

N^o



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

Master de Recherche en Mécanique et Matériaux

Rapport de stage

Thème :

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux

d'emballage : cas de l'espèce musa sapientum

Présenté par :

Abdou Raïmi Olayimika Ichola ALAKOUKO

Encadré par

Hermann J. YANDJOU

Sous la direction de :

Prof. Akanho C. TOUKOUROU

Maitre de Conférences des Universités du CAMES

Enseignant-Chercheur à EPAC/UAC

DEDICACE

A mon très cher professeur

Chakirou Akanho TOUKOUROU

Je dédie ce mémoire.

Abdou Raimi ALAKOUKO

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail a été possible grâce aux multiples soutiens de certaines personnes envers lesquelles nous témoignons notre sincère gratitude. En particulier, nous aimerions remercier très sincèrement :

- ❖ le Professeur Akanho C. TOUKOUROU, Maître de Conférences des Universités CAMES, enseignant chercheur au département de Génie Mécanique et Energétique (GME) à l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), coordonnateur du Master Recherche Mécanique et Matériaux, notre maître de mémoire qui ne cesse de nous aider comme ces enfants depuis des années;
- ❖ monsieur Hermann J. YANDJOU, doctorant à l'Ecole Doctorale des Sciences De l'Ingénieur (ED-SDI) qui a accepté nous encadrer pour ces travaux ;
- ❖ toute l'équipe de recherche du projet Conception d'Emballages Alimentaires Biodégradables (EMBIO) ;
- ❖ toute l'équipe de recherche du Pôle Technologique de la promotion des Matériaux locaux (POTEMAT) ;
- ❖ le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS) pour le financement du projet EMBIO sans lequel ces travaux pouvaient ne pas voir le jour ;
- ❖ le professeur Emmanuel OLODO, coordonnateur du Master Recherche Génie des Matériaux et Structures pour ces conseils et sa disponibilité au cours de cette formation ;
- ❖ tous les enseignants et chercheurs de l'Ecole Doctorale des Sciences De l'Ingénieur.

Je ne peux m'en passer de remercier ma très chère collègue et amie Ir. Nawarath A. O. OKENIYI ainsi que tous les étudiants de la promotion 2018-2019 du Master Recherche Génie des Matériaux et Structures.

Je voudrais remercier les professeurs Mohamed M. SOUMANOU et Latif FAGBEMI ainsi que les doctorants Ir. Karol EKOUEJEN et Ir. Gratien KIKI pour leurs soutiens financier et moral au cours de cette formation.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont lu et qui liront ce travail, vos apports et corrections amélioreront la qualité scientifique.

RESUME

L'objectif de cette étude est la mise en œuvre et la caractérisation mécanique d'agro-matériaux pouvant servir d'emballage alimentaire à base des feuilles de *musa sapientum*. La caractérisation physique révèle que les teneurs en eau de l'amidon et des fibres de feuilles sont respectivement $10,44 \pm 0,51\%$ et $10,88 \pm 1,08\%$. L'absorption d'eau des feuilles et de l'amidon est respectivement $33,33 \pm 4,44\%$ et $76,67 \pm 4,44\%$. L'analyse granulométrique révèle que 99,93% des fibres ont une taille inférieure à 1mm. Les échantillons d'agro-matériaux ont été réalisés par moulage par compression et sont constitués de 10 à 25% d'amidon avec 50% d'eau. De la caractérisation mécanique, le module de Young en flexion et la résistance à la rupture en flexion varient respectivement entre 0,07 et 3,37 MPa puis 5,48 et 29,29 MPa. Ces deux paramètres croissent avec le taux d'amidon. En traction, les agro-matériaux obtenus sont fragiles et présentent de faible déformation à la rupture variant de 0,61% à 1,53%. La résistance à la rupture en traction de ces matériaux varie de 0,01 et 0,99 MPa et croit avec le taux d'amidon. Les meilleures formulations seraient celles comportant plus de 20% d'amidon avec 50% d'eau. Le procédé mise au point pourrait permettre d'élaborer des matériaux innovants pour emballage alimentaire biodégradable.

Mots Clés : *Musa sapientum*, Amidon, Agro-matériau, Caractéristique mécanique, Résistance, Rupture.

