matrice) et de la façon dont ils ont été mis en œuvre. Les procédés de fabrication des composites sont généralement du type formage. Ils sont spécifiques car ils utilisent l'absence de matrice (ou son état non durcie) pour permettre des déformations des renforts continus rendues possibles par leur nature fibreuse.

En conséquence, ces mécanismes particuliers, qui s'appuient sur la mécanique des milieux fibreux, en général tissés, demandent des analyses et des modèles spécifiques,

et notamment le développement d'outils de simulation de la mise en forme propres aux matériaux composites [5].

En général l'élaboration des composites nécessite toute une série de procédure suivant un ordre bien précis tel que : [6]

**a) L'extraction des fibres**

Avant d'être utilisé, les fibres doivent subir une série de traitements soit chimiques, biologique ou mécanique

**b) La préparation des mats**

La préparation des mats consiste ; au découpage des fibres, le traitement alcalin des fibres, le broyage, le tamisage, le saupoudrage des renforts, la pulvérisation du liant, le séchage du mat, la séparation du mat du papier non adhésif.

**c) La mise au point par moulage**

On dépose une couche de vaseline pour lubrifier le moule et faciliter le démoulage. Le composite est obtenu par empilement successif des mats des fibres et de couches de résines polyester catalysée et durcie jusqu'à l'obtention de l'épaisseur souhaité

**1.2.4.1. Procédé de mise au point par moulages**

Parmi ces procédés de mise en œuvre par moulage, on distingue :

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

Pour la fabrication des composites, il existe plusieurs méthodes. On en présente ici quelques-unes avec leurs principes, tirées de [26, 27,28] Ces méthodes sont généralement faciles à exécuter et demandent un coût d'investissement faible en matériels.

**1.2.4.1.1. Moulage au contact**

C'est la méthode la plus simple qui demande le moins d'équipements. On utilise des moules en bois vernis, en métal, etc., sur lesquels on dépose successivement : un agent de démoulage, une



couche de surface (optionnelle) et des couches successives de renforts imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant à l'ambiante.

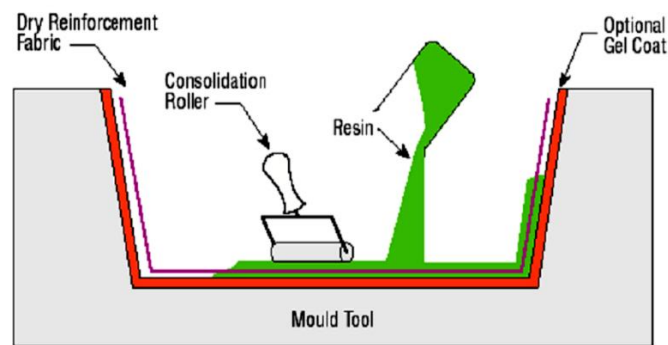


Figure 1-22 : Moulage au contact [27]

#### 1.2.4.1.2. Moulage par projection

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

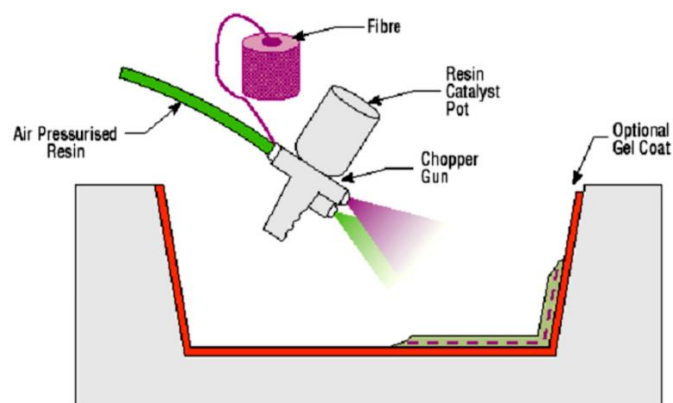


Figure 1-23 : Méthode de projection simultanée [27]

#### 1.2.4.1.3. Moulage par thermo compression

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

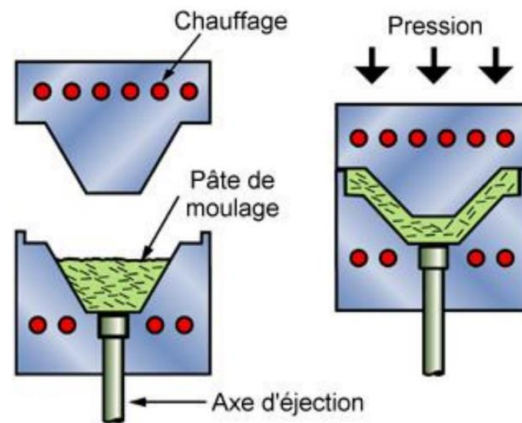


Figure 1-24 : Méthode de moulage par compression [28]

#### 1.2.4.1.4. Moulage sous vide

Les renforts fibreux sont placés à sec sur un film démoulant qui épouse les formes du moule. Une membrane souple joue le rôle de contre-moule et assure l'étanchéité. Le vide créé permet à la résine de se diffuser dans les renforts fibreux et cavités. Cette méthode pourrait être combinée avec un système de chauffage qui servirait à polymériser la résine. Aux conditions ambiantes, la pression qui fait couler la résine est égale à la pression atmosphérique de 1 atm.

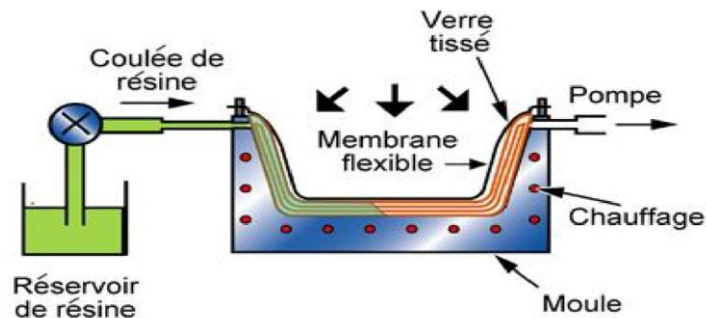


Figure 1-25 : Méthode du moulage sous vide [28]

#### 1.2.4.1.5. Moulage par transfert de résine (RTM- Resin Transfert Molding)

Le moulage par transfert de résine consiste à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation des résines est réalisée par le vide ou par l'injection de la résine. Cette méthode permet d'atteindre des taux volumiques élevés des fibres, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes complexes.



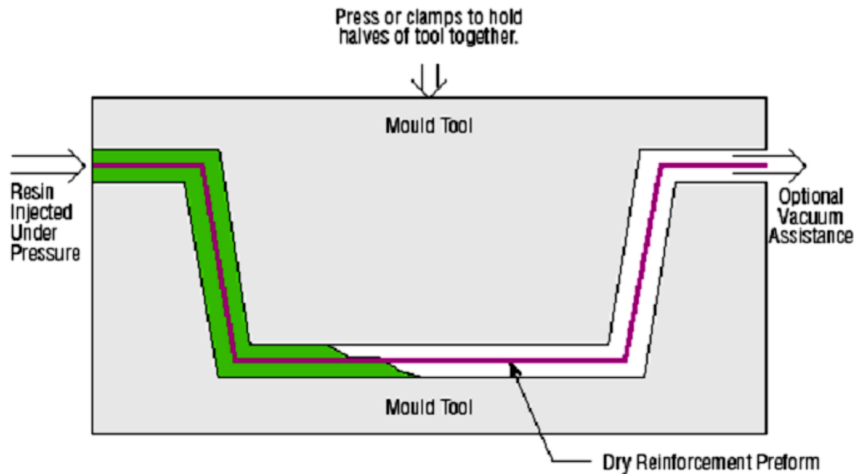


Figure 1-26 : Principe du moulage par injection de résine [27]

L'utilisation d'un dispositif de mélange thermocinétique permet de réaliser un mélange homogène à haute température. Une fois celui-ci réalisé, il est possible de fabriquer le produit par thermoformage (moulage sous compression/injection/extrusion). Il est important de noter que les paramètres de fabrication comme la vitesse de rotation du mélangeur, la température, le temps, l'humidité influencent les propriétés du composite produit.

L'extrusion d'un mélange de fibres cellulosiques et d'un thermoplastique est une technique qui permet la réalisation complète du composite. Les fibres sont incorporées au thermoplastique fondu à l'aide d'un système de vis. L'ensemble ressort de l'extrudeuse sous la forme d'un profilé. L'injection ou procédé RTM « Resin Transfer Moulding » est une autre façon de produire des composites. Le fait qu'il soit question d'un moulage nécessite l'utilisation de fibres plus longues et généralement implique que la matrice soit de nature thermodurcissable.

### 1.3. Conclusion

Parvenue au terme de ce chapitre, il était question pour nous de parcourir sur un bon nombre de points, les littératures sur les composites de fibres végétales. De ce fait nous avons retenu le rouissage comme méthode d'extraction de nos fibres, le mercerisage comme traitement des fibres et la thermo compression pour la mise en forme du composite. Dans le prochain chapitre, nous exposerons les démarches suivies et les matériels utilisés pour l'élaboration et la caractérisation de notre composite.



# Chapitre 2

## CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTODES

### *Description*

Dans ce second chapitre, nous présenterons la description physiologique du pseudo-tronc du bananier, le matériel et méthodes utilisés pour l'extraction et la caractérisation du tanin et des fibres de pseudo-troncs de bananier, le matériel et méthodes utilisés pour l'élaboration et caractérisations des panneaux de fibres, et nous expliquerons le protocole suivi pour les parties expérimentales.

### *Aperçu*

- 2.1. Méthodes expérimentales de sélection d'échantillon
- 2.2. Extraction des fibres du pseudo-troncs de bananier
- 2.3. Traitement des fibres du pseudo-troncs de bananier
- 2.4. Élaboration de la résine
- 2.5. Élaboration du composite
- 2.6. Caractérisation du matériau composite
- 2.7. Conclusion

## 2.1. METHODES EXPERIMENTALES DE SELECTION D'ECHANTILLON

### 2.1.1. Site de collecte

Nous présentons les zones de prélèvement des échantillons de pseudo-troncs de bananier :

#### 1. Institut(s) collecteur(s)

- i. Institut : ENSPY-LMS (Laboratoire de Mécanique et Solides)
- ii. Personnes ayant participé à la collecte de l'échantillon : Cultivateurs et nous (M. NOUBOU, CHENGOUE)

#### 2. Période de collecte de l'échantillon original : Octobre 2020

#### 3. Pays de collecte : Cameroun

#### 4. Région : LITTORAL

#### 5. Département : MOUNGO

#### 6. Localisation du site de collecte : Penja

#### 7. Source de la collecte : PHP

#### 8. Type d'échantillon : Pseudo - troncs de bananier

#### 9. Nombre de plantes échantillonnées : 115

#### 10. Densité de la population de plantes : forte

#### 11. Photographie : oui

#### 12. Notes du collecteur : échantillons primaires

### 2.1.2. Phase préparatoire

#### 2.1.2.1. Phase primaire

Ces échantillons de dimension variable sont des espèces « GRANDE-NAINE » ramassés dans les champs où ils sont découpés et jetés par les cultivateurs après avoir enlevés les fruits, ensuite nous les sélectionnons et les acheminons au Laboratoire de Mécanique et de Solide (LMS) de Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé.



Echantillon pris  
dans la nature  
déjà en  
décomposition

*Photo 0-1 : Echantillon primaire du pseudo-tronc de bananier.[61]*

#### 2.1.2.2. Phase secondaire

Après la collecte des pseudo-troncs de bananier, nous passons au découpage et nous obtenons les échantillons secondaires comme présentés à la **photo 2.2** ci-dessous, qui permettent de déterminer les différentes dimensions du pseudo-tronc.



Echantillon à l'état naturel



Echantillon débarrassé des  
feuilles mortes

*Photo 0-2 : Echantillon secondaire du pseudo tronc de bananier[61]*



Décortilage du pseudo  
tronc de bananier

*Photo 2-3 : Décortilage du pseudo-troncs de bananier[61]*

Les fibres ont été localisées sur le pseudo tronc suivant leur position longitudinale dans la section droite comme l'indique la **photo 2-4**.

On supposera que le pseudo tronc a une section droite plus ou moins circulaire.

Diamètre du pseudo-troncs



*Photo 0-4 : Section droite du pseudo-tronc de bananier [61]*

La **photo 2-5** ci-dessous présente une section centrale ou moelle du pseudo tronc, elle permet de constater l'aspect cassant et l'immaturité de cette zone.



*Photo 0-5 : Section centrale du pseudo-tronc de bananier [61]*

## 2.2. EXTRACTION DES FIBRES DU PSEUDO-TRONC DE BANANIER

### 2.2.1 Matériels utilisés

La matière d'œuvre utiliser pour l'extraction des fibres provient de la région du Littorale département du Mounjo arrondissement de Njombé-penja. Une fois les pseudo-troncs abattus, ils sont décollés et séparés de la moelle, puis séchés et mis dans des sacs pour faciliter le transport.





*Photo 2-6 : a) pseudo-troncs ; b) feuilles du pseudo-troncs décortiquées séchées et prêt à l'utilisation*

Les matériels de laboratoire suivant nous ont permis d'extraire les fibres de pseudo-troncs de bananier



*Photo 2.7 : matériels utilisé pour l'extraction des fibres du pseudo-tronc de bananier ; a) Bassine avec de l'eau, b) Couteau, c) Machette, d) Paire de gants, e) cache nez*



### 2.2.2. Procédé d'extraction des fibres de pseudo-troncs de bananier

En général, il existe plusieurs techniques d'extraction des fibres végétales. Pour ce travail, nous avons utilisé comme méthode d'extraction le rouissage. Le processus d'extraction est condensé dans la tableau suivant :



### 2.2.2.1. Extraction après trempe dans l'eau froide

Tableau 0-1 : Gamme du génie de procédé d'extraction après trempe dans de l'eau froide. [61]

Procédé	N° de phase	Désignation des phases/opérations	Outils	Croquis / Photos illustrés	Observations
Extraction après trempe dans de l'eau froide	1	<b>Trempe</b> a) Plonger l'échantillon dans un récipient contenant de l'eau. b) Retirer l'échantillon de l'eau dès que l'échantillon est mou.	Récipient, eau, Mains.		-L'eau est à la température ambiante. -La durée de trempe est de 168 heures.
	2	<b>Extraction</b> c) Extraire les fibres.	Mains		-Les fibres sont faciles à séparer et s'obtiennent par unité ; -Elles sont lisses ; -Elimination de la cellulose autour des fibres ; -Section faible et presque constante ; -Les fibres périphériques sont extraites plus facilement.



ÉLABORATION ET CARACTERISATION D'UN MATERIAU  
COMPOSITE A BASE DE FIBRES DE PSEUDO-TRONCS DE  
BANANIER

	3	<p><b>Lavage</b></p> <p>d) Laver les fibres dans de l'eau.</p>	Récipient, eau, mains.		<p>-Les fibres sont douces ;</p> <p>-Les fibres périphériques sont plus rigides.</p>
	4	<p><b>Séchage</b></p> <p>e) Etaler les fibres sur une corde.</p> <p>f) Sécher les fibres au soleil.</p>	Mains, corde		<p>Les fibres doivent être séchées à 37°C isolement.</p>
	5	<p><b>Conditionnement et étiquetage</b></p> <p>g) Introduire les échantillons séchés au soleil dans un plastique de conditionnement et les étiqueter.</p>	Main, bande adhésive, marqueur, plastique.		<p>Mettre le nom de la zone d'extraction sur la bande adhésive.</p>





## 2.3. TRAITEMENT DES FIBRES DU PSEUDO-TRONCS

### 2.3.1 Prétraitement des fibres à partie de la soude acoustique

Nous avons effectué un prétraitement à la soude selon la méthode décrite par Ganapthy et al, 2019 ceci dans le but de déterminer la meilleure concentration qui permettra le traitement des fibres sans dégradation de la cellulose. La **Figure 2-1** présente les différentes étapes avant et après le prétraitement. La soude (solide blanc) à 98 % de pureté fut utilisée pour ce travail. Elle a été fournie par ONYX Bricolage (France). 20g de fibres (séchées à 103°C) a été traité à différente concentration de 2.5%, 3%, 5% (v/v), dans une solution de soude pendant 24h à température ambiante de 28°C, pH basique (10 à 12,5). Après ce temps de traitement, Les fibres ont été retirées, pressées et lavées avec de l'eau distillé, puis avec une solution d'acide acétique (1%) jusqu'à pH neutre (7). Elles ont été ensuite séchées à l'étuve à 75°C pendant toute une nuit et pesées. Le taux d'extraction a été calculé suivant l'équation ci-dessous

$$t_e = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Où  $t_e$  est le taux d'extraction des fibres,  $m_i$  la masse initiale anhydre,  $m_f$  la masse après traitement



*Figure 2-1 : processus de traitement de fibres de pseudo-troncs de bananier*

#### 2.3.1. Traitement à 5% NaOH

Nous avons effectué un traitement à la soude selon la méthode décrite par Ganapthy et al, 2019 des fibres. La soude (solide blanc) à 99 % de pureté fut utilisée pour ce travail. Une quantité de fibres (séchées à 103°C) a été traité à 5% , dans une solution de soude pendant 24h à température ambiante de 28°C, pH basique (10 à 12,5). Après ce temps de traitement, Les fibres ont été retirées, pressées et lavées avec de l'eau distillé, puis avec une solution d'acide acétique

(1%) jusqu'à pH neutre (7). Elles ont été ensuite séchées à l'étuve à 75°C pendant toute une nuit. Comme illustrer au **Tableau 2-2** suivante :

### Détermination de la masse de soude en fonction du volume d'eau

- Données à prendre en compte :
  - Masse volumique de la soude  $\rho=2.1\text{g/cm}^3$
  - Volume d'eau initial  $V_e= 40000\text{ml}$
- Déterminons le volume de la soude ( $V_s$ ) à prélever sachant que la soude que nous utilisons est pur à 99%

$$V_S = \frac{V_e * 3}{99} \quad (2)$$







- Déterminer la masse du NaOH

Pour déterminer la masse de soude, nous utiliserons la formule :

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3)$$

$$m = \rho * v \quad (4)$$

*Tableau 2.2 : Récapitulatif du procédé de traitement des fibres du pseudo-tronc*

Etapes	Objectifs	Descriptifs	Illustrations
Formulation	Préparer la solution aqueuse	Remuer le mélange Eau + NaOH jusqu'à obtention d'un mélange homogène.	
Mise en solution	Extraire la cellulose	Mettre en solution les fibres de pseudo-troncs de bananier, remuer le mélange solution jusqu'à immersion totale des fibres.	
Maintien en solution	Délignifier	Laisser le mélange en solution pendant 24H	
Lavage	Séparer les fibres des extractives	Retirer les fibres de l'eau et le rincer à l'eau distillée jusqu'à stabiliser son PH à 7	 
Séchage	Obtenir les fibres sèches	Etaler les fibres sur une corde au soleil afin que l'eau s'égoutte jusqu'à séchage complet.	