ABSTRACT

The aim of this study is the development and mechanical characterization of agromaterials that can be used as food packaging based on banana leaves. The physical characterization reveals that the moisture content of starch and fibers are respectively $10.44 \pm 0.51\%$ and $10.88 \pm 1.08\%$. The water absorption of the fibers and starch is $33.33 \pm 4.44\%$ and $76.67 \pm 4.44\%$ respectively. Particle size analysis reveals that 99.93% of the fibers are less than 1mm in size. The samples of agromaterials have been made by compression moulding and consist of 10 to 25% of starch with 50% of water. From mechanical characterization, Young's modulus in flexion and rupture strength in flexion are between 0.07 and 3.37 MPa and 5.48 and 29.29 MPa respectively. These two parameters increase with the starch rate. In traction, the agromaterials obtained are fragile and have low elongation at break between 0.61% and 1.53%. The tensile strength of these materials varies from 0.01 and 0.99 MPa and increases with the starch rate. The best formulations would be those containing more than 20% of starch with 50% of water. The process developed could allow the development of innovative materials for biodegradable food packaging.

Key words: Musa sapientum, Starch, Agro-material, Mechanical characteristics, Resistance, Rupture.

Table des matières

<i>DEDICACE</i>	<i>II</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>III</i>
<i>RESUME</i>	<i>IV</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>V</i>
<i>Table des matières</i>	<i>VI</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>X</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>XII</i>
<i>Liste des symboles ou sigles</i>	<i>XIII</i>
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	<i>1</i>
<i>CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	<i>3</i>
1.1. Introduction.....	4
1.2. Les matériaux composites.....	4
1.2.1. Généralités sur les matériaux composites.....	4
1.2.1.1. Définition.....	4
1.2.1.2. Matrice.....	5
1.2.1.3. Renfort.....	5
1.2.2. Classification des matériaux composites.....	6
1.2.2.1. Classification suivant la forme des constituants.....	6
1.2.2.2. Classification suivant la nature des constituants.....	7
1.2.3. Propriétés générales des matériaux composites.....	8
1.3. Les matériaux biosourcés.....	8
1.3.1. Généralités sur les matériaux biosourcés.....	8
1.3.2. Utilisation des matériaux biosourcé.....	9
1.3.3. Quelques exemples de matériaux biosourcés.....	10
1.3.3.1. Le bois.....	10
1.3.3.2. La paille.....	10

1.3.3.3. Le chanvre	11
1.3.3.4. La laine des animaux.....	12
1.3.3.5. La ouate de cellulose	13
1.4. Les agro matériaux.....	13
1.4.1. Généralités sur les agro matériaux	13
1.4.2. Domaines d'utilisation des agro matériaux.....	14
1.5. Les emballages alimentaires aux Bénin.....	15
1.5.1. Généralités sur les emballages.....	15
1.5.2. Les matériaux d'emballages alimentaires	16
1.5.3. Les feuilles végétales comme emballages alimentaires au Bénin	18
1.6. Mise en forme des agro matériaux	20
1.6.1. Généralité	20
1.6.2. L'extrusion	20
1.6.3. Le thermopressage.....	20
1.6.4. Le thermoformage	21
1.6.5. Le moulage.....	21
1.6.6. La finition	22
1.7. Caractérisation mécanique des agro matériaux	22
1.7.1. Caractéristiques mécaniques générales	22
1.7.2. Facteurs influençant les caractéristiques mécaniques des agro-matériaux.....	24
1.7.3. Loi de comportement des agro-matériaux.....	25
1.7.4. Essais de caractérisations mécaniques.....	27
1.7.4.1. Importance des essais de caractérisation	27
1.7.4.2. Essai de traction	27
1.7.4.3. Essai de flexion	28
1.8. Conclusion.....	28
CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES	30
2.1. Introduction.....	31
2.2. Matériaux	31
2.2.1. L'eau de gavage.....	31
2.2.2. L'amidon	31

2.2.3. Le feuilles de bananiers	32
2.3. Matériels.....	32
2.3.1. Matériel de synthèse des matières premières et d'élaboration du composite	32
2.3.2. Matériel de caractérisation physique.....	35
2.3.3. Matériel de caractérisation mécanique	36
2.4. Méthodes.....	37
2.4.1. Méthode de synthèse des matières premières	37
2.4.2. Méthode d'élaboration du composite	39
2.4.2.1. Formulation des échantillons.....	39
2.4.2.2. Désignation des échantillons	40
2.4.2.3. Procédure de réalisation des échantillons	40
2.4.3. Méthode de caractérisation physique.....	43
2.4.3.1. Teneur en eau (NF P 94-050)	43
2.4.3.2. Absorption d'eau (NF P 18 - 555).....	43
2.4.3.3. Distribution granulométrique (NF P94-056)	44
2.4.4. Méthodes de caractérisation mécanique.....	46
2.4.4.1. Essai de flexion	46
2.4.4.2. Essai de traction	47
2.5. Conclusion	48
<i>CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION</i>	<i>50</i>
3.1. Introduction.....	51
3.2. Caractéristiques physiques des matières premières	51
3.2.1. Teneur en eau.....	51
3.2.2. Absorption d'eau.....	51
3.2.3. Analyse granulométrique	51
3.3. Elaboration des agro-matériaux.....	52
3.3.1. Procédure de mise en œuvre des agro-matériaux.....	52
3.3.2. Différents matériaux obtenus.....	54
3.4. Caractéristiques mécaniques en flexion.....	54
3.4.1. Confection des éprouvettes de flexion.....	54
3.4.2. Présentation des résultats d'essais de flexion	55