## 2.4. ELABORATION DE LA RESINE

### 2.4.1. Formulations de la résine

#### - Matériel utilisé

Pour formuler notre résine, nous avons utilisé les matériels suivants :



*Photo 2-10 : Matériel utilisé pour formulation de la résine ; a) papier PH, b) Agitateur mécanique, c) balance de précision, d) Eau distillée, e) Hydroxyde de sodium, f) Tannin, g) Latex.*

#### - Procédé de formulation de la résine tanin + exsudat *Vachellia nilotica* + eau ± latex

Pour formuler notre résine, Une solution aqueuse contenant un % de tanin extrait sera mélangé avec un % d'eau et un % de durcisseur naturel en poudre (exsudat *V. nilotica*) seul ou avec % de Latex. Le pH du mélange a été ajusté à 12 en ajoutant du sodium solution d'hydroxyde (NaOH) à 33% de concentration. L'agitation a été maintenue pendant quelques minutes supplémentaires afin d'homogénéiser le mélange.

Pour notre étude, nous avons élaborer 4 formulations reparties comme suis :

- **Formulation 1** : 35% tannin + 15% Durcisseur naturel +50% d'eau
- **Formulation 2** : 35% tannin + 15% Durcisseur naturel + 5% de latex de NR + 45 % d'eau
- **Formulation 3** : 35% tannin + 15% Durcisseur naturel + 10% de latex de NR + 40 % d'eau
- **Formulation 4** : 35% tannin + 15% Durcisseur naturel + 15% de latex de NR + 35 % d'eau



*Photo 2-11 : formulation de résine*

#### 2.4.2. Détermination de l'extrait sec de la résine

- **Matériels utilisés :**
  - Balance de précision
  - Etuve
  - Coupelles
  - Dessiccateur
- **Mode opératoire :**

Le principe de la détermination de l'Extrait Sec consiste à placer 2 à 3 grammes du mélange collant dans une coupelle en aluminium de masse *M<sub>cv</sub>*. La coupelle est ensuite placée dans une étuve à  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 2 à 3 heures. A la sortie de l'étuve, le contenu de la coupelle est laissé à refroidissement dans un dessiccateur et l'ensemble coupelle plus produit résiduel est pesé.

L'Extrait Sec (ES) est défini en pourcentage selon la formule suivante :

$$ES(\%) = [(M_{pr} - M_{cv}) / M_{pi}] \times 100 \quad (5)$$

$M_{pr}$  = Masse coupelle + produit résiduel (g)  $M_{cv}$  = Masse de la coupelle vide (g) et  $M_{pi}$  = Masse du produit initial (g).

**NB :** prendre une résine déjà totalement prête (tanin + durcisseur et ou latex)



*Photos 2.11 : étuve du laboratoire de chimie organique de l'université de Yaoundé 1*

## 2.5. ELABORATION DU COMPOSITE

### 2.5.1. Détermination des quantités à mélanger

Le calcul de la masse des particules renseigne sur la quantité matière sèche à utiliser pour le formage de panneaux celui-ci tient en compte la dimension du moule, le taux d'encollage, l'extrait sec et la masse volumique théorique du panneau. Les équations (2.2) et (2.3) représentent respectivement la masse sèche du panneau et la masse sèche des particules (Njom et al. 2020).

- **Calcul de la masse du panneau  $M_p$  :**

C'est le volume du panneau  $\times$  la densité volumique du panneau choisie ( $M_p = V \cdot \rho$ )

On travaillera avec la densité théorique  $\rho = 1170 \text{ Kg/m}^3$ , pour une surface de  $300 \times 275 \text{ mm}^2$  et d'épaisseur 5mm.

Masse des fibres à peser :

$$M_p = V \cdot \rho \quad (6)$$

- **Calcul de la masse sèche des fibres  $M_{sf}$ .**

Elle est donnée par :

$M_p = \text{taux d'encollage} \times M_{sf} \times \text{l'extrait sec de la résine (ES)} + M_{sp}$

$M_p = 0,1 M_{sf} \times ES + M_p$

$$M_{sf} = \frac{M_{sp}}{1+0.1 \times ES} \quad (7)$$

- **Calcul de la quantité de résine par panneau :**

La quantité de résine par panneau de fibres est égale a 20% de la masse sèche des fibres

$$Mr = \frac{20 \times M_{sf}}{100} \quad (8)$$

### 2.5.2. Mélange résine + particule

Nous avons mélangé dans une bassine, les fibres avec la résine puis laisser reposer au moins pendant 15 à 20h (une nuit)



*Photo 2.12 : mélange*

Cet ensemble mélangé sera ensuite séchés à l'air pour atteindre un taux d'humidité d'équilibre d'environ 6 à 8 % (pendant une nuit au moins 15 à 20h). **Konai et al. 2016**



*Photo 2-13 : séchage*



### 2.5.3. Mise en forme par thermo compression

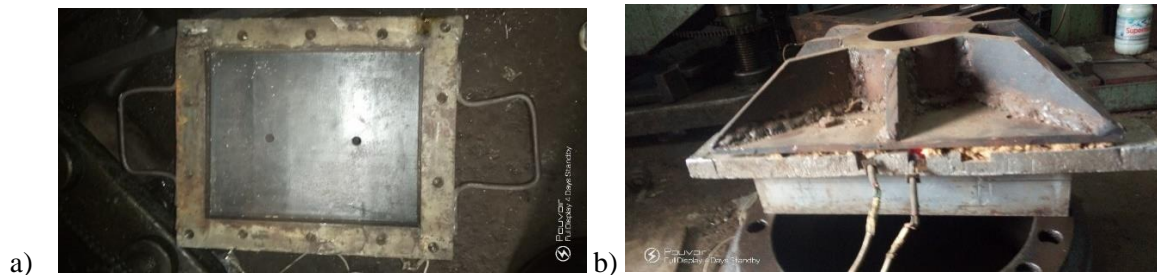
#### ✚ Matériel utilisé

Pour mettre en forme notre composite, nous avons utilisé

- Un moule thermique
- Une presse hydraulique
- Un thermo flache
- Du papier aluminium

#### ➤ Présentation du moule

Le moule utilisé aux dimensions respectives de 300 × 275 est fait en 2 compartiments tous équipé de résistance chauffante dont l'un sert de piston. Il peut chauffer jusqu'à une température supérieure de 400°C.



*Photo 2-14 : moule thermo compresseur : a) moule femelle ; b) moule male (piston)*

#### ✚ Méthodes utilisées

Pour l'élaboration de notre composite nous avons suivis une suite d'étapes entre autres :

- 1) Nous avons pris le soin de recouvrir le bas du moule avec du papier aluminium après avoir chauffé les deux parties du moule à température souhaitée ; ceci pour faciliter le démoulage



*Photo 2-15 : installation du papier aluminium*

- 2) Par la suite, nous avons versé le mélange dans le moule et s'assure que la répartition des fibres est uniforme dans le moule



*Photo 2-16 : mélange versé dans le moule*

- 3) Après avoir versé on recouvre la surface à nouveau du papier aluminium et ceci dans le même objectif d'éviter que la résine colle sur le moule et rend difficile le démoulage.



*Photo 2-17 : recouvrement avec le papier aluminium*

- 4) Le pressage a été effectué sur une presse hydraulique avec un moule chauffant à une température de 200°C, en utilisant des jauges de barres d'acier de 5 mm d'épaisseur. Le cycle consistait en une première étape de 6 min à une pression 25kg/cm<sup>2</sup> et la seconde de 4 min une dernière de 2min à 25kg/cm<sup>2</sup>.



*Photo 2.18 : ensemble en cours de pressage*

## 2.5.4. Découpage des panneaux

### 2.5.4.1. Préparation des éprouvettes

Une fois sortie de la presse, les panneaux de dimensions 300 x 275 x 5 mm, sont séchés à température ambiante, puis les bordures de 15mm sont retirées par sciage puis effectuer les découpes pour former les éprouvettes de caractérisations.



*Photos 2-19 : découpages des panneaux*

## 2.6. CARACTERISATION DU MATERIAU COMPOSITE

Pour cette partie du travail, nos éprouvettes ont été soumises à certains essais afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques.

### 2.6.1. Caractérisation physique

#### 2.6.1.1. Détermination de la densité apparente

La densité apparente ( $\rho$ ) de chaque famille de panneau sera évaluée à partir de huit éprouvettes (50 mm  $\times$  50 mm  $\times$  5 mm) selon le Brésil norme ABNT NBR 14810, qui correspond aussi à l'europpéen norme BS EN 323.21. Les mesures ont été effectuées par utilisant un pied à coulisse numérique avec une précision de 0.01 mm. Une balance avec une résolution de 0,01 g a été utilisée pour obtenir le poids de chaque échantillon.

#### ❖ Matériel utilisé

Les matériels utilisés dans la détermination de la masse volumique réelle sont constitués de :



*Photo 2-20 : matériel utilisé ; pied à coulisse numérique du laboratoire génie mécanique de  
ENSPY*

- Balance de précision au 100ième près ;

❖ **Mode opératoire**

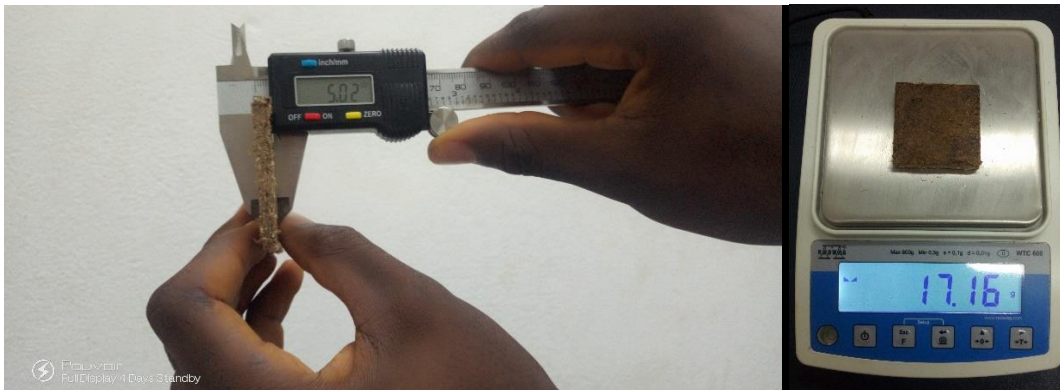
Pour le faire, nous avons procédé suivant les étapes ci-dessous :

- Peser les éprouvettes à l'aide de la balance de précision et relever leur masse  $m$  ;
- Mesurer en trois points les longueurs des éprouvettes à l'aide du Pc numérique et les relever leur moyenne  $Lg$  ;
- Mesurer en trois points les largeurs à l'aide du Pc et les relever leur moyenne  $L$  ;
- Mesurer en trois points les épaisseurs des éprouvettes et relever leurs moyennes  $e$  ;
- Calculer le volume des éprouvettes

$$V = Lg * L * e ; \quad (9)$$

- Déduire la valeur de la densité apparente par la formule :

$$d = \frac{m}{V} \quad (10)$$



*Photo 2.21 : prises des différentes mesures*



### 2.6.1.2. Taux d'humidité

#### ❖ Matériels utilisés

Ici nous avons comme matériels :

- Balance de précision de 0,1 mg ;
- Etuve à température maximal de 400°C ;



*Photo2-22 : Etuve du laboratoire chimie organique de de Université de Yaoundé 1*

#### ❖ Mode opératoire

La procédure pour la détermination du taux est la suivante :

- Peser les différents échantillons humides au préalable et relever leurs masses  **$m_i$**  ;
- Mettre ces échantillons pesés dans l'étuve ;
- Régler la température de fonctionnement de l'étuve à 105°C ;
- Patienter pendant 24h ;
- Retirer les échantillons du four et peser à nouveau leurs masses  **$m_f$**  ;
- Déterminer le taux d'humidité en utilisant la formule :

$$H(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad (11)$$

### 2.6.1.3. Taux d'absorption

Déterminer le taux d'humidité du composite permet de connaître la perte en masse subie par celles-ci après séchage dans un four à 100°C jusqu'à au poids constant. Quatre échantillons carrés de 50 mm de côtés ont été utilisés pour mesurer le taux d'absorption d'eau (TA) des panneaux agglomérés de fibres. Les échantillons ont été immergés dans l'eau à 25 °C pendant 24 h. TA sera déterminés selon la norme française **NF EN 317**. Pour cela, Chaque échantillon sera pesé avant et après immersion pour déterminer TA.

#### ➤ Matériels

- Balance de précision au 10000ieme ;
- Bocal en verre ;
- Eau
- Un dessiccateur



*Photo 2-23 : Dessiccateur du laboratoire chimie de l'université de yaoundé1*

#### ➤ Mode opératoire

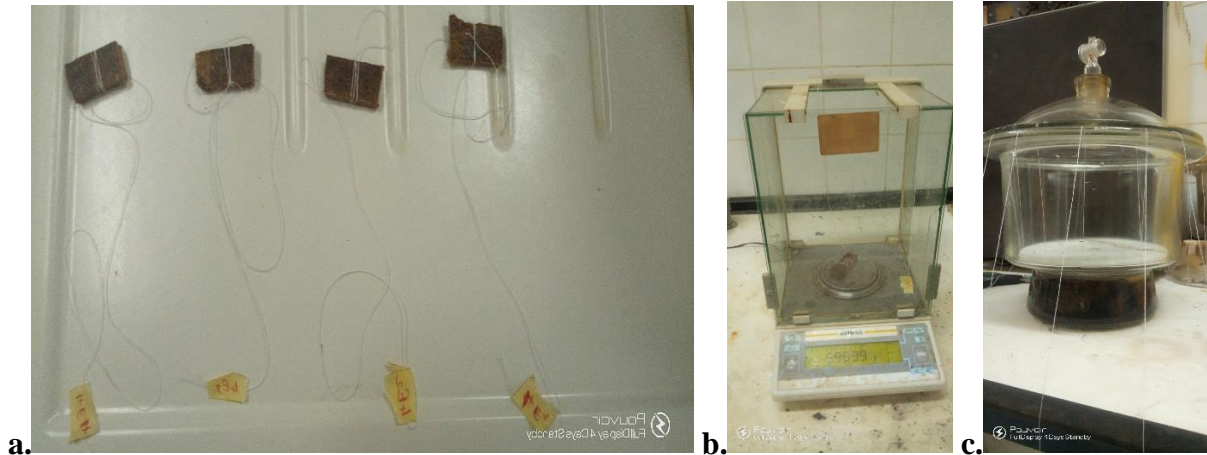
Pour la détermination du taux d'absorption nous avons procédé de la manière suivante :

- Peser les échantillons et relever leurs masses **m<sub>E0</sub>** ;
- Immerger les échantillons dans un dessiccateur contenant de l'eau distillé ;
- Laisser ces derniers tremper pendant 24h ;
- Ensuite les retirer de l'eau ;
- Peser à nouveau les échantillons de fibres et relever leurs masses **m<sub>f</sub>** ;
- Après les 24h, trois jours plus tard nous remarquons que la masse reste constante

- Déterminer le taux d'absorption par le calcul :

$$TA = \frac{mf-mi}{mi} \times 100 \quad (12)$$

**TA** : taux d'humidité, **mi** : masse initiale, **mf** : masse finale



*Photo 2-24 : déroulement de la manipulation au laboratoire chimie de Yaoundé 1 ;  
a) préparation des échantillons, b) pesage, c) mise en solution dans le dessiccateur*

#### 2.6.1.4. Cinétique d'absorption

Les essais de cinétique d'absorption sur les panneaux furent réalisés par le protocole décrit par Sellami, en 2015 pour évaluer certaine propriété propre voix le jugement des panneaux. Dans conditions normale de température et de pression (25°C et 1 atm), les panneaux préalablement nettoyées et séchées (anhydride) sont attachés à l'aide d'une file. Les essais d'absorption d'eau ont été déterminés en immergeant chaque panneau préalablement séchée et pesée (t =0). Plusieurs essais sont réalisés à de temps d'immersion définis. La surface de chaque essai est nettoyée afin de stabiliser la masse absorbée.