3.4.3. Evolution du module de Young en flexion en fonction du taux d'amidon	55
3.4.4. Evolution de la résistance à la rupture en flexion en fonction du taux de liant	56
3.4.5. Corrélation entre les caractéristiques mécaniques en flexion	57
3.5. Caractéristiques mécaniques en traction	58
3.5.1. Confection des éprouvettes de traction	58
3.5.2. Résultats des essais de traction	58
3.5.3. Analyse des modes de ruptures	59
3.5.4. Evolution de la déformation à la rupture en fonction du taux d'amidon	59
3.5.5. Evolution de la résistance à la rupture en traction en fonction du taux d'amidon	60
3.5.6. Comparaison des résistances à la rupture en traction et en flexion	61
3.6. Conclusion	62
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	63
<i>ANNEXES</i>	64
Annexe A : Résultats des essais de détermination de la teneur en eau	65
Annexe B : Résultats des essais de détermination de l'absorption d'eau	65
Annexe C : Résultats de l'analyse granulométrique de la mouture de feuilles	66
Annexe D : Résultats des essais de Flexion 3 points	67
Annexe E : Résultats des essais de traction	69
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	70

Liste des figures

<i>Figure 1. 1: Matériau Composite</i> (Berthelot, 2013)	4
<i>Figure 1. 2: Types de matrices</i> (OLODO, 2017)	5
<i>Figure 1. 3: Types de renforts</i> (Gornet, 2011)	6
<i>Figure 1. 4: Bottes de pailles</i> (FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, 2015)	9
<i>Figure 1. 5: Panneaux de fibres de bois</i> (FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, 2015)	9
<i>Figure 1. 6 : La Paille : (a) Panneaux de pailles (b) Enduit terre/paille</i>	11
<i>Figure 1. 7: Le chanvre : (a) Eléments préfabriqués en béton de chanvre (b) Laine de chanvre</i>	12
<i>Figure 1. 8: La laine des animaux : (a) Echeveaux (b) Panneaux de laine</i>	12
<i>Figure 1. 9: La ouate de cellulose : (a) Les papiers de journaux (b) Panneaux en ouate de cellulose</i>	13
<i>Figure 1. 10: La paille, coproduit des céréales (ici de blé) est une agroressource lignocellulosique.</i>	14
<i>Figure 1. 11: Eprouvette de traction haltère (à gauche) et droite (à droite)</i>	28
<i>Figure 2. 1: Amidon de manioc séché</i>	31
<i>Figure 2. 2: Feuilles de bananier (Musa sapientum)</i>	32
<i>Figure 2. 3: Etuve</i>	33
<i>Figure 2. 4: Presse hydraulique</i>	33
<i>Figure 2. 5: Moule</i>	34
<i>Figure 2. 6: Balance électronique</i>	34
<i>Figure 2. 7: Plaque chauffante</i>	35
<i>Figure 2. 8: Burette graduée</i>	35
<i>Figure 2. 9: Pissette</i>	36
<i>Figure 2. 10: Dispositif d'essai de flexion</i>	36
<i>Figure 2. 11: Dispositif d'essai de traction</i>	37
<i>Figure 2. 12: Feuilles de Musa sapientum après séchage à l'étuve</i>	38
<i>Figure 2. 13: Feuilles broyées</i>	38

<i>Figure 2. 14: Echantillon avec 25% d'eau et 15% d'amidon</i>	39
<i>Figure 2. 15: Cuisson du mélange liant + fibre</i>	41
<i>Figure 2. 16: Dispositif d'élaboration des agro-matériaux</i>	42
<i>Figure 2. 17: Principe de l'essai de flexion 3 points</i>	46
<i>Figure 2. 18: Principe de l'essai de traction</i>	48
<i>Figure 3. 1: Distribution granulométrique</i>	52
<i>Figure 3. 2: Diagramme d'élaboration des échantillons</i>	53
<i>Figure 3. 3: Matériaux après moulage</i>	54
<i>Figure 3. 4: Eprouvettes de flexion trois points</i>	55
<i>Figure 3. 5: Module de Young en fonction du taux d'amidon</i>	56
<i>Figure 3. 6: Résistance à la rupture en fonction du taux d'amidon</i>	56
<i>Figure 3. 7: Evolution conjointe Module de Young -Résistance à la rupture</i>	57
<i>Figure 3. 8: Eprouvettes de traction</i>	58
<i>Figure 3. 9: Mode de rupture des agro-matériaux</i>	59
<i>Figure 3. 10: Déformation à la rupture en fonction du taux d'amidon</i>	60
<i>Figure 3. 11: Résistance à la rupture en traction en fonction du taux d'amidon</i>	61
<i>Figure 3. 12: Comparaison des résistances en Flexion et en Traction</i>	62