##### ➤ Matériels utilisés

- Une balance de précision à 0,0001g ;
- Etuve ;
- Eau distillée ;
- bols

##### ➤ Mode opératoire

- Sécher les échantillons dans une étuve à 100°C pendant 24h ;



- Nettoyer les bols
- Peser et relever la masse des échantillons  $M_i$  ;
- Tremper les échantillons dans les bols pendant une durée de 10min ;
- Les enlever à tour de rôle et peser tout en relevant à nouveau leurs masses  $M_f$  ;
- Remettre à nouveau les échantillons dans les bols pendant une nouvelle durer de 10min ;
- Puis retirer, peser et relever à nouveau la seconde masse ;
- Répéter le processus jusqu'à ce que la masse des échantillons après absorption devient constante après un temps écoulé ;
- Calculer la vitesse d'absorption (déterminer la quantité de masse d'eau absorber par seconde) par formule :

$$V = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (13)$$

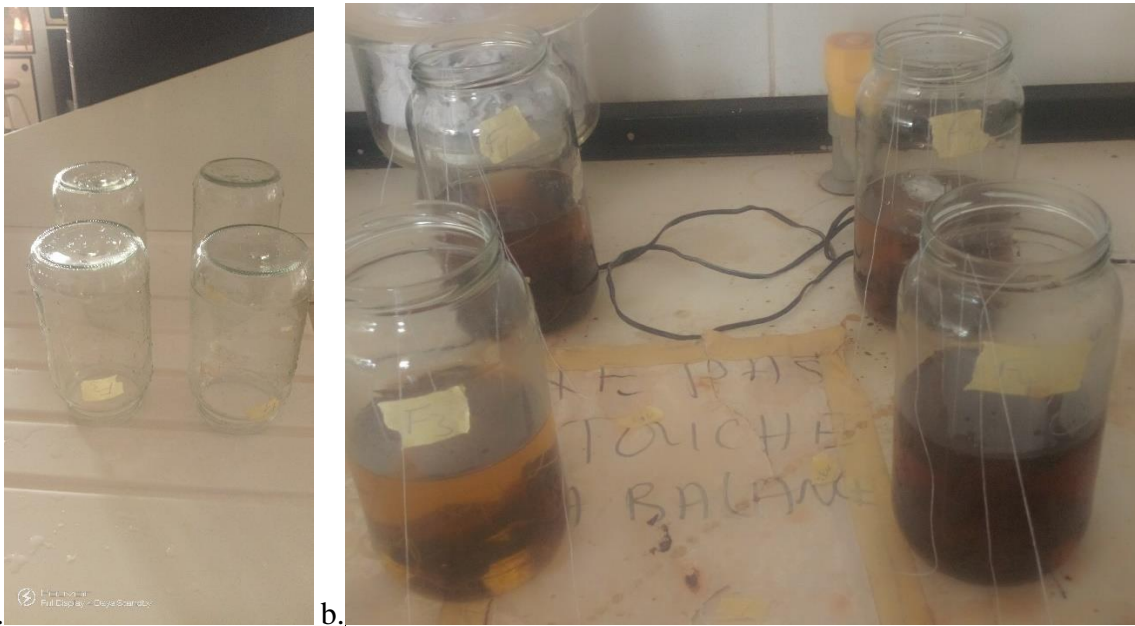


Photo 2-25 : manipulation ; a) rinçage des bols, b) mise en solution

## 2.6.2. Caractérisations mécaniques

### 2.6.2.1. Essais de flexion trois points

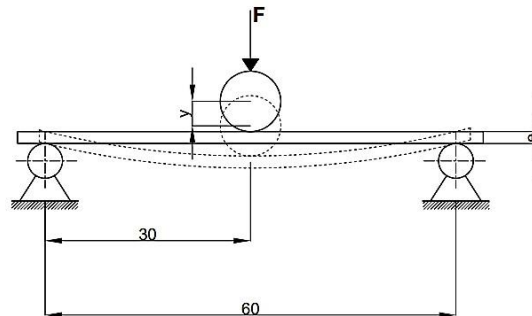
#### ➤ Méthode

Les propriétés mécaniques en flexion des panneaux agglomérés de fibres ont été mesurées selon la norme française **NF EN 310**. Les mesures seront menées selon la technique de la

flexion trois points en utilisant LDW-1 Electronic Universal Testing Machine. Durant l'essai de flexion, une cellule de force de 5KN, une vitesse d'essai de 2 mm/min et une distance entre les appuis de 130 mm seront utilisées. Les propriétés mesurées ici sont la force de rupture (F), la résistance à la flexion ( $\sigma_f$ ) et le module élastique en flexion ( $E_f$ ) seront évalués à partir de 5inq (05) éprouvettes de dimensions 150 x 20 x 5mm<sup>3</sup>.

➤ **Matériels utilisés**

- Un dynamomètre au 1000<sup>ième</sup> près ;
- Un pied à coulisse numérique ;
- Dispositif d'essai de flexion ;



*Figure 2-2 : schéma du principe de la flexion 3 points*

Comme propriété mécanique, nous avons :

Le module d'Young (E) donné par :

$$E = \frac{l^3 \times F}{48 \times I_{gz} \times Y} \quad (14)$$

Or  $\alpha = \frac{F}{Y}$  : pente de la droite qui donne la force en fonction du déplacement :

$$F(x) = \alpha x + b \quad (15)$$

Et IGZ : Moment d'inertie de l'éprouvette plane.  $I_{gz} = \frac{b h^3}{12}$  (16)

- La flèche maximale obtenue à la rupture de l'éprouvette :

$$Y_{max} = \frac{F \times l^3}{48 E L} \quad (17)$$

- La contrainte à la rupture en flexion ou module de rupture en flexion ( $\sigma_{max}$ ) :

$$\sigma_{max} = \frac{F \times l}{2 b h^3} \quad (18)$$

- la contrainte d'élasticité en flexion ou le module d'élasticité en flexion (E) :



$$E = \frac{F l^3}{4 b h^3 y} \quad (19)$$

Avec :  $F$  = force de rupture ;  $l$  = 60mm distance entre les deux points d'appuis ;  $b$  = largeur du composite ;  $h$  = e épaisseur du composite en mm ;  $y$  = flèche correspondante à  $F$  en millimètre

### 2.6.2.2. Essais de traction

#### ➤ Matériel utilisé :

- Un dispositif d'essais de traction
- Un dynamomètre
- Un pied à coulisse numérique

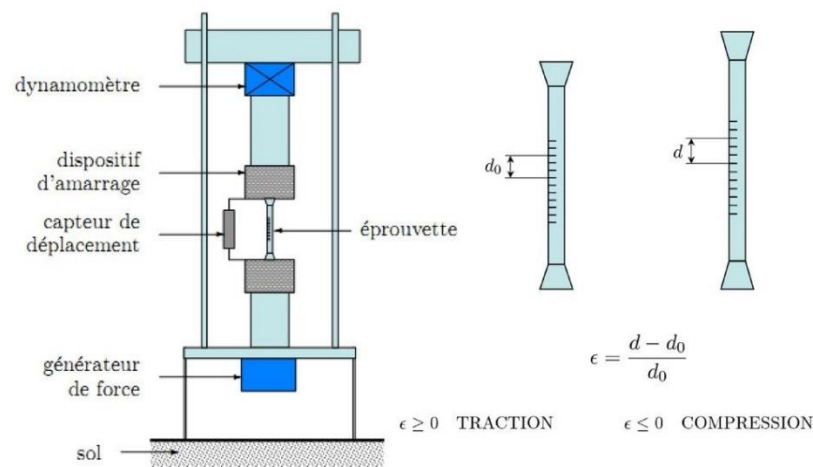


Figure 2-3 : dispositif du principe d'essais de traction

#### ➤ Méthodes

Les propriétés mécaniques en flexion des panneaux agglomérés de fibres ont été mesurées selon la norme **ISO 527-2**. Le principe de ces essais consiste à soumettre l'éprouvette à une force de traction à une vitesse constante jusqu'à rupture de l'éprouvette.

Ainsi on relève les différentes informations qui nous permettront de calculer les différents paramètres tels que :

- Le module d'Young
- La contrainte  $\sigma$  de traction

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (20)$$

- L'allongement à la rupture  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (21)$$

Avec :  $l$  = longueur finale,  $l_0$  = longueur initiale

## 2.7. CONCLUSION

Parvenu au terme de ce chapitre, il était question pour nous de décrire de façon brève les méthodes et matériels de travail utilisé pour le traitement des fibres, l'élaboration du matériau composite et la caractérisation de ces derniers ; il est à noter que, nous avons élaborer nôtres composite à partir de quatre formulations différentes. L'interprétation des résultats obtenus des différents essais fera l'objet du prochain chapitre.

# Chapitre 3

## *CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS*

---

### *Description*

---

**D**ans ce chapitre, Il est question de présenter les résultats, puis d'interpréter ces résultats et les comparais avec d'autres composites de la littérature.

### *Aperçu*

- 3.1. Etude des rendements des procédés d'extraction
- 3.2. Traitement des fibres du pseudo-troncs
- 3.3. Analyse de l'extrait sec de la résigne
- 3.4. Résultats de la thermo compression
- 3.5. Caractérisation du matériau composite

### 3.1. RENDEMENTS DU PROCEDE D'EXTRACTION

Ici le rendement correspond au rapport de la masse de fibres de pseudo-tronc de bananier obtenu après extraction sur la masse de l'échantillon initial (ou naturel).

*Tableau 3-1 : Récapitulatif d'extraction*

Procédés d'extraction	Solution de trempé	Durée de trempé	Température de la solution	Aspect des fibres	Rendement (%)
<b>Extraction au rouissage</b>	Eau	4 semaines	Température ambiante au mois de mars	Lisses Rigides Couleur : marronne	60 - 75



*Photo 3-1 : Fibres extraite du pseudo-tronc de bananier par la méthode de rouissage biologique*

Ce procédé d'extraction est non seulement très lent (temps d'extraction sept semaines), mais nous donne un bon résultat comparais aux autres méthodes d'extractions vue dans l'état de l'art. Les fibres obtenues par ce procédé présentent une couleur marron (Figure III.1) et de bel aspect. Cette expérience peut être réaliser à moindre coût.

### 3.2. TRAITEMENT DES FIBRES DU PSEUDO-TRONCS

#### 3.2.1 Prétraitements des fibres

La **Figure 3-1** ci – dessous présente les résultats d'extraction des fibres à différentes concentrations de soude (2,5%, 3%, 5%).

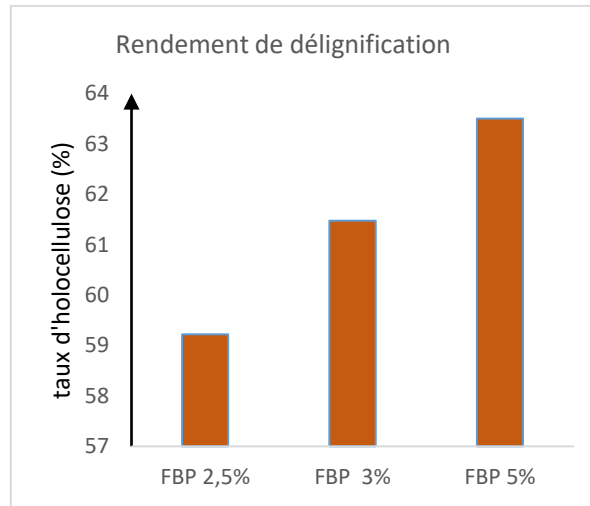


Figure3-1 : Fibres de FBP extrait à la soude

Il ressort de la figures 3-1 que le traitement à la soude réduit le poids de la matière brute lignocellulosique. Nous constatons que le taux d'holocellulose varie de 59 à 64% pour la fibre de FBP. Pour la fibre FBP, nous constatons que le rendement croit en fonction de la concentration en soude et le bon rendement est obtenu à 5% de soude. Cette différenciation est due à la quantité d'impureté et aux propriétés plus significatives des FBP. Ganapathya et al, 2019, ont montré que le traitement à 5% est meilleur que 3%.

### 3.3.2 Traitements des fibres

Ici le rendement correspond au rapport de la masse de fibres du pseudo-tronc de bananier obtenu après traitement sur la masse initiale.

Tableau 3-2 : Récapitulatif du traitement

Procédés	Solution	Durée de trempé	Température de la solution	Aspect des fibres	Rendement (%)
<b>Traitement Alcalin (mercerisage)</b>	5% NaOH	24 heures	Température ambiante	Lisses Très Rigides Couleur : marronne-grise	59,5 – 64,3





*Photo 3-2 : fibres traitées*

Le résultat de cette opération nous montre clairement la décoloration de la fibre : elle vire vers le blanc, ceci à cause de l'action de la soude qui élimine les extractives et la lignine (élément qui donne la coloration marronne à aux fibres).

### 3.3. RESULTATS DE L'ANALYSE DE L'EXTRAIT SEC DE LA RESIGNE

Le tableau 3-3 suivant présente les données de l'extrait sec de la résigne.

*Tableau 3-3 : relevé des données de l'extrait sec*

Formulation	échantillons	Mcv	Mpr	Mpi	ES(%)	moy ES (%)	variance	écartype
FORM1	F1E1	4,33	5,265	2,29	40,83	42,61	4,9034	2,2143
	F1E3	4,26	5,26	2,36	42,37			
	F1E2	4,11	5,23	2,51	44,62			
FORM2	F2E2	4,44	5,38	2,18	43,12	43,78		
	F2E1	4,27	5,31	2,37	43,88			
	F2E3	4,47	5,45	2,21	44,34			
FORM3	F3E1	4,25	5,53	3,03	42,24	44,07		
	F3E3	4,51	5,46	2,18	43,58			
	F3E2	4,4	5,81	3,04	46,38			
FORM4	F4E1	4,48	5,425	2,07	45,65	47,73		
	F4E2	4,39	5,755	2,94	46,43			
	F4E3	4,09	5,24	2,25	51,11			

La figure 3-2 suivante présente la variation de l'extrait sec en fonction de la formulation.

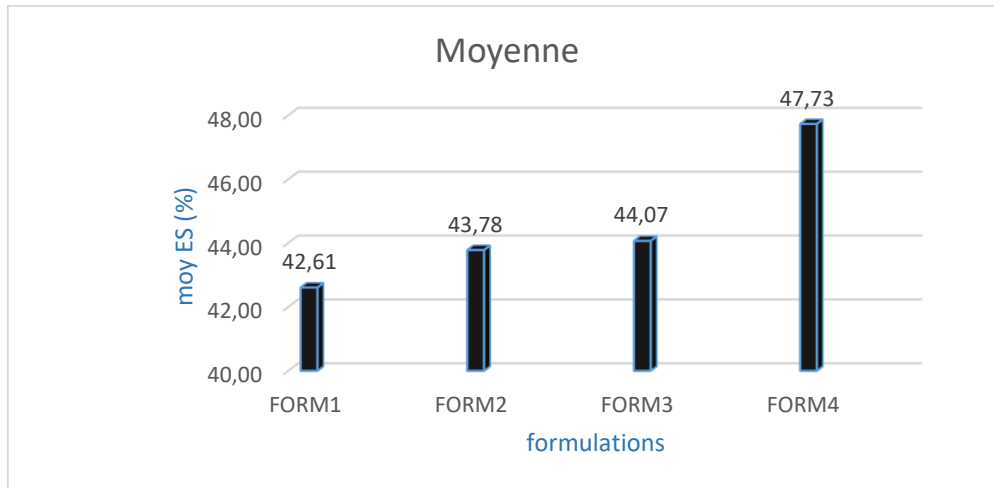


Figure 3-2 : Extraits secs

On remarque clairement une variation croissante d'ES en fonction des formulations ; plus le taux de latex est élevé, plus le % d'extrait sec est croissant. On note donc pour les formulations 1, 2, 3 et 4 une variation d'ES de **42.61%** à **47.73%** ; avec un **écart type = 2,21**. Donc la formulation 4 perd le moins sa masse après passage à l'étuve à 100°. Avec une moyenne d'extrait sec du composite **ES=44.54%**. En comparaison avec la résine de la littérature, notre résine *tanin + exsudat + latex* a un extrait sec plus considérable que la résine 100% *tanin* de Stéphanie Wieland (2007) avec **ES=40%**.

### 3.4. RESULTATS DE LA THERMO COMPRESSION

Après moulage nous obtenons le composite telle que la photo 3-3 nous le présente si bas.

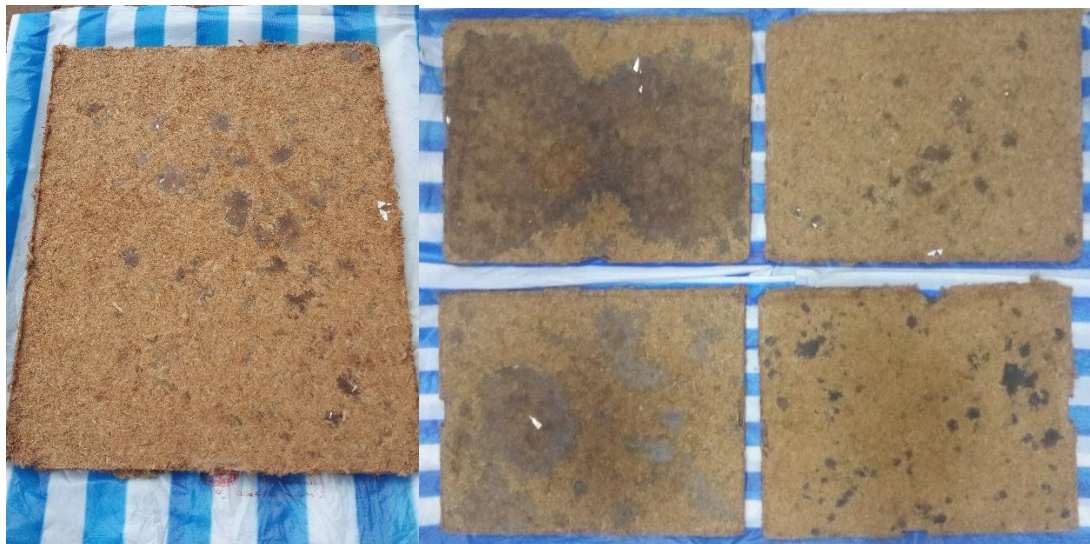


Photo 3-3 : Matériau composite obtenu après démoulage

### 3.5. PREPARATION DE L'EPROUVETTES

Les échantillons découpés suivant différente normes, en fonction des essais à réaliser sont regroupé par formulation telle présenté sur la photo 3-4 suivante ;



*Photo 3-4 : Echantillonnage*

### 3.6. CARACTERISATION DU MATERIAU COMPOSITE

#### 3.6.1. Caractérisation physique

##### 3.6.1.1. Résultats de l'analyse de la densité apparente

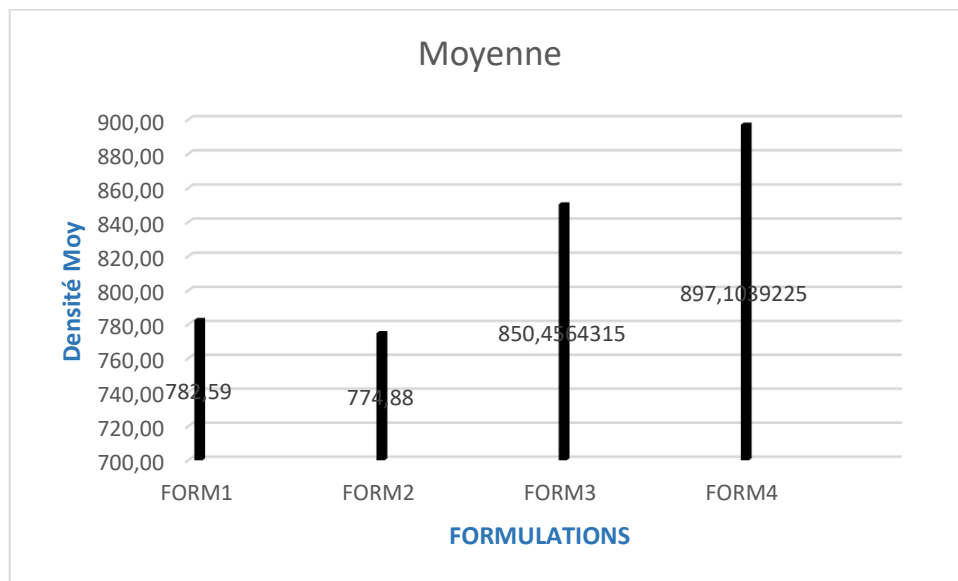
Le tableau 3-6 suivant récapitule les données de l'essais pour déterminer la densité apparente

*Tableau 3-4 : relevé des donnée de la densité apparente*

Formulation s	échelons	Ep	Lg	L	masse (g)	VI (mm3)	dté (kg/m3)	densité moy
<b>FORM1</b>	<b>F1E1</b>	5,38	49,2	49,34	10,38	13060,10	794,79	782,59
	<b>F1E2</b>	6,5	49,43	49,39	12,16	15868,76	766,29	
	<b>F1E3</b>	5,45	49,35	49,35	11,17	13273,05	841,55	
	<b>F1E4</b>	5,87	49,52	49,45	11,31	14374,24	786,82	
	<b>F1E5</b>	5,44	49,1	49,5	10,03	13221,65	758,60	
	<b>F1E6</b>	4,58	49,23	49,1	9,2	11070,74	831,02	
	<b>F1E7</b>	4,92	49,2	49,15	9,48	11897,45	796,81	
	<b>F1E8</b>	6,53	49,3	49,12	10,83	15813,15	684,87	
<b>FORM2</b>	<b>F2E1</b>	6,87	49,8	49,5	13,29	16935,24	784,75	774,88
	<b>F2E2</b>	7,2	49,6	50	13,58	17856,00	760,53	
	<b>F2E3</b>	7,28	49,7	49,73	14,34	17993,11	796,97	
	<b>F2E4</b>	7,89	49,79	49,8	15,66	19563,59	800,47	
	<b>F2E5</b>	6,92	49,75	49,7	12,91	17110,22	754,52	
	<b>F2E6</b>	7,27	49,6	49,52	13,59	17856,52	761,07	
	<b>F2E7</b>	7,25	49,4	49,9	13,11	17871,69	733,56	
	<b>F2E8</b>	7,95	49,89	49,51	15,85	19636,93	807,15	
<b>FORM3</b>	<b>F3E1</b>	8,3	49,65	49,55	17,01	20419,30	833,03	850,45
	<b>F3E2</b>	8,45	49,67	49,4	17,21	20733,74	830,04	
	<b>F3E3</b>	7,85	49,5	49,45	17,15	19215,03	892,53	
	<b>F3E4</b>	7,35	49,5	49,62	14,64	18052,99	810,94	
	<b>F3E5</b>	7,9	49,8	49,7	16,18	19552,97	827,49	
	<b>F3E6</b>	8,02	49,5	49,59	18,4	19686,73	934,63	
	<b>F3E7</b>	8,01	49,65	49,2	16,84	19566,66	860,64	
	<b>F3E8</b>	7,35	49,55	49,5	14,68	18027,52	814,31	
<b>FORM4</b>	<b>F4E1</b>	6,35	49,65	49,71	14,3	15672,44	912,42	897,10
	<b>F4E2</b>	6,55	49,35	49,45	14,55	15984,34	910,26	
	<b>F4E3</b>	5,87	49,3	49,7	13,47	14382,73	936,53	
	<b>F4E4</b>	6,05	49,65	49,5	13,69	14868,93	920,71	
	<b>F4E5</b>	5,3	49,6	49,55	11,83	13025,70	908,20	
	<b>F4E6</b>	5,8	49,62	49,5	11,49	14245,90	806,54	
	<b>F4E7</b>	5,1	49,8	49,75	11,12	12635,51	880,05	
	<b>F4E8</b>	5,5	49,62	49,8	12,26	13590,92	902,07	
<b>Variance</b>					3383,70			
<b>Ecartype</b>					58,17			
$\rho_{moy}(kg/m3)$					826.255			



Le diagramme de la *figure 3-6* suivante présente les moyennes des densités en fonction des différentes formulations.



*Figure 3-3 : variation de la densité*

On peut donc remarquer d'après le diagramme une bonne variation de la densité allant de **782.59 à 897.10 kg/m<sup>3</sup>** avec un **Ecart type = 58.17** ; on constate qu'en dehors de la formulation 2, plus le taux de latex est élevé, plus le matériau composite est dense. La formulation 4, comparais aux trois autres formulations est celle qui offre le composite le plus dense. On note également que notre composite a une densité moyenne  **$\rho_{moy} = 826.255(\text{kg/m}^3)$** . En comparaison avec les composites de la littérature nous remarquons que les composites de PT à matrice tanin + exsudat + latex ont une densité largement supérieure à celle des composites d'alfa avec  **$\rho = 263.3\text{kg/m}^3$**  et de jonc  **$\rho = 262.7\text{kg/m}^3$**  de Houda SAAD (2003).

### 3.6.1.2. Résultats de l'analyse du taux d'humidité

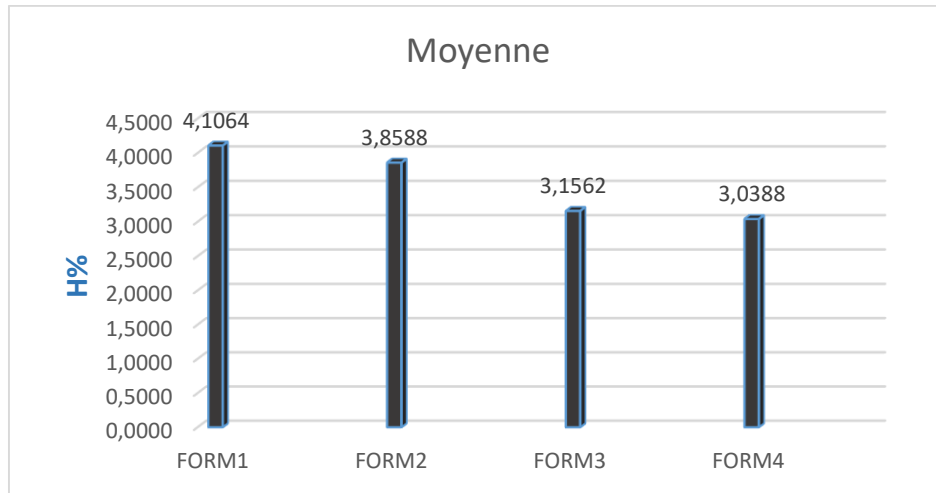
Le tableau 3-5 suivant présente les données de l'analyse du taux d'humidité :

*Tableau 3-5 : Données de l'analyse du taux d'humidité*

Formulation	Echantillons	mi	mf	mi- mf	H(%)	H(%) moy
<b>FORM1</b>	<b>F1E1</b>	10,56	10,10	0,46	4,60	4,10
	<b>F1E2</b>	11,58	11,14	0,44	3,98	
	<b>F1E3</b>	4,89	4,70	0,18	4,00	
	<b>F1E4</b>	6,24	6,01	0,22	3,82	
<b>FORM2</b>	<b>F2E1</b>	5,95	5,75	0,19	3,46	3,85
	<b>F2E2</b>	4,59	4,43	0,16	3,67	
	<b>F2E3</b>	5,60	5,37	0,22	4,15	
	<b>F2E4</b>	12,9	12,46	0,51	4,13	
<b>FORM3</b>	<b>F3E1</b>	4,58	4,45	0,13	2,95	3,15
	<b>F3E2</b>	4,20	4,08	0,11	2,77	
	<b>F3E3</b>	3,56	3,44	0,12	3,52	
	<b>F3E4</b>	4,293	4,15	0,14	3,37	
<b>FORM4</b>	<b>F4E1</b>	11,66	11,35	0,30	2,66	3,03
	<b>F4E2</b>	11,19	10,82	0,36	3,35	
	<b>F4E3</b>	12,25	11,88	0,36	3,04	
	<b>F4E4</b>	12,13	11,77	0,36	3,09	
<b>variance</b>	<b>0.27</b>					
<b>Ecart type</b>	<b>0.5231</b>					
<b>H<sub>moy</sub>%</b>	<b>3.53</b>					

La figure 3-4 suivante présente le diagramme des moyennes des H% en fonction des types de formulations ;





*Figure 3-4 : Diagramme des moyennes du taux d'humidité*

Nous pouvons donc déduire d'après le diagramme de la figure 3-4 que les panneaux de composites ayant un grand % de latex absorbe moins d'eau par rapport aux autres formulations. D'où les panneaux de composites réalisé à partie de la formulation 4 sont les moins conservateurs d'humidité. On peut donc noter Egalement que notre composite a un taux d'humidité  $H_{moy}=3.53\%$  ; avec un écart type=  $0.5231$  ; ce qui signifie que près de 3.53% de sa masse est constitué d'eau.



### 3.6.1.3. Résultats de l'analyse du taux d'absorption

Le tableau 3-6 suivant présente les données de l'analyse du taux d'absorption :

*Tableau 3-6 : Analyse du taux d'absorption*

formulation	Echantillons	mi	mf	mf-mi	T(%)	T(%)moy
<b>FORM1</b>	F1E1	6,1355	14,4491	8,3136	57,5371	61,8191
	F1E2	5,964	16,1755	10,2115	63,1294	
	F1E3	4,4204	14,4829	10,0625	69,4785	
	F1E4	6,8444	15,966	9,1216	57,1314	
<b>FORM2</b>	F2E1	2,51	8,2783	5,7683	69,6798	64,3875
	F2E2	3,9584	8,9145	4,9561	55,5959	
	F2E3	5,0173	13,8283	8,811	63,7172	
	F2E4	4,9027	15,5924	10,6897	68,5571	
<b>FORM3</b>	F3E1	5,1392	14,3374	9,1982	64,1553	60,1759
	F3E2	6,4601	14,857	8,3969	56,5181	
	F3E3	5,3149	15,12	9,8051	64,8485	
	F3E4	6,6533	14,845	8,1917	55,1815	
<b>FORM4</b>	F4E1	3,8135	10,5202	6,7067	63,7507	63,2273
	F4E2	4,4446	11,2970	6,8524	60,6568	
	F4E3	3,5348	10,9536	7,4188	67,7293	
	F4E4	4,0652	10,3631	6,2979	60,7724	
<b>variance</b>	36.870					
<b>Ecartype</b>	1.8183					
<b>T<sub>moy</sub>%</b>	62.3974					

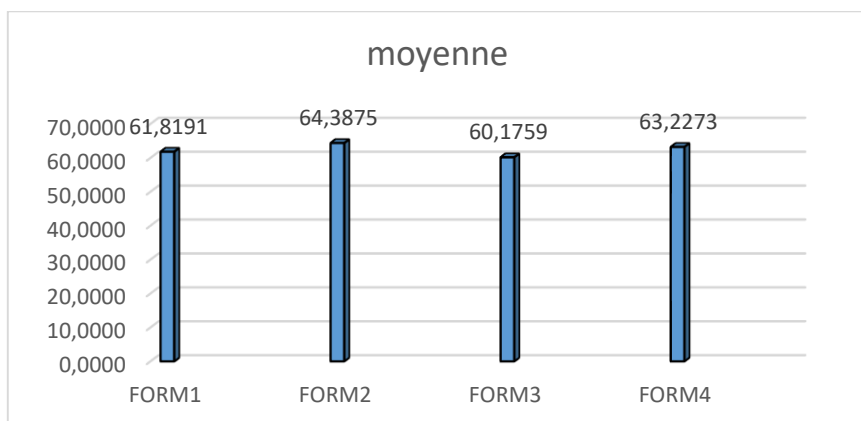


Figure 3-5 : Taux d'absorption d'eau

On remarque d'après les données du tableau 3-6 et de la figure 3-5 que les panneaux de fibres de bananier à matrice Tanin + exsudat + latex absorbent beaucoup d'eau. 60 à 65% de leur masse lorsqu'ils sont exposés dans l'eau pendant 24h est constitué d'eau. On note également que le composite absorbe près de 2 fois sa masse initiale. Les taux d'absorptions des panneaux varient de **60.17% à 64.38%**, avec un **écart type = 1.81** et un **T<sub>moy</sub>% = 62.3974%**. Nous notons que notre composite de fibre de PT de bananier absorbe beaucoup plus d'eau que les composites de fibre de lin de la littérature qui a un **T%=10.9%** Hadi SAIDANE (2015)

#### 3.6.1.4. Résultats de l'analyse de cinétique d'absorption

La figure nous présente l'évolution de l'absorption en fonction du temps

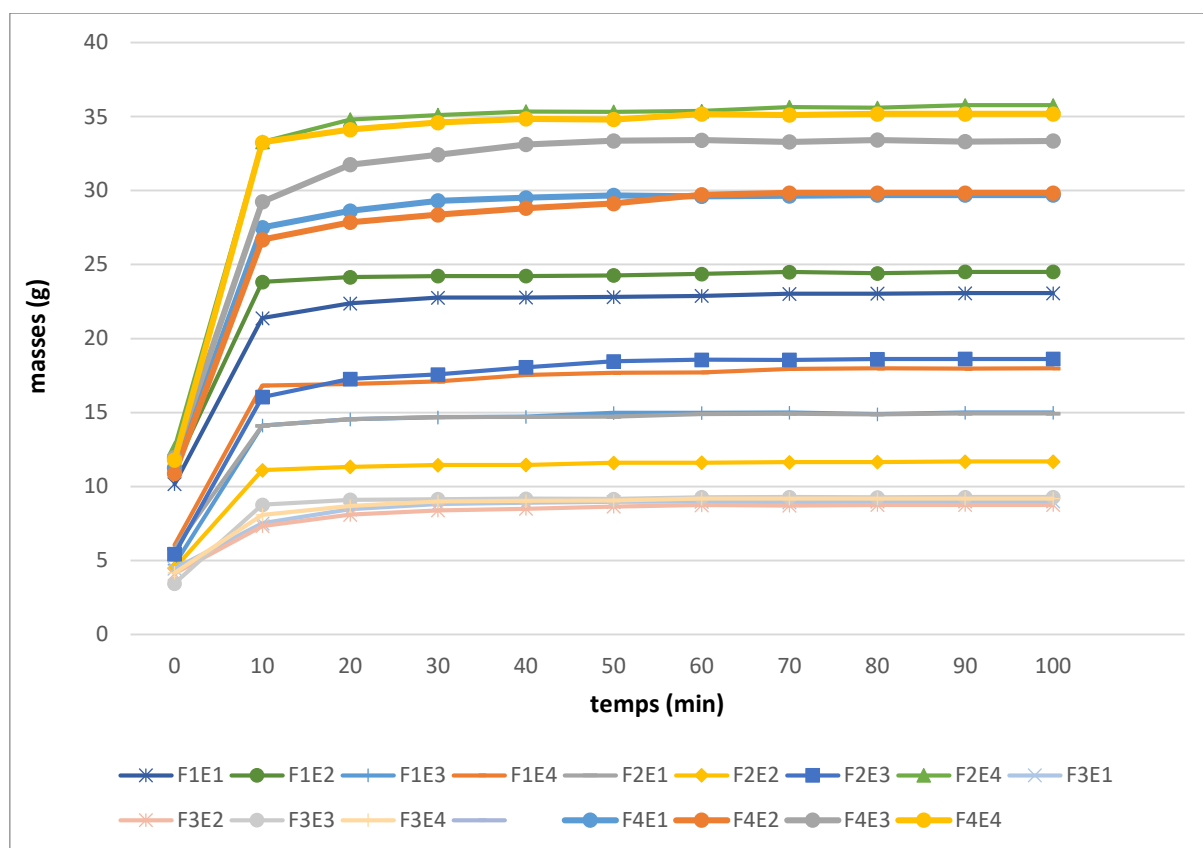


Figure 3-6 : Cinétiques d'absorption

Le constat fait est que dans tous les 4 formulations de notre composite, près de 80% de la quantité d'eau absorbé se fait dans les 20 premières minutes ; de là, nous pouvons donc noter que notre composite absorbe très rapidement une fois exposé à l'humidité. On remarque également que plus la masse est importante plus le composite absorbe vite.