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des composites par type de matrices (Berthelot, 2013).....	7
Tableau 2: Caractéristiques mécaniques spécifiques des matériaux usuels élaborés sous forme massive (Berthelot, 2013)	23
Tableau 3: Caractéristiques mécaniques spécifiques des matériaux élaborés à base de fibres (Berthelot, 2013).....	24
Tableau 4: Désignation des échantillons.....	40
Tableau 5: Valeurs du Module de Young et de la résistance à la rupture en flexion.....	55
Tableau 6: Résultats des essais de tractions	58
Tableau 7: Comparaison des résistances en Flexion et en Traction.....	61
Tableau 8: Teneur en eau de la mouture de feuilles	65
Tableau 9: Teneur en eau de l'amidon	65
Tableau 10: Absorption d'eau de la mouture de feuilles.....	65
Tableau 11: Absorption d'eau de l'Amidon	65
Tableau 12: Analyse granulométrique.....	66
Tableau 13: Résultats du calcul des modules de Young (E).....	67
Tableau 14: Résultats du calcul des résistances à la rupture par flexion (σ_r)	68
Tableau 15: Résultats du calcul des déformations à la rupture par traction (ϵ_r)	69
Tableau 16: Résultats du calcul des résistances à la rupture par traction (τ).....	69

Liste des symboles ou sigles

Symboles ou Sigles	Significations
EMBIO	Emballage Biodégradable
POTEMAT	Pôle Technologique de la Promotion des Matériaux Locaux
E	Module d'élasticité longitudinale ou module de Young
τ	Contrainte à la rupture en traction
μ	Module de cisaillement ou d'élasticité transversale
ρ	Masse volumique
σ	Contrainte
ε	Déformation
ε_r	Déformation à la rupture en traction
ν	Coefficient de Poisson
σ_r	Contrainte à la rupture en flexion
Re	Limite d'élasticité
Rm	Résistance maximale à la traction
°C	Degré Celsius
H	Taux d'humidité
%Ab	Taux d'absorption d'eau
Kg	Kilogramme
G	Gramme
N	Newton
D	Distance entre les appuis de flexion ou les talons de traction
H	Epaisseur de l'éprouvette
L	Largeur de l'éprouvette
F	Force
Fr	Force de rupture

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *Musa sapientum*

INTRODUCTION GENERALE

L'urbanisation croissante de la population et le développement des filières agroalimentaires dans le monde ont conduit à un accroissement rapide de la demande en emballages alimentaires plastiques, notamment dans les pays en développement. Le Bénin grand consommateur, est constamment approvisionné en emballages plastiques provenant des pays asiatiques et de la sous-région où l'offre est abondante et moins chère (Hounhouigan, 2000).

Mais, l'utilisation des emballages plastiques présente de nombreux inconvénients. En effet, une fois utilisés, du fait de leur caractère non biodégradable, ils deviennent très encombrants dans la nature, posant ainsi de graves problèmes de pollution environnementale et la dégradation des terres. De plus, la pratique qui consiste à emballer des aliments chauds, prêts à être consommés dans les emballages plastiques est courante, ce qui engendre des risques de contaminations chimiques dont les effets sont préjudiciables à la santé des consommateurs à court ou à long terme. Ce sont là autant de raisons qui ont conduit le Bénin, à l'instar de certains pays de la sous-région, à voter la loi contre l'utilisation des emballages en sachets plastiques non biodégradable (Loi n°2017-39 portant interdiction de la production, importation, commercialisation et utilisation de sachets plastiques non biodégradables en République du Bénin).

Par ailleurs, au Bénin, plusieurs types d'emballages végétaux sont habituellement utilisés dans l'artisanat alimentaire : branches de palmier, branches de raphia, feuilles végétales etc. Le développement effréné de l'artisanat agroalimentaire au Bénin, impose une valorisation de ces emballages traditionnels. Une multitude de feuilles végétales utilisées comme emballages alimentaires ont été identifiées au Centre et au sud du Bénin.