Tableau 3-7 : donné des résultats de calculs de la cinétique d'absorption

Formulation	Echtill	Mi	Mf	Mf-Mi	temps (s)	Vitesse (g/s)	Vi moy
<b>FORM1</b>	<b>F1E1</b>	10,16	23,07	12,91	6000	0,0022	0,0020
	<b>F1E2</b>	11,23	24,51	13,28	6000	0,0022	
	<b>F1E3</b>	4,72	15	10,28	6000	0,0017	
	<b>F1E4</b>	6,05	17,98	11,93	6000	0,0020	
<b>FORM2</b>	<b>F2E1</b>	5,8	14,93	9,13	6000	0,0015	0,0022
	<b>F2E2</b>	4,47	11,69	7,22	6000	0,0012	
	<b>F2E3</b>	5,43	18,62	13,19	6000	0,0022	
	<b>F2E4</b>	12,6	35,77	23,17	6000	0,0039	
<b>FORM3</b>	<b>F3E1</b>	4,45	18,99	14,54	6000	0,0024	0,0022
	<b>F3E2</b>	3,11	17,75	14,64	6000	0,0024	
	<b>F3E3</b>	3,44	15,28	11,84	6000	0,0020	
	<b>F3E4</b>	4,17	16,19	12,02	6000	0,0020	
<b>FORM4</b>	<b>F4E1</b>	11,27	29,7	18,43	6000	0,0031	0,0034
	<b>F4E2</b>	10,87	29,84	18,97	6000	0,0032	
	<b>F4E3</b>	11,97	33,35	21,38	6000	0,0036	
	<b>F4E4</b>	11,78	35,18	23,4	6000	0,0039	
<b>variance</b>	$4 \times 10^{-7}$						
<b>Ecart type</b>	$6 \times 10^{-4}$						
<b>Vi<sub>moy</sub>(g/s)</b>	0.00245						

La figure suivante présente l'évolution de la cinétique d'absorption en fonction des différentes formulations



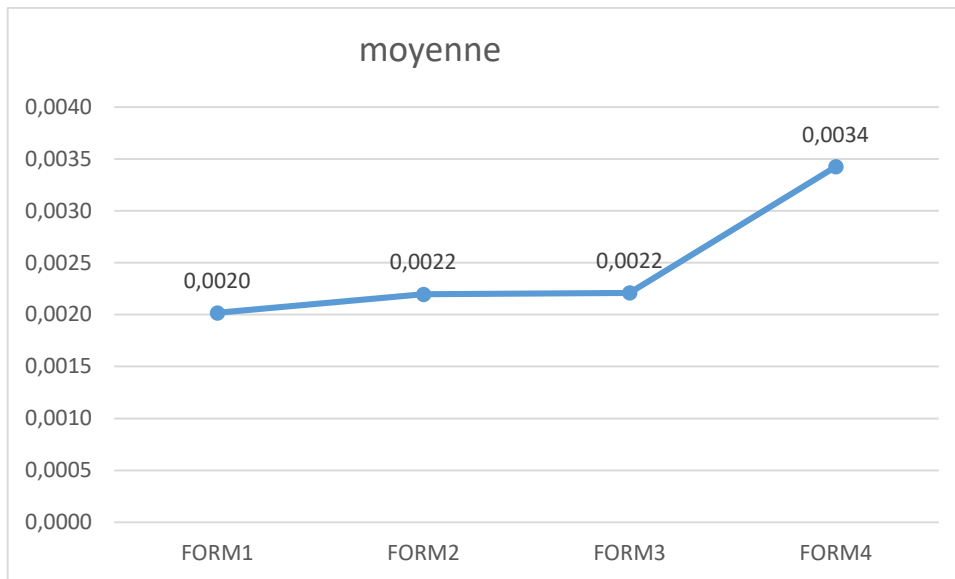


Figure 3-7 : moyenne de la cinétique d'absorption

On note ici que les vitesses moyenne d'absorption dans les différentes formulations sont les suivantes : dans la formulation 1  $V_i = 0,0020\text{g/s}$  dans la formulation 2  $V_i = 0,0020\text{g/s}$  dans la formulation 3  $V_i = 0,0020\text{g/s}$  et dans la formulation 4  $V_i = 0,0034\text{g/s}$  ; d'où notre composite a une vitesse d'absorption moyenne  $V_{i\text{moy}} = 0,00245\text{g/s}$ . avec un écart type  $= 6 \times 10^{-4}$

### 3.6.2. Caractérisations mécaniques

#### 3.6.2.1. Résultats de l'analyse de la flexion trois points

La figure 3-8 présente le comportement du composite en flexion.

Les données ayant permis le tracé de ce graphique se trouvent à l'annexe 6.

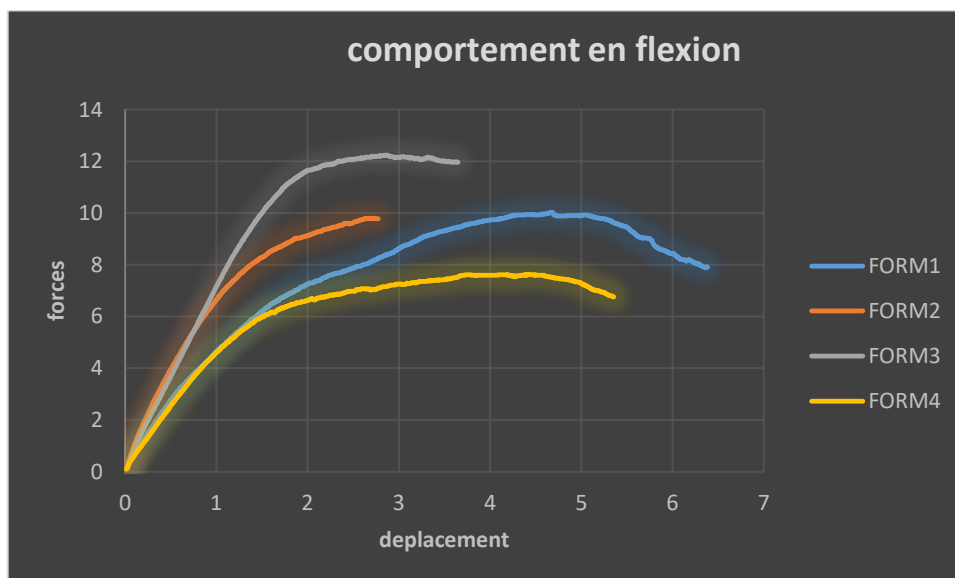


Figure 3-8 : graphe de comportement en flexion

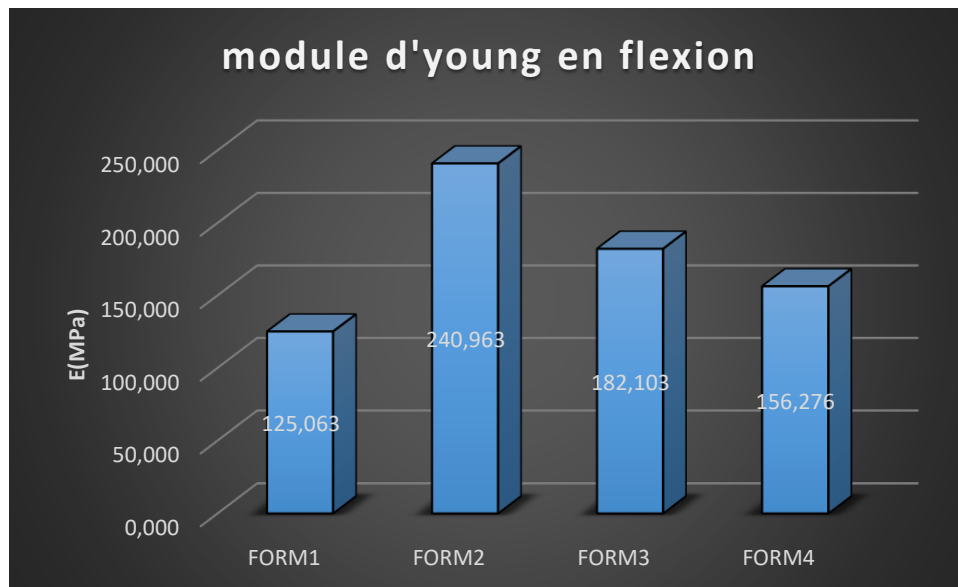
Après analyse de la figure 3-8 On remarque que nos composites de différentes formulations ont une petite déformation élastique par contre une plus grande déformation plastique

Les résultats de l'essai flexion nous a permis de ressortir le tableau 3-8 des caractéristiques en flexion :

*Tableau 3-8 : caractéristiques mécaniques de flexion*

formulations	E (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	Fmax
<b>FORM1</b>	125,063	1,776	10,02
<b>FORM2</b>	240,963	2,034	10,92
<b>FORM3</b>	182,103	2,486	13,52
<b>FORM4</b>	156,276	1,595	8,02
moyen	<b>176,101</b>	<b>1,973</b>	<b>10,620</b>
Ecart type	<b>49,129</b>	<b>0,386</b>	<b>2,281</b>

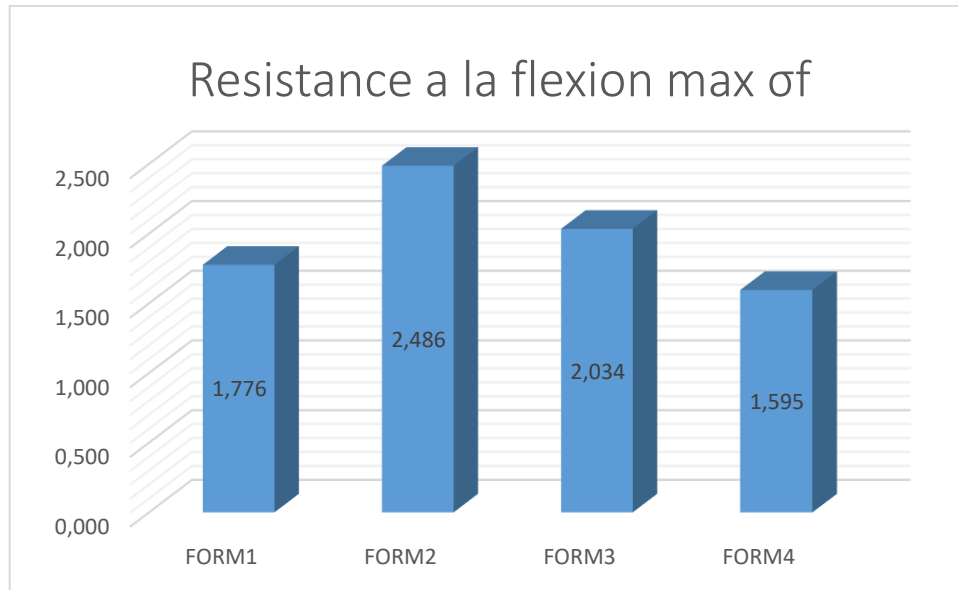
Pour analyser les résultats, nous avons sorti les graphes des modules d'Young et de résistance maximale à la flexion. La figure 3-9 Suivant présente le l'histogramme de la variation des module d'Young en fonction des formulations



*Figure 3-9 : variation du module d'Young en fonction des formulations*

Cette analyse nous permet de ressortir les moyennes des modules d'Young des composites des fibres de pseudo-troncs de bananiers à matrice tanin + exsudat + latex  $E_{moy} = 176.101$  Mpa avec un **Ecart type = 49.129**.

La figure 3-10 suivante représente l'histogramme des variations de résistance à la flexion en fonction des formulations.

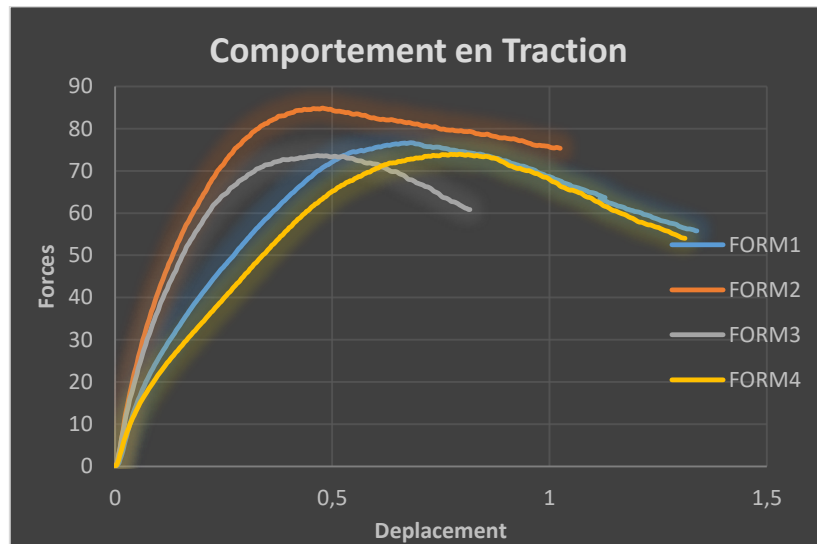


*Figure 3-10 : variation de la contrainte en flexion*

De même, cette analyse nous a permis de ressortir la moyenne des contraintes maximales en flexion  $\sigma_{moy} = 1.973Mpa$  avec un **Ecart type** = **0.386**. Nous pouvons donc remarquer que les panneaux à 5% de latex présentent des meilleures propriétés mécaniques en flexion.

### 3.6.2.2. Résultats de l'analyse de traction

La figure 3-11 présente le comportement du composite en traction ; les valeurs ayant servi au tracées de ces courbes se trouvent à l'annexe 8.



*Figure 3-11 : comportements à la traction*

Après analyse de la figure 3-11 On remarque que nos composites de différentes formulations ont une très petite déformation élastique par contre une déformation plastique plus importante.

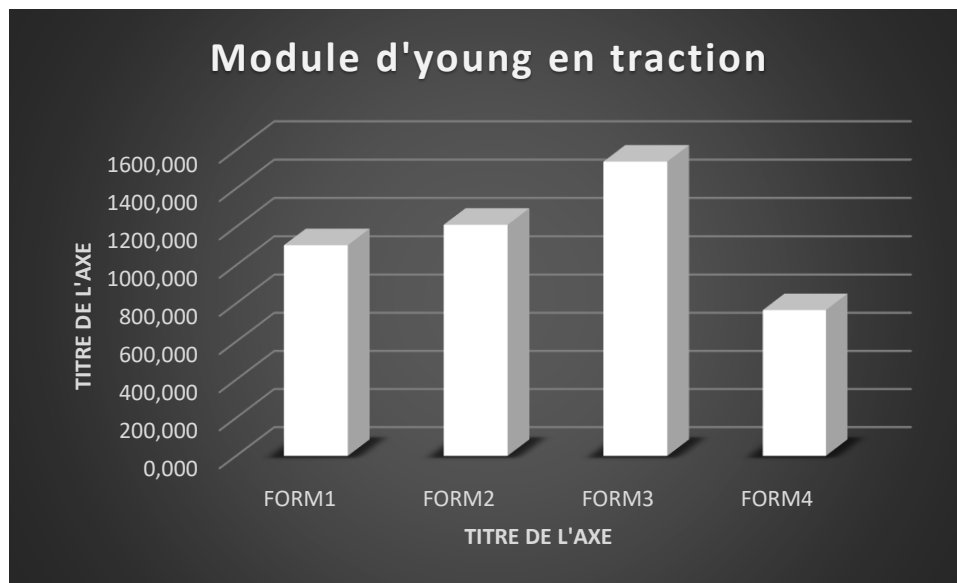
Les résultats de l'essais de traction nous a permis de ressortir le tableau des caractéristiques suivants :

*Tableau 3-9 : caractéristiques mécaniques de traction*

formulations	E (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	Fmax
<b>FORM1</b>	1104,69833	0,82835	172,08
<b>FORM2</b>	1211,0394	0,7549	84,86
<b>FORM3</b>	1540,64134	1,0662	144,94
<b>FORM4</b>	765,504977	0,7278	91,14
<b>moy</b>	<b>1155,47101</b>	<b>0,8443125</b>	<b>123,255</b>
<b>Ecart type</b>	<b>319,424171</b>	<b>0,15390324</b>	<b>42,2676752</b>

Pour analyser les résultats, nous avons sorti les graphes des modules d'Young et de résistance max a la flexion.

La figure 3-12 Suivant présente le l'histogramme de la variation des module d'Young en fonction des formulations

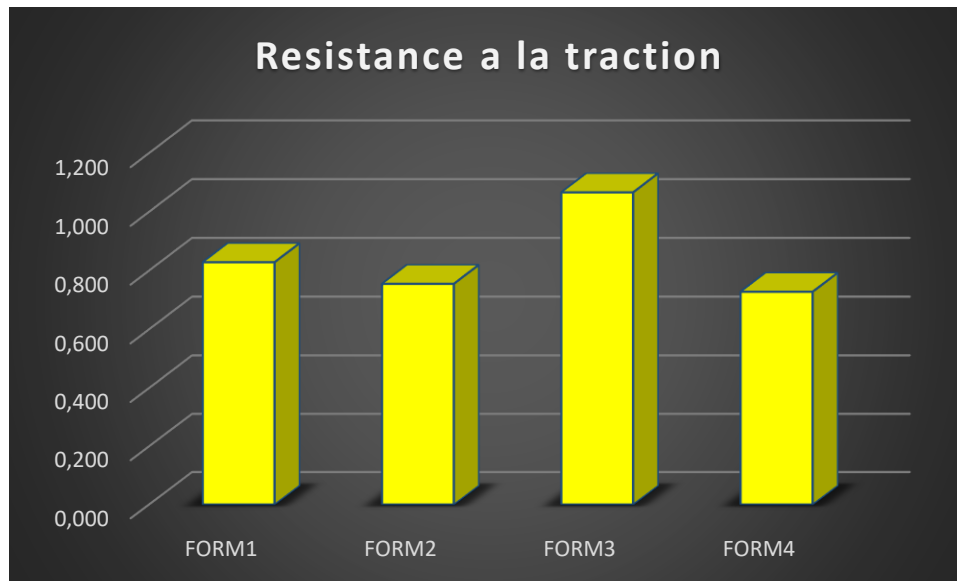


*Figure 3-12 : variation du module d'Young en traction dans différentes formulations*

Cette analyse nous permet de ressortir les moyennes des modules d'Young en traction des composites des fibres de pseudo-troncs de bananiers à matrice tanin + exsudat + latex  $E_{moy} = 1155.47$  Mpa avec un **Ecart type = 319.42**

La figure 3-13 suivante représente l'histogramme des variations de la résistance à la traction en fonction des formulations





*Figure 3-13 : variation de la contrainte en traction*

De même, cette analyse nous a permis de ressortir la moyenne des contraintes maximales en traction  $\sigma_{moy} = 0.8443Mpa$  avec un **Ecart type = 0.1539**. Nous pouvons donc remarquer que les panneaux à 10% de latex présentent des meilleures propriétés mécaniques en traction.

### 3.7. Justification du domaine d'application

Compte tenu des exigences fixées préalablement sur la fabrication des panneaux de fibres de pseudo-tronc de bananier à matrice tanin- latex- exsudés ; il nous revient de choisir le domaine d'utilisation du panneau normalisé. Panneaux pour agencements intérieurs (y compris les meubles) utilisés en milieu sec. Les matériels que nous pouvons fabriquer avec ces panneaux sont : faux contre-plaqués, tables de bureau, guéridons, lambris, les pièces d'habillage intérieur d'automobile, meubles de cuisine, pots de fleur, classeurs, penderies, ...

Il ressort des résultats que les composites présentent des bonnes propriétés mécaniques notamment ceux élaborés à partir de 10% de latex qui présentent des meilleures propriétés en traction et ceux de 5% de latex qui présentent des meilleures propriétés en flexion.

Au regard de nos résultats, nos composites respectent la norme EN 310 de l'ameublement.

# *CONCLUSION GENERALE*

---



Une étude scientifique doit autant que possible apporter des solutions aux interrogations qui lui ont donné naissance. Dans le cadre de notre mémoire, il était question d'élaborer et caractériser un matériau composite à base des fibres du pseudo-tronc de bananier.

Pour y arriver, nous avons débuté par une revue de littérature portant sur les fibres végétales et les matériaux composites en général, en vue de ressortir les différentes propriétés physiques, chimiques et mécanique des fibres et composites obtenues par des prédécesseurs. Ensuite, nous avons parlé des généralités sur le *Bananier* et en fin nous avons présenté les généralités sur les matériaux composites ainsi que leurs méthodes de mise en forme. Nous avons également parlé des différents matériels et méthodes utilisées pour l'extraction des fibres, l'élaboration et la caractérisation de notre composite.

Les caractérisations physique et mécanique du composite des fibres, a été faite par la suite et il ressort que : les caractéristiques physiques notamment la densité apparente  $\rho_{moy} = 826.255 \text{ kg/m}^3$ ; le taux d'humidité  $H_{moy} = 3.53\%$ ; le taux d'absorption  $TA_{moy} = 62.39\%$ ; la cinétique d'absorption  $Vi_{moy} = 0.00245 \text{ g/s}$ , en suite les caractérisations mécaniques telles que : - la traction avec un module d'Young  $E_t = 1155.47 \text{ Mpa}$ , une contrainte de résistance à la traction  $\sigma_{t.moy} = 0.8443 \text{ Mpa}$  et la force maximale supporté en traction  $F_{t,max} = 123.25 \text{ N}$ ; - la flexion avec un module d'Young moyen  $E_{f.moy} = 176.101 \text{ Mpa}$  et une contrainte moyenne de résistance à la flexion  $\sigma_{f.moy} = 1.973 \text{ Mpa}$  et la force maximale supporté en flexion  $F_{t,max} = 10.620 \text{ N}$ . Pour terminer, nous avons analysé les résultats ; et de ces travaux il ressort que les composites *fibres de pseudo-troncs* à matrice *tanin + exudat + latex* sont en accord avec la normale EN 310 ; nous constatons que le composite élaboré présente une structure hétérogène lié à la mauvaise répartition de la résine dans l'ensemble du panneau. Il ressort également que les composites élaborés avec les formulations de 5% et 10% de latex présentent des meilleures caractéristiques.

Toutefois, nous avons rencontré certaines difficultés au cours de la réalisation de ce travail, surtout au niveau du mélange fibre/matrice lors de la mise en forme du composite ; pour ce fait nous proposons d'utiliser un système de mélange et de pulvérisation de la résine, ce qui améliorerait beaucoup l'homogénéité du matériau. Nous notons également le manque de laboratoires spécialisés et d'équipements de travail plus adéquats. Aussi, nous suggérons d'évaluer la dureté des composites, son taux de gonflement, de trouver un traitement qui

permettra de réduire son taux d'absorption en eau et de faire une cinétique d'absorption d'eau chaude.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **A. Mbouyap Chengoué, T. Tchotang, C. Bopda Fokam, B. Kenmeugne.** 2020. Influence of extractions techniques on the physico-mechanical properties of banana pseudo-stem fibers J. Mater. Environ. Sci. 11(7), pp. 1121-1128
- [2]. **Charlet K., Morvan C., Bréard J., Jernot J-P. Gomina M.** 2006. Etude morphologique d'un composite naturel : la fibre de lin “, *Revue des Composites et Matériaux Avancés* **3** : 309-344
- [3]. **Ernest et Young,** Etude du marché des nouvelles utilisation des fibres végétales, ADEME, 2005.
- [4]. **LE DUIGOU (A), DAVIES P., BALEY C.J.** Biobased Mater Bioenergy ; 5 , P153-165 [doi : 10. 1166 /jbmb.2011.11116] (2011)
- [5]. **JOSHI (S), DRZAL L., MOHANTY (A), ARORA (S.).** compos part a appl SCimanuf ; 35 ;P.371-6
- [6]. **S.Mouhoubi , H. OSMani, T.Ball,** verres , ceramique, et composites vol.2, N1 (2012), P.34-40
- [7]. **k.Al-kaabi, al-khanbashi A, hammani.** Polymer composite (2005), pp 604-613.
- [8]. **K.M.Rowell, R.A.youg .j.k.Rowell.** CRC. Lewis publishers, Bocahton . USA ; (1997)
- [9]. **F. Michaud,** “rheologie de panneaux composites bios/thermo plastique sous chargement thermomecanique” these PHD univ LAVAL+Bordeau (2003)
- [10]. **Laurent Gornet,** Généralités sur les Matériaux composites. Engineering school.2008. cel\_00470296
- [11]. **D. Thi Vi Vi,** Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non, Thèse de Doctorat, vol. 1, Université de Grenoble et Université des sciences de Hochiminh Ville, Juillet 2011.



- [12]. **R.G.Allaby**, G.W.Peterson, D.A.Merriwether and Y.B.Fu, Evidence of the domestication history of flax (*Linum usitatissimum* L.) from genetic diversity of the *sad2* locus, vol. 112, 2005, pp. 58 - 65.
- [13]. <http://boiseau.free.fr/dossiers/lin/exploitationlinpdf.pdf>. «La culture et l'exploitation du lin,» [En ligne]. Available:
- [14]. **C.Meirhaeghe**, «Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France,» 2011. [En ligne].
- [15]. **S. Msahli**, Etude du potentiel textile des fibres d'Agave Americana L., Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace, Juillet 2002.
- [16]. **S. Taj, M. Ali Munawar, S. Khan**, «Natural fiber-reinforced polymer composites,» chez *Proceeding of Pakistan Academy of Sciences*, vol. 44(2), Mars 2007.
- [17]. **J. Champion**, Le bananier et leur culture botanique et génétique, Paris, France, 1967.
- [18]. Annuaire statistique du Cameroun, 2008.
- [19]. **M. DALLEN**, Evaluation du potentiel textile des fibres d'alfa: Caractérisation physico-chimique de la fibre, 2012.
- [20]. **A.K. Bledzki, J. Gassan**, "Composites reinforced with cellulose based fibres", *Prog. Polym. Sci.* 24 221–274, 1999
- [21]. **C.Ververis, K.Georghiou, N.Christodoulakis, P. Santas, R.Santas**. "Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production. *Industrial Crops and Products* 19: 245–254, 2004.
- [22]. **F.Laurans, A.Déjardin, J.Pilate**, "Physiologie de la formation des parois de fibres de bois", *composites et matériaux avancés*, Vol.16, pp.27-39,2006.
- [23]. **M.Nardin**, "interface fibre-matrice dans les matériaux composites application aux fibres végétales", *revue des composites et des matériaux avancés*, Vol 16, pp 49-61, 2006.
- [24]. **Bezazi A. R., Fatmi L., Bezzazi B. & El Mahi A.** « Etude comparative du comportement mécanique en flexion statique 3-points de différents types de stratifiés », Conférence Internationale sur les Mathématiques Appliquées et les Sciences de l'Ingénieur (CIMASI 2000), Octobre 2000.



- [25]. **Bleay S. M. & Humbertone L.** "Mechanical and electrical assessment of hybrid composites containing hollow glass reinforcement", Composites Sciences and Technology, Vol. 59, pp 1321-1329, 1999.
- [26]. **Sophie Thiébaud**, "Valorisation chimique de compose lignocellulosiques : Obtention de nouveau matériaux" thèse doctorat, INP- Toulouse (1995).
- [27]. **Nicolas Joly**, « Synthèse et caractérisation de nouveaux films plastiques obtenus par acylation et réticulation de la cellulose », thèse doctorat uni Limoges (2003).
- [28]. **Mohamed RAGOUBI**. Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne Date de soutenance : le 14 Décembre 2010
- [29]. **h Vu Nguyen**. Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2015. Français. ffNNT :2015CLF22606ff.
- [30]. **Kasongo, K.**, (2005). Etude du taux des multiplications rapides Ex situ chez 3 cultivars acuminatadiploïde, triploïde, tétraploïde de bananier après décapitation et utilisation de 6 benzylaminopyrine (BAP) à Kisangani, Mémoire, Faculté des sciences, UNIKIS. 39p.
- [31]. **Champion, J.** (1967). Les bananiers et leur culture.1. Botanique et génétique. IFAC, SETCO ed. Paris, 214 pp.
- [32]. **Tezenas Du Montcel, H.** (1985). Evaluation des collections d'Asie du Sud-Est (Tha lande, Malaisie, Indonésie). CIRAD/IRFA. Rapport de mission30/3–24/4.
- [33]. **FAO** (1991). Racines, tubercules, plantains et bananas dans la nutrition humaine. Collection FAO Nutrition 24.
- [34]. **Jones D.R.**, (2000). Diseases of banana, abaca and enset. Wallingford, UK: Cabi Publishing.
- [35]. **Bakry F.** Choice of material used to isolate protoplasts in the banana-tree (Musa spp.), Musaceae. (1984). Vol. 39, no7-8, pp. 449-452
- [36]. **Nenonene A.Y.**, « Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particule de tige de *kénaf* et de bio-adhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage », thèse de





doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Science Agro ressources, 2009.

[37]. **Bledzki AK. et Gassan J. (1999)** Composites reinforced with cellulose based fibers. Progress in polymer Science, 24 p 221-274

[38]. **Rowell, Y. Xue, D. R. Veazie, C. Glinsey, and M. F. Horstemeyer,** "Environmental effects on the mechanical and thermomechanical properties of aspen fiber-polypropylene composites," Composites Part B: Engineering, vol. 38, no. 2, 1996.

[39]. **Shah, Hetal, Srinivasulu, B., et Shit, Subhas C.** Influence of banana fibre chemical modification on the mechanical and morphological properties of woven banana fabric/unsaturated polyester resin composites. *Polymers from Renewable Resources*, 2013, vol. 4, no 2, p. 61-84

[40]. **Xiojian Zhou** « Evolution des colles à panneaux bois extérieurs synthétique (MUF), colles naturelles et soudage sans colle » Thèse de doctorat de l'université de Lorraine, Nancy, Science du bois et des fibres, 2013.

[41]. **Yahiaoui lamia** ; Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibre végétales (Diss), mémoire de magister, université FERHAT ABBAS-SETIF-UFAS (ALGERIE), 2011.

[42]. **Ye, J., Dave, U.P., Grishin, N.V., Goldstein, J.L., and Brown, M.S. (2000).** Asparagine-proline sequence within membrane-spanning segment of SREBP triggers intramembrane cleavage by Site2 protease. Proc. Natl. Acad. Sci USA 97, 5123–5128.

[43]. [www.snv.jussieu.fr](http://www.snv.jussieu.fr)

[46]. **Williams. K,** Automotive industry uses of natural fiber reinforced composites. In: The Global Outlook for Natural Fiber & Wood Composites, (2003), Intertech, New Orleans, LA, December 2003.

[47]. **Herrera-Franco. P, Valadez-Gonzalez. A, Cervantes-Uc. M,** Development and of a HDPE-sand-natural fiber composite, Composites Part B, (1997), 28, p. 331-343.

[48]. **De Albuquerque. A, Joseph. K, Hecker de Carvalho. L, Morais d'Almeida. J,** Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites, Composites Science and Technology, (1999), 60, p. 833-844.



- [49]. **Snijder. M.H.B, Bos. H.L**, Reinforcement of polypropylene by annual plant fibers: optimisation of the coupling agent efficiency, *Composite Interfaces*, (2000), 7, p. 69-79.
- [50]. **Belgacem. M.N, Bataille. P, Sapeiha. S**, Effect of corona modification on the mechanical properties of polypropylene/cellulose composites, *Journal of Applied Polymer Science*, (1994), 53, p. 379-385.
- [51]. **Felix. J.M, Carlsson. C.M.G, Gatenholm. P**, Adhesion characteristics of oxygen plasma-treated rayon fibers, *Journal of Adhesion Science and Technology*, (1994), 8, p. 163-180.
- [52]. **Bisanda. E.T.N, Ansell. M.P**, The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites”, *Composites Science and Technology*, (1991), 41, p.165-178.
- [53]. **William Jordana , Patrick Chestera**. Improving the Properties of Banana Fiber Reinforced Polymeric Composites by Treating the Fibers (2017), 37, p. 233-240.
- [54]. **Raphaël KUENY**, Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles 42, p. 248-306.
- [55]. **Klason. C, Kubat. J, Strömwall. H.E**, The efficiency of cellulosic fillers in common thermoplastics. Part 1 Filling without processings aids or coupling agents. *Inter. J. Polymeric Mater.* (1984), 10, p. 159-187.
- [56]. **Shaler. S, Groom. L, Mott. L**, Microscopic Analysis of wood fibers using ESEM and confocal Microscopy. *Proc. of the Wood Fiber-Plastic Composites Symposium*, USDA Forest Service, Madison, Wisconsin, USA, (1995), 25-32,
- [57]. **Stark. N.M, Sanadi. A.R**, Effects of fiber type on the properties of wood-plastic composites. *Progress in woodfibre-plastic composites conference*, May 25-26, Toronto, Ontario Canada. *Materials and Manufacturing Ontario*, (2000).
- [58]. **Sanadi. A.R, Caulfield. D.F, Jacobson. R.E, Rowell. R.M**, Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics: Mechanical properties of kenaf fiber-polypropylene composites. *I&EC Research*, (1995), 34 p. 1889-1896,
- [59]. **M. A. Maleque, F. Y. Belal**, mechanical properties study of pseudo-stem banana fiber reinforced epoxy composite.2014



[61]. **CHENGOUE MBOUYAP Anatole**, *recuperation des pseudo-troncs de bananier pour extraction et caracterisation*. Memoire de master. Yaoundé : université de Yaoundé 1 cameroun,2017, 123p.