En effet, selon les études de Gbesso G. et al. (2015), les espèces végétales *Thalia geniculata*, *Lasimorpha senegalensis*, *Tectona grandis* et *Musa sapientum* sont les espèces les plus utilisées par les populations comme emballage alimentaire. Mais en période de rareté des espèces suscitées, les populations font appel à des plantes comme *Alchornea cordifolia*, *Pouteria alnifolia*, *Anthocleista vogelii*, *Tachyphrynium braunianum* et *Icacina trichantha* (Gbesso, et al., 2015). Selon des études effectuées sur certaines espèces végétales, les espèces *Musa sapientum* et *Thalia geniculata* présentent des caractéristiques potentielles qui peuvent être utilisées pour confectionner

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

des emballages végétaux moulés de type pakistanais et respectueux des normes environnementales, contrairement aux emballages plastiques non biodégradables dont l'utilisation dans les villes africaines est source de grave pollution environnementale (ONZO, et al., 2014).

L'utilisation des feuilles végétales comme emballages alimentaires présente beaucoup d'avantages, aussi bien du point de vue économique, culturel qu'environnemental. Elle est une alternative aux emballages synthétiques non dégradables qui constituent un danger pour la santé publique et l'environnement. Il sera alors judicieux de produire des emballages alimentaires biodégradables et modernes à base de ces espèces végétales.

L'objectif du présent travail est de mettre en œuvre et de caractériser mécaniquement des agro-matériaux d'emballages à base de feuilles de *Musa sapientum*. Spécifiquement il s'agira de :

- déterminer les caractéristiques physiques des matières premières utilisées dans l'élaboration d'agro-matériaux d'emballage alimentaire ;
- réaliser diverses formulations pour les échantillons d'agro-matériaux ;
- déterminer les caractéristiques mécaniques des échantillons obtenus.

La première partie de ce travail est consacré à la revue de la littérature des travaux ayant rapport avec la caractérisation des agro-matériaux. Les matériaux, matériels et méthodes expérimentales utilisés durant les travaux sont abordés au deuxième chapitre. Les différents résultats et les discussions ont été présentés au dernier chapitre, puis une conclusion.

**Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de
l'espèce *musa sapientum***

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

1.1. Introduction

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs. Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de " nouveaux matériaux". En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt de nouvelles associations de matériaux (Guerira, 2005). L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait l'objet de notre étude.

Les généralités et quelques travaux antérieurs liés à cette étude feront l'objet de ce chapitre.

1.2. Les matériaux composites

1.2.1. Généralités sur les matériaux composites

1.2.1.1. Définition

Dans un sens large, le mot "composite" signifie "constitué de deux ou plusieurs parties différentes". En fait, l'appellation "matériau composite" ou composite est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif.

Un **matériau composite** est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément (Berthelot, 2013) .

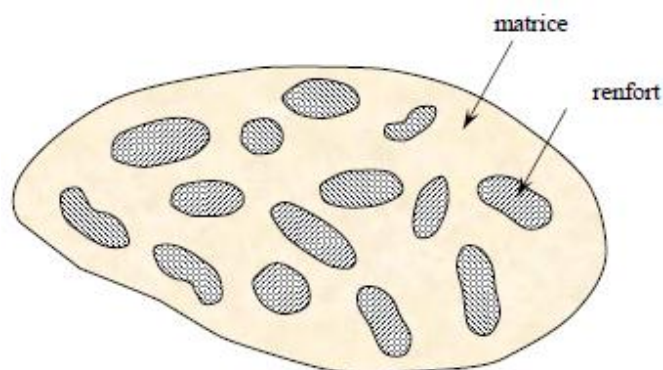


Figure 1. 1: Matériau Composite (Berthelot, 2013)

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

1.2.1.2. Matrice

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 (OLODO, 2017). La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée par la figure suivante.

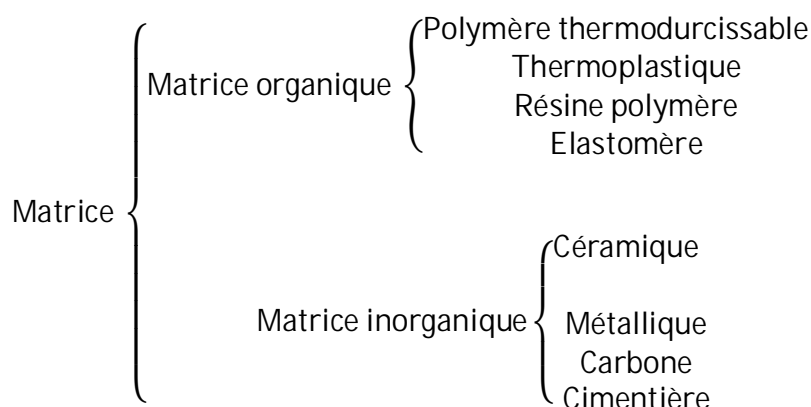


Figure 1. 2: Types de matrices (OLODO, 2017)

1.2.1.3. Renfort

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 : linéiques (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelles (tresse, tissus complexes, tissage tridirectionnel ou plus).