[62]. **A. Sellami, (2015)**. Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss): caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie. Doctoral dissertation, Thèse de doctorat. Université BADJI MOKHTAR-ANNABA.

[63]. **Ganapathy, et all, (2019)**. Characterization of raw and alkali treated new natural cellulosic fibres extracted from the aerial roots of banyan tree. International Journal of BiologicalMacromolecules. Volume 138, 1 Pages 573-581

# ANNEXES

## Annexes 1 :

### Histogrammes d'extrait-sec des formulations de résine

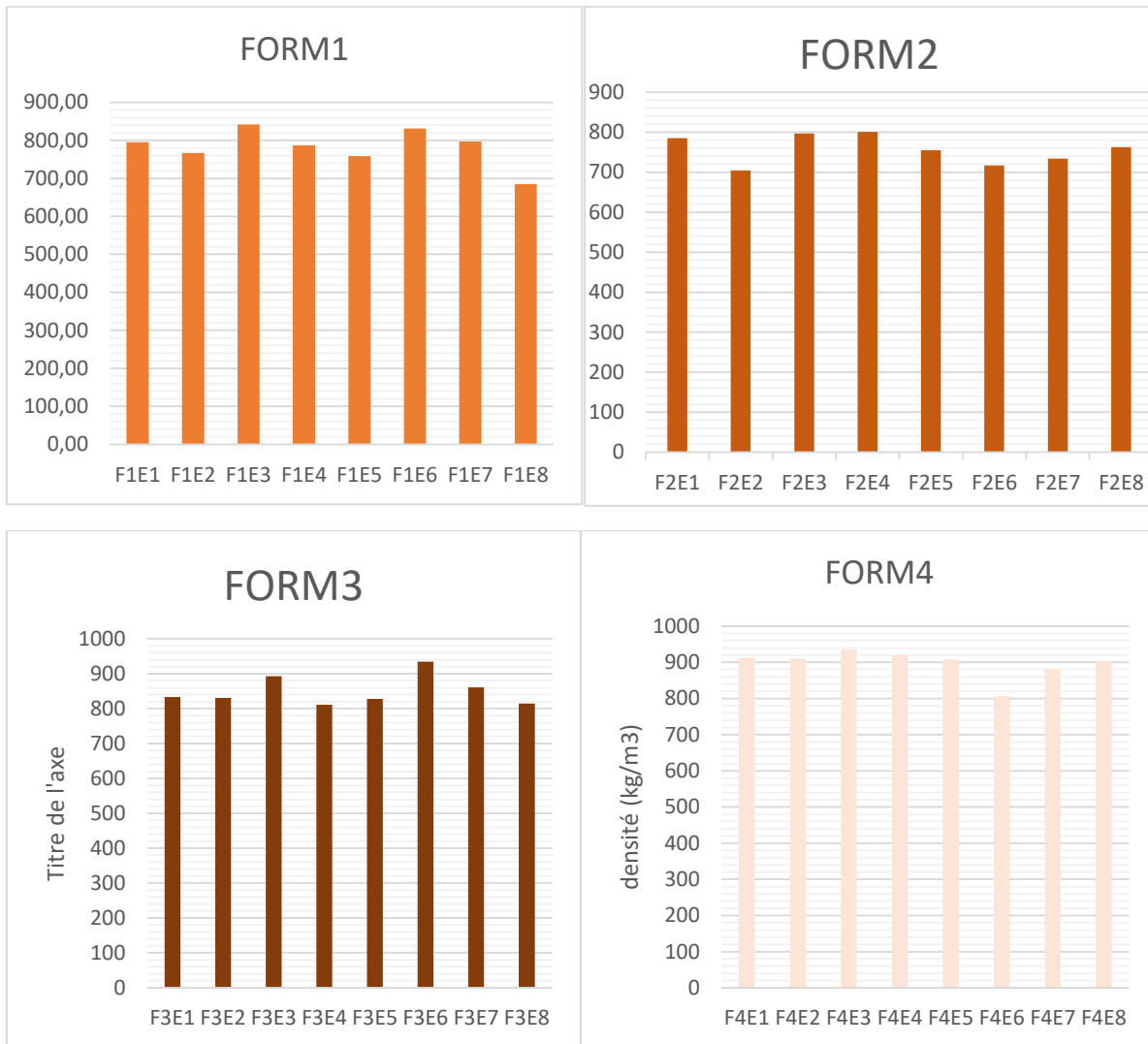


Annexes 2 :

Tableau des donnees de l'analyse de la densité

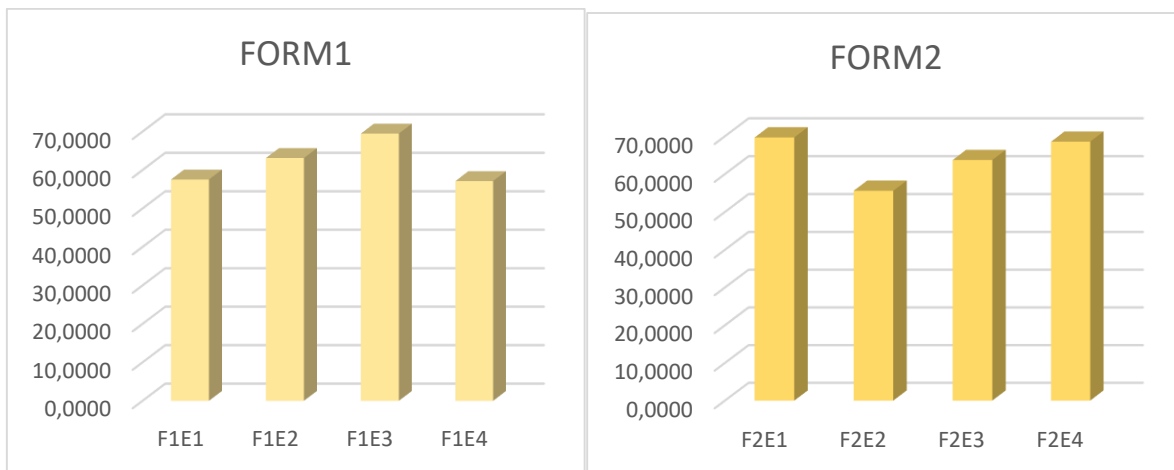
formulations	Ep	Lg	L	masse (g)	VI (mm3)	dté (kg/m3)	
FORM1	F1E1	5,38	49,2	49,34	10,38	13060,10	794,79
	F1E2	6,5	49,43	49,39	12,16	15868,76	766,29
	F1E3	5,45	49,35	49,35	11,17	13273,05	841,55
	F1E4	5,87	49,52	49,45	11,31	14374,24	786,82
	F1E5	5,44	49,1	49,5	10,03	13221,65	758,60
	F1E6	4,58	49,23	49,1	9,2	11070,74	831,02
	F1E7	4,92	49,2	49,15	9,48	11897,45	796,81
	F1E8	6,53	49,3	49,12	10,83	15813,15	684,87
FORM2	F2E1	6,87	49,8	49,5	13,29	16935,24	784,75
	F2E2	7,2	49,6	50	13,58	17856,00	760,53
	F2E3	7,28	49,7	49,73	14,34	17993,11	796,97
	F2E4	7,89	49,79	49,8	15,66	19563,59	800,47
	F2E5	6,92	49,75	49,7	12,91	17110,22	754,52
	F2E6	7,27	49,6	49,52	13,59	17856,52	761,07
	F2E7	7,25	49,4	49,9	13,11	17871,69	733,56
	F2E8	7,95	49,89	49,51	15,85	19636,93	807,15
FORM3	F3E1	8,3	49,65	49,55	17,01	20419,30725	833,035117
	F3E2	8,45	49,67	49,4	17,21	20733,7481	830,047704
	F3E3	7,85	49,5	49,45	17,15	19215,03375	892,530308
	F3E4	7,35	49,5	49,62	14,64	18052,9965	810,945706
	F3E5	7,9	49,8	49,7	16,18	19552,974	827,495602
	F3E6	8,02	49,5	49,59	18,4	19686,7341	934,639535
	F3E7	8,01	49,65	49,2	16,84	19566,6678	860,64731
	F3E8	7,35	49,55	49,5	14,68	18027,52875	814,31017
FORM4	F4E1	6,35	49,65	49,71	14,3	15672,44	912,429454
	F4E2	6,55	49,35	49,45	14,55	15984,34	910,26583
	F4E3	5,87	49,3	49,7	13,47	14382,73	936,539688
	F4E4	6,05	49,65	49,5	13,69	14868,93	920,711615
	F4E5	5,3	49,6	49,55	11,83	13025,70	908,204271
	F4E6	5,8	49,62	49,5	11,49	14245,90	806,547736
	F4E7	5,1	49,8	49,75	11,12	12635,51	880,0598
	F4E8	5,5	49,62	49,8	12,26	13590,92	902,072987

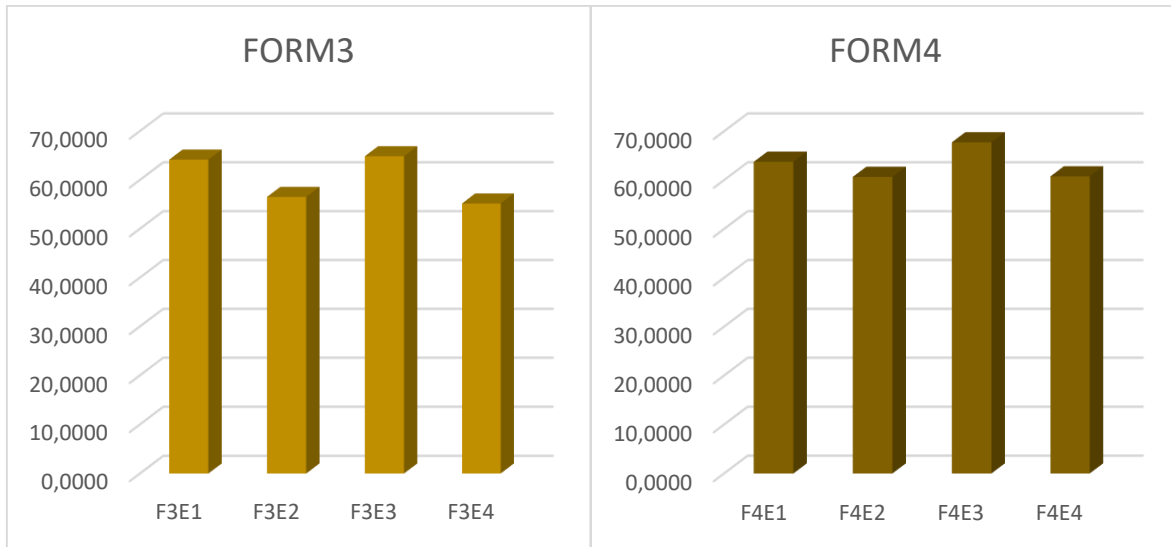
Histogramme des densités pour chaque formulation



Annexes 3 :

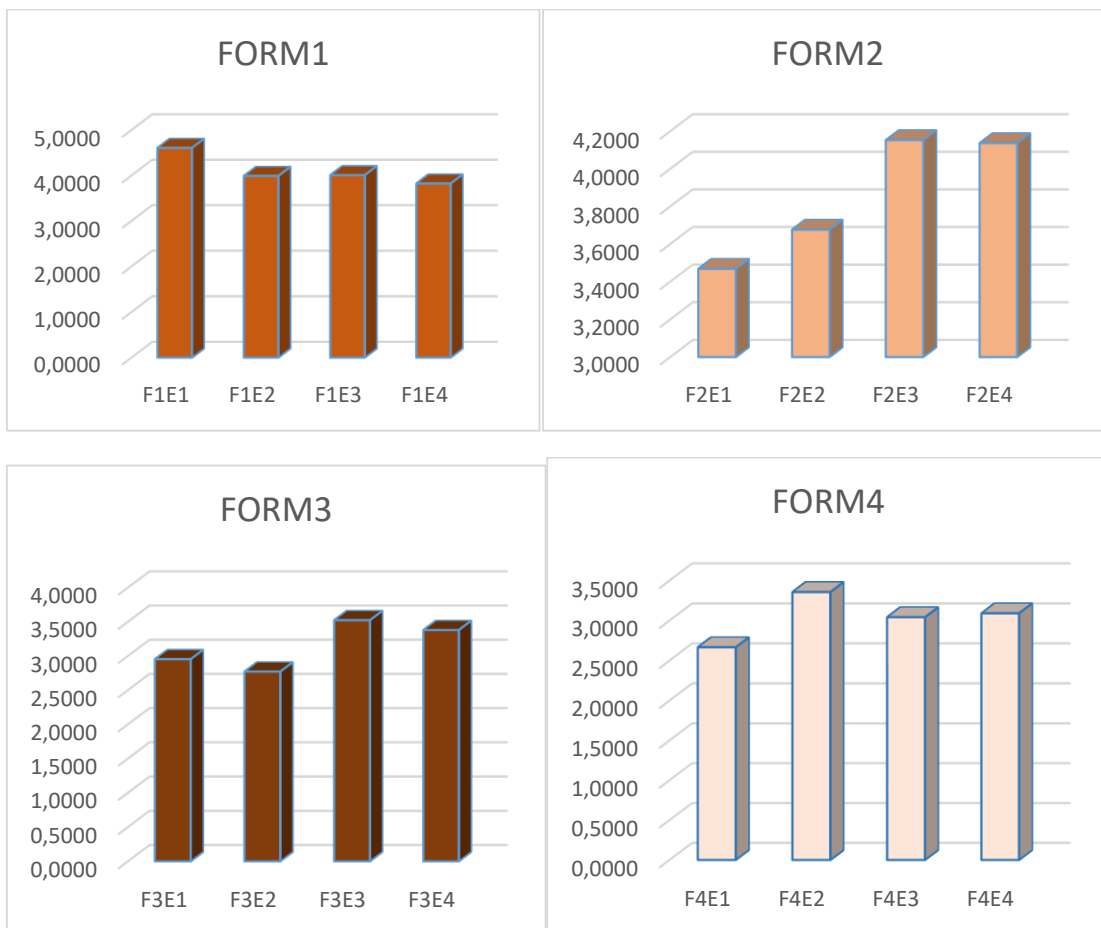
Variation du taux d'humidité dans chaque formulation





Annexe 4 :

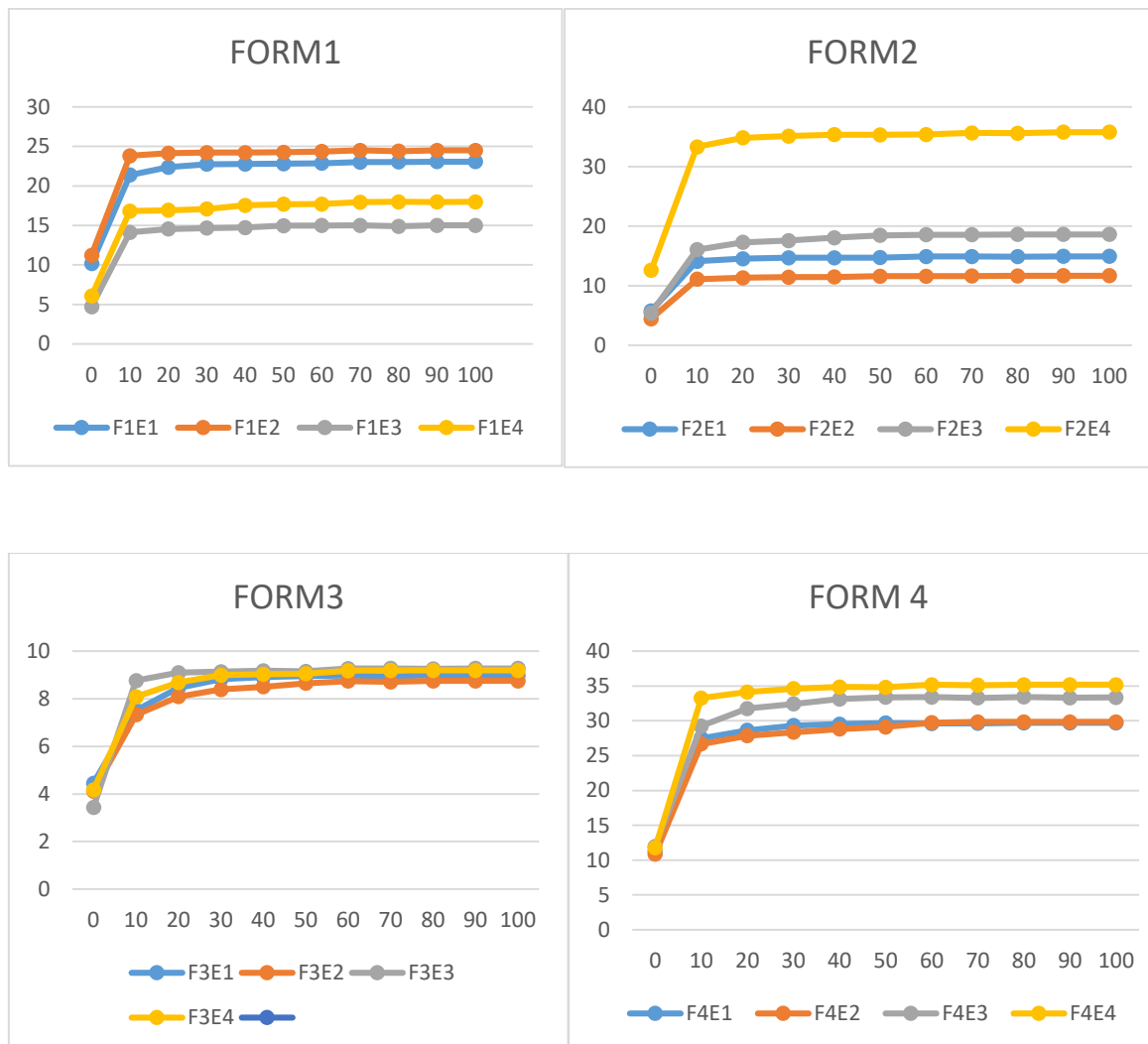
Variation du taux d'absorption d'eau dans chaque formulation





## Annexes 5 :

### Evolution des courbes de la cinétique d'absorption d'eau



## Annexes 7

### Quelques données d'analyse de flexion

deplamnt	F(N)	L	Le	e	$\sigma$	deplamnt	F(N)	L	Le	e	$\sigma$
0,018	0,12	20	80	5	2,4048	5,5845	9,22	20	80	5	2,2128
0,0215	0,12	20	80	5	0,0288	5,5875	9,2	20	80	5	2,208
0,0245	0,14	20	80	5	0,0336	5,5905	9,18	20	80	5	2,2032
0,028	0,18	20	80	5	0,0432	5,594	9,18	20	80	5	2,2032
0,0315	0,22	20	80	5	0,0528	5,5975	9,18	20	80	5	2,2032
0,0345	0,22	20	80	5	0,0528	5,6005	9,16	20	80	5	2,1984
0,038	0,26	20	80	5	0,0624	5,604	9,14	20	80	5	2,1936
0,0415	0,28	20	80	5	0,0672	5,607	9,14	20	80	5	2,1936
0,0445	0,3	20	80	5	0,072	5,6105	9,12	20	80	5	2,1888
0,048	0,32	20	80	5	0,0768	5,614	9,1	20	80	5	2,184
0,0515	0,36	20	80	5	0,0864	5,6175	9,1	20	80	5	2,184
0,054	0,38	20	80	5	0,0912	5,6205	9,1	20	80	5	2,184
0,058	0,4	20	80	5	0,096	5,624	9,1	20	80	5	2,184

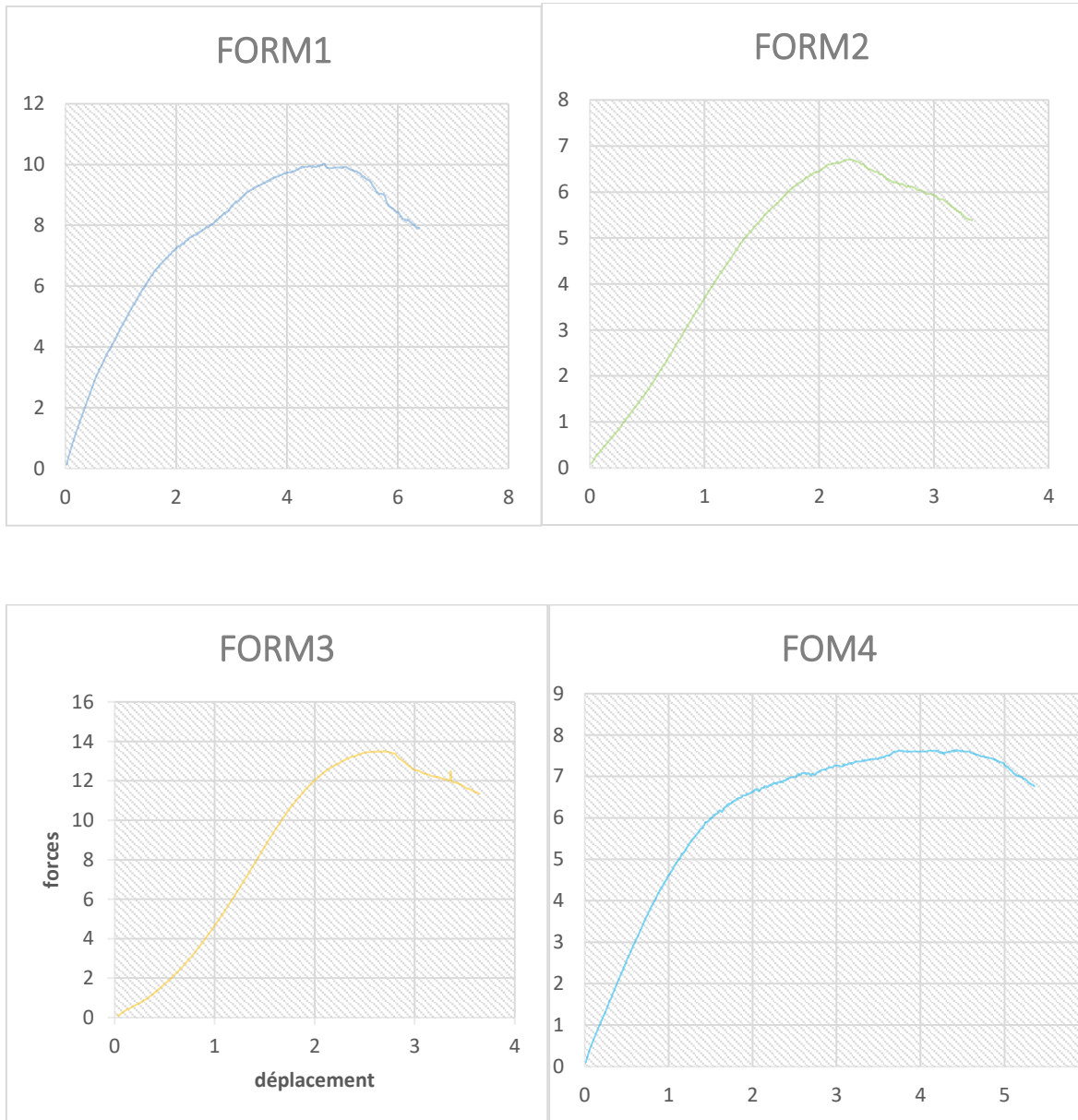


ÉLABORATION ET CARACTERISATION D'UN MATERIAU  
COMPOSITE A BASE DE FIBRES DE PSEUDO-TRONCS DE  
BANANIERES

0,0615	0,42	20	80	5	0,1008	5,627	9,1	20	80	5	2,184
0,0645	0,44	20	80	5	0,1056	5,6305	9,08	20	80	5	2,1792
0,068	0,46	20	80	5	0,1104	5,634	9,08	20	80	5	2,1792
0,071	0,48	20	80	5	0,1152	5,6375	9,08	20	80	5	2,1792
0,074	0,5	20	80	5	0,12	5,6405	9,08	20	80	5	2,1792
0,078	0,54	20	80	5	0,1296	5,644	9,06	20	80	5	2,1744
0,0815	0,56	20	80	5	0,1344	5,647	9,06	20	80	5	2,1744
0,0845	0,58	20	80	5	0,1392	5,6505	9,04	20	80	5	2,1696
0,0875	0,6	20	80	5	0,144	5,654	9,04	20	80	5	2,1696
0,091	0,62	20	80	5	0,1488	5,6575	9,04	20	80	5	2,1696
0,094	0,64	20	80	5	0,1536	5,6605	9,04	20	80	5	2,1696
0,0975	0,64	20	80	5	0,1536	5,664	9,04	20	80	5	2,1696
0,101	0,68	20	80	5	0,1632	5,667	9,04	20	80	5	2,1696
0,104	0,68	20	80	5	0,1632	5,6705	9,04	20	80	5	2,1696
0,1075	0,72	20	80	5	0,1728	5,674	9,02	20	80	5	2,1648
0,111	0,74	20	80	5	0,1776	5,6775	9,02	20	80	5	2,1648
0,114	0,76	20	80	5	0,1824	5,6805	9,04	20	80	5	2,1696
0,1175	0,76	20	80	5	0,1824	5,684	9,04	20	80	5	2,1696
0,121	0,8	20	80	5	0,192	5,687	9,04	20	80	5	2,1696
0,124	0,82	20	80	5	0,1968	5,6905	9,04	20	80	5	2,1696
0,1275	0,84	20	80	5	0,2016	5,694	9,04	20	80	5	2,1696
0,131	0,86	20	80	5	0,2064	5,6975	9,04	20	80	5	2,1696
0,134	0,86	20	80	5	0,2064	5,7005	9,04	20	80	5	2,1696
0,1375	0,88	20	80	5	0,2112	5,704	9,04	20	80	5	2,1696
0,141	0,9	20	80	5	0,216	5,7075	9,04	20	80	5	2,1696
0,144	0,92	20	80	5	0,2208	5,7105	9,04	20	80	5	2,1696
0,1475	0,94	20	80	5	0,2256	5,714	9,02	20	80	5	2,1648
0,1505	0,96	20	80	5	0,2304	5,7175	9,02	20	80	5	2,1648
0,154	0,96	20	80	5	0,2304	5,7205	9,02	20	80	5	2,1648
0,1575	1	20	80	5	0,24	5,7245	9,02	20	80	5	2,1648
0,161	1,02	20	80	5	0,2448	5,7275	9,02	20	80	5	2,1648
0,164	1,02	20	80	5	0,2448	5,7305	9,02	20	80	5	2,1648
0,1675	1,06	20	80	5	0,2544	5,734	9,02	20	80	5	2,1648
0,1705	1,08	20	80	5	0,2592	5,7375	9,02	20	80	5	2,1648
0,174	1,1	20	80	5	0,264	5,7405	9,02	20	80	5	2,1648
0,1775	1,1	20	80	5	0,264	5,7445	9,02	20	80	5	2,1648
0,181	1,12	20	80	5	0,2688	5,7475	9,02	20	80	5	2,1648
0,184	1,16	20	80	5	0,2784	5,7505	9	20	80	5	2,16
0,1875	1,18	20	80	5	0,2832	5,754	8,98	20	80	5	2,1552
0,1905	1,18	20	80	5	0,2832	5,7575	8,98	20	80	5	2,1552
0,194	1,2	20	80	5	0,288	5,7605	8,98	20	80	5	2,1552
0,1975	1,22	20	80	5	0,2928	5,7645	8,96	20	80	5	2,1504
0,201	1,24	20	80	5	0,2976	5,7675	8,96	20	80	5	2,1504
0,204	1,26	20	80	5	0,3024	5,7705	8,94	20	80	5	2,1456
0,2075	1,28	20	80	5	0,3072	5,7745	8,94	20	80	5	2,1456
0,2105	1,28	20	80	5	0,3072	5,7775	8,92	20	80	5	2,1408
0,2135	1,3	20	80	5	0,312	5,781	8,88	20	80	5	2,1312
0,2175	1,32	20	80	5	0,3168	5,7845	8,86	20	80	5	2,1264
0,221	1,34	20	80	5	0,3216	5,7875	8,82	20	80	5	2,1168
0,224	1,36	20	80	5	0,3264	5,7905	8,8	20	80	5	2,112
0,2275	1,36	20	80	5	0,3264	5,7945	8,78	20	80	5	2,1072

Rédigé et présenté par : NOUBOU SILATCHOM Marcellin





### Annexes 8

#### Quelques données d'analyse de traction

deplmt	F(N)	L	Le	e	déformation	deplmt	F(N)	L	Le	e	déformation
0	0,18	20	20	5	0	0,1935	56,72	20	20	5	0,009675
0	0,22	20	20	5	0	0,1965	57,16	20	20	5	0,009825
0,0005	0,16	20	20	5	0,000025	0,2	57,68	20	20	5	0,01
0,0015	0,14	20	20	5	0,000075	0,2035	58,42	20	20	5	0,010175
0,0025	0,26	20	20	5	0,000125	0,207	58,96	20	20	5	0,01035
0,0045	0,64	20	20	5	0,000225	0,2105	59,4	20	20	5	0,010525
0,0065	1,64	20	20	5	0,000325	0,2135	59,9	20	20	5	0,010675
0,0085	2,88	20	20	5	0,000425	0,2165	60,36	20	20	5	0,010825
0,0115	4,2	20	20	5	0,000575	0,22	60,82	20	20	5	0,011
0,014	5,88	20	20	5	0,0007	0,2235	61,48	20	20	5	0,011175
0,017	7,5	20	20	5	0,00085	0,227	61,98	20	20	5	0,01135



ÉLABORATION ET CARACTERISATION D'UN MATERIAU  
COMPOSITE A BASE DE FIBRES DE PSEUDO-TRONCS DE  
BANANIER

0,021	9,3	20	20	5	0,00105	0,2305	62,3	20	20	5	0,011525
0,024	11,22	20	20	5	0,0012	0,2335	62,62	20	20	5	0,011675
0,0275	12,86	20	20	5	0,001375	0,2365	62,92	20	20	5	0,011825
0,031	14,3	20	20	5	0,00155	0,24	63,26	20	20	5	0,012
0,0335	15,7	20	20	5	0,001675	0,2435	63,76	20	20	5	0,012175
0,037	16,84	20	20	5	0,00185	0,247	64,12	20	20	5	0,01235
0,0405	18,04	20	20	5	0,002025	0,2505	64,36	20	20	5	0,012525
0,044	19,46	20	20	5	0,0022	0,2535	64,54	20	20	5	0,012675
0,0475	20,76	20	20	5	0,002375	0,2565	64,74	20	20	5	0,012825
0,051	21,96	20	20	5	0,00255	0,26	65,08	20	20	5	0,013
0,0535	23,24	20	20	5	0,002675	0,2635	65,64	20	20	5	0,013175
0,057	24,3	20	20	5	0,00285	0,267	66,02	20	20	5	0,01335
0,0605	25,46	20	20	5	0,003025	0,2705	66,22	20	20	5	0,013525
0,064	26,78	20	20	5	0,0032	0,2735	66,46	20	20	5	0,013675
0,0675	27,9	20	20	5	0,003375	0,2765	66,68	20	20	5	0,013825
0,071	28,88	20	20	5	0,00355	0,2805	66,96	20	20	5	0,014025
0,0735	29,92	20	20	5	0,003675	0,2835	67,38	20	20	5	0,014175
0,077	30,78	20	20	5	0,00385	0,287	67,7	20	20	5	0,01435
0,0805	31,7	20	20	5	0,004025	0,2905	67,88	20	20	5	0,014525
0,084	32,84	20	20	5	0,0042	0,2935	68,1	20	20	5	0,014675
0,087	33,78	20	20	5	0,00435	0,2965	68,28	20	20	5	0,014825
0,0905	34,66	20	20	5	0,004525	0,7135	66,36	20	20	5	0,035675
0,0935	35,6	20	20	5	0,004675	0,7165	66,28	20	20	5	0,035825
0,097	36,38	20	20	5	0,00485	0,7205	66,2	20	20	5	0,036025
0,1005	37,24	20	20	5	0,005025	0,724	66,02	20	20	5	0,0362
0,1035	38,3	20	20	5	0,005175	0,727	65,84	20	20	5	0,03635
0,107	39,16	20	20	5	0,00535	0,73	65,58	20	20	5	0,0365
0,1105	39,88	20	20	5	0,005525	0,7335	65,24	20	20	5	0,036675
0,1135	40,7	20	20	5	0,005675	0,7365	65,08	20	20	5	0,036825
0,1165	41,36	20	20	5	0,005825	0,7405	64,9	20	20	5	0,037025
0,1205	42,08	20	20	5	0,006025	0,744	64,72	20	20	5	0,0372
0,1235	43	20	20	5	0,006175	0,747	64,46	20	20	5	0,03735
0,127	43,74	20	20	5	0,00635	0,75	64,14	20	20	5	0,0375
0,1305	44,4	20	20	5	0,006525	0,7535	63,84	20	20	5	0,037675
0,1335	45,14	20	20	5	0,006675	0,7565	63,7	20	20	5	0,037825
0,1365	45,74	20	20	5	0,006825	0,7605	63,62	20	20	5	0,038025
0,1405	46,42	20	20	5	0,007025	0,764	63,5	20	20	5	0,0382
0,1435	47,36	20	20	5	0,007175	0,767	63,32	20	20	5	0,03835
0,147	48,16	20	20	5	0,00735	0,77	63,14	20	20	5	0,0385
0,1505	48,84	20	20	5	0,007525	0,7735	62,82	20	20	5	0,038675
0,1535	49,58	20	20	5	0,007675	0,7765	62,74	20	20	5	0,038825
0,1565	50,2	20	20	5	0,007825	0,78	62,68	20	20	5	0,039
0,1605	50,88	20	20	5	0,008025	0,784	62,54	20	20	5	0,0392
0,1635	51,74	20	20	5	0,008175	0,787	62,38	20	20	5	0,03935
0,167	52,38	20	20	5	0,00835	0,79	62,22	20	20	5	0,0395
0,1705	52,88	20	20	5	0,008525	0,7935	61,94	20	20	5	0,039675
0,1735	53,48	20	20	5	0,008675	0,797	61,76	20	20	5	0,03985
0,1765	53,92	20	20	5	0,008825	0,8005	61,54	20	20	5	0,040025
0,18	54,46	20	20	5	0,009	0,804	61,34	20	20	5	0,0402
0,1835	55,18	20	20	5	0,009175	0,807	61,18	20	20	5	0,04035
0,187	55,74	20	20	5	0,00935	0,8105	61,08	20	20	5	0,040525
0,1905	56,18	20	20	5	0,009525	0,8135	60,88	20	20	5	0,040675

Rédigé et présenté par : NOUBOU SILATCHOM Marcellin