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible (Gornet, 2011). La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure suivante :

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

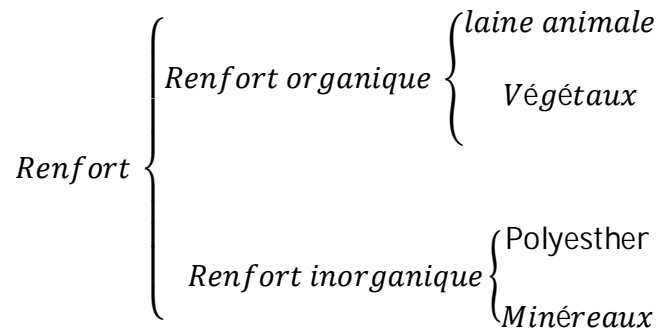


Figure 1. 3: Types de renforts (Gornet, 2011)

1.2.2. Classification des matériaux composites

1.2.2.1. Classification suivant la forme des constituants

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

❖ Composites à fibres

On parle de matériau composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan (Berthelot, 2013).

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- la nature des constituants,
- la proportion des constituants,
- l'orientation des fibres (Gornet, 2011) .

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques. Les fibres les plus utilisées sont les fibres naturelles, surtout les fibres végétales, car elles sont très disponibles. Leur utilisation valorise donc les ressources locales du pays, tout en respectant l'environnement. (Berthelot, 2013)

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

❖ Composites à particules

On parle de matériau composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse (Berthelot, 2013).

1.2.2.2. Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche (Berthelot, 2013). Certaines possibilités sont énumérées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Classification des composites par type de matrices (Berthelot, 2013)

Types de composites	Types de matrices	Renforts possibles
Composites à matrice organique	Organique (résine, charges)	<ul style="list-style-type: none">• Fibre minérales : verre, carbone, etc.• Fibre organiques : Kevlar, polyamides, etc.• Fibre métalliques : bore, aluminium, etc.
Composites à matrice minérale	Minérale (céramique)	<ul style="list-style-type: none">• Fibre métalliques : bore,• Particules métalliques : cermets,• Particules minérales : carbures, nitrures, etc.
Composites à matrice métallique	Métallique (alliages légers et ultra-légers d'aluminium, de magnésium, de titane)	<ul style="list-style-type: none">• Fibres minérales : verre, carbone, etc.• Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.• Fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200-300°C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000°C pour une matrice céramique (SOULAMA, 2014).

1.2.3. Propriétés générales des matériaux composites

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues (renfort) réparties dans une phase continue (matrice). Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue (Berthelot, 2013).

Les propriétés des matériaux composites résultent des propriétés des matériaux constituants, de leur distribution géométrique, de leurs interactions, etc. Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier : la nature des constituants et leurs propriétés, la géométrie du renfort, sa distribution, la nature de l'interface matrice-renfort. La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition, son orientation... La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse) (Guerira, 2005).

L'utilisation des matériaux composites s'est répandue très rapidement ces dernières années à tel point qu'ils sont devenus omniprésents dans notre vie de tous les jours à travers des applications dans des domaines aussi divers que l'industrie automobile, l'ameublement, la construction, l'agroalimentaire, la marine, l'aéronautique, la décoration, le sport et les loisirs et même la santé (SOULAMA, 2014).

1.3. Les matériaux biosourcés

1.3.1. Généralités sur les matériaux biosourcés

Un matériau biosourcé est un matériau composite issu en général des éléments d'origine animale ou végétale (avec d'autres liants). Ils constituent une famille de matériaux composites et possèdent des caractéristiques particulières.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Exemple :

- Bottes de paille

Après fauchage, la paille est en général conditionnée sous forme de bottes. Celles-ci peuvent être utilisées telles qu'elles comme isolant thermique.



*Figure 1. 4:*Bottes de pailles (FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, 2015)

- Laine de bois et panneaux de fibres de bois

La laine de bois et les panneaux en fibre de bois sont fabriqués grâce au défibrage du bois et une compression.



*Figure 1. 5:*Panneaux de fibres de bois (FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, 2015)

1.3.2. Utilisation des matériaux biosourcé

L'utilisation de matériaux biosourcés concourt significativement au stockage de carbone atmosphérique, à l'isolation thermique et à la préservation des ressources naturelles. C'est pourquoi elle est encouragée par les pouvoirs publics lors de la construction ou de la rénovation des bâtiments. Mais ils ne sont pas nécessairement totalement naturels et sans impact pour l'environnement. Ils peuvent parfois être transformés ou contenir des additifs chimiques en proportions variables (FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, 2015).

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Dans une démarche d'écoconception et de protection de l'environnement, il est donc préférable d'utiliser des matériaux biosourcés locaux et les moins transformés possibles, sous réserve qu'ils répondent aux caractéristiques pour lesquelles ils sont mis en œuvre.

1.3.3. Quelques exemples de matériaux biosourcés

1.3.3.1. Le bois

Le bois est depuis très longtemps utilisé dans la construction. Il permet la création de produits de construction comme les structures porteuses, le bardage, les menuiseries, les panneaux de bois, la laine de bois ou encore le bois en vrac. La laine de bois et les panneaux en fibre de bois sont fabriqués grâce au défibrage du bois. Ils sont généralement utilisés pour l'isolation des murs par l'intérieur et l'extérieur, l'isolation des combles perdus et l'isolation des rampants de toiture (FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, 2015).

1.3.3.2. La paille

La paille a servi d'armature dans le mortier de terre, appelé aussi bauge. Ce mortier est composé de terre franche (au sens de terre argileuse) ou d'argile, de paille hachée ou de foin, ou même de l'un et de l'autre et sert à faire l'aire - soit la chape - sur les planchers, ou le hourdage (remplissage) entre les poteaux des cloisons. Dans la construction en paille, la paille est employée compactée en bottes parallélépipédiques, réunies à la façon de briques.

Ils existent aussi des panneaux de paille compressée qui sont obtenus grâce à un procédé de compression de la paille à chaud. Un revêtement en carton est ensuite collé sur les deux faces. Ces panneaux sont utilisés pour l'isolation des murs par l'intérieur, l'isolation des plafonds ou l'isolation des rampants de toiture (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Alter énergies, 2011).

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*



(a)



(b)

Figure 1. 6 : La Paille : (a) Panneaux de pailles (b) Enduit terre/paille

1.3.3.3. Le chanvre

Le chanvre est une plante à croissance rapide nécessitant pas ou peu d'engrais. La fibre et la chènevotte sont les parties de la plante les plus utilisées pour le secteur du bâtiment. Elles permettent la création de produits de construction comme le mortier, l'enduit, le béton et la laine de chanvre, ou peuvent être directement utilisées en vrac. Les produits à base de chanvre sont transformés par un processus industriel ou en atelier et peuvent s'appliquer à tout type de construction, en travaux neufs ou en rénovation.

Le béton, l'enduit et le mortier de chanvre sont obtenus par le mélange de la chènevotte et d'un liant, le plus souvent à base de chaux. Le béton de chanvre peut être projeté avec une machine spécifique ou coulé entre banches. Il est généralement utilisé pour l'isolation répartie des murs (béton de chanvre), l'isolation des sols (béton de chanvre), revêtement de façade intérieur ou extérieur (enduit et mortier). Autre application du chanvre est la laine de chanvre. Issue de la fibre de la plante, elle se trouve sous différentes formes dont la laine souple, les panneaux semi-rigides ou en vrac (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Alter énergies, 2011).

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*



(a)



(b)

Figure 1. 7: Le chanvre : (a) Eléments préfabriqués en béton de chanvre (b) Laine de chanvre

1.3.3.4. La laine des animaux

La laine des animaux utilisée pour les matériaux de construction est un sous-produit de la filière ovine. Il s'agit en général de laine impropre pour l'industrie textile. Elle permet la création de produits de construction comme les rouleaux, les panneaux, la laine en vrac et les écheveaux. Cette filière très ancienne est en cours de restructuration depuis 2009 (FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, 2015).

Après lavage, la laine de mouton peut être conditionnée sous forme de panneaux ou rouleaux. Elle est utilisée pour l'isolation des murs, l'isolation des combles perdus et l'isolation des rampants de toiture.



(a)



(b)

Figure 1. 8: La laine des animaux : (a) Echeveaux (b) Panneaux de laine

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

1.3.3.5. La ouate de cellulose

La ouate de cellulose est produite à partir de journaux recyclés. Elle permet la création de produits de construction comme des panneaux semi-rigides ou peut être utilisée directement en vrac. La ouate de cellulose pour la construction est fabriquée en usine.

Elle est aussi utilisée pour la produit des objets d'emballage comme des cartons ou des d'autres emballages alimentaires. À ce jour, seulement 50 % des déchets de journaux sont recyclés. La filière pourrait donc encore se développer (FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, 2015).



(a)



(b)

Figure 1. 9: La ouate de cellulose : (a) Les papiers de journaux (b) Panneaux en ouate de cellulose

1.4. Les agro matériaux

1.4.1. Généralités sur les agro matériaux

On qualifie d'**agro-ressources** toutes les matières premières issues de l'agriculture quelle que soit leur destinée d'usage. Ceci concerne donc exclusivement les matières d'origine vivante cultivées par l'Homme, en aucun cas celles prélevées directement dans l'environnement. De ce fait elles sont considérées comme renouvelables (Agende de l'environnement et la maîtrise de l'énergie, 2014).

Selon la définition de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) : Les agro-ressources sont les végétaux qui fournissent des composés de base nécessaires à l'énergie, la chimie et les matériaux, notamment : des lipides et protéines obtenus à partir de colza, tournesol, soja, lin, etc. des glucides obtenus à partir de cultures céréalières (blé,

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

maïs, orge, avoine, seigle, etc.) et betteravières, des fibres lignocellulosiques provenant de résidus de cultures (paille, etc.), de plantes annuelles (chanvre, sorgho, etc.) et de la sylviculture (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Alter énergies, 2011).

Les **agro-matériaux** sont des matériaux composés à partir d'agro-ressources. Ils peuvent être réalisés d'un seul constituant ou d'un mélange, c'est le cas par exemple des agro-composites qui allient notamment des polymères biosourcés (amidon, cellulose..) et des fibres végétales (lin, chanvre...).



Figure 1. 10: La paille, coproduit des céréales (ici de blé) est une agroressource lignocellulosique.

1.4.2. Domaines d'utilisation des agro matériaux

Certaines cultures fournissent des agro-ressources destinées à un usage non alimentaire. Parmi celles-ci, par exemple, les cultures lignocellulosiques destinées à l'élaboration de biocarburants et bioproduits. Dans le secteur de l'énergie on parle notamment de cultures dédiées à la biomasse. Les cultures d'agro-ressources comestibles peuvent également être transformées en produits non alimentaires. C'est le cas par exemple des champs d'oléagineux (colza, tournesol ou jatropha) servant à l'élaboration de biocarburants de première génération.

Les agro-ressources nécessitent généralement une valorisation post-production par des procédés de transformations mécaniques et/ou chimiques avant d'être utilisées. Plus particulièrement, hormis les produits alimentaires, les bioproduits peuvent résulter d'une valorisation d'agro-ressources.

La production et la valorisation d'agro-ressources peut faire appel aux biotechnologies et faire intervenir des procédés de la chimie. Le concept de biomatériau tend à optimiser la

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

valorisation des agro-ressources par fractionnement des composants et l'obtention d'une gamme élargie de différents produits (biocarburants, agro-matériaux, biomolécules et ingrédients alimentaires) à partir d'une même matière première.

Quelques exemples de secteurs qui utilisent les agro-ressources dans divers domaines :

- ❖ Agroalimentaire : denrées et additifs (colorants, arômes naturels) pour l'élaboration de produits alimentaires
- ❖ Lubrifiants d'origine végétale (huile de colza) : graisses, huiles de chaîne, de décoffrage, fluides hydrauliques
- ❖ Pharmaceutique et Cosmétologie : détergents (agrotensioactifs)
- ❖ Energie : biocarburants (ou *agrocarburants*) de première génération à base de dérivés d'huiles végétales (colza, tournesol) ou d'éthanol (betterave, blé), de seconde génération à base de paille et autres composés lignocellulosiques, éventuellement de troisième génération (alco-carburants) à base de microalgues, biogaz et autres biocombustibles issus de coproduits agricoles
- ❖ Recyclage : engrais organiques, compost, bioconversion
- ❖ Matériaux : bioplastiques à base de matières plastiques agro-sourcés (maïs, patate douce, blé, canne à sucre, huile de ricin), caoutchouc, bio-polymères et bio-composites
- ❖ Papiers : cultures lignocellulosiques
- ❖ Parfumerie : huiles essentielles et rétinoïdes

1.5. Les emballages alimentaires aux Bénin

1.5.1. Généralités sur les emballages

L'emballage existait déjà il y a plusieurs centaines d'années, son rôle principal étant de contenir et de transporter des produits sans risque. L'emballage alimentaire est un emballage qui contient temporairement un aliment pour l'isoler de son environnement, le protéger, le conserver, le transporter ou pour le mettre en valeur dans un objectif commercial ou esthétique. La couche interne de cet emballage doit être « apte au contact alimentaire ». L'emballage peut montrer aussi l'information nutritionnelle et la date limite de consommation des aliments (Conseil de la transformation agro-alimentaire et des produits de consommation, 2010).

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

L'évolution de l'industrie de l'emballage a été fortement influencée par la révolution industrielle du milieu du XIXe siècle, accompagnée d'un exode rural qui marquera l'augmentation de la demande dans les villages, autrefois autosuffisants. Cette révolution industrielle a donc contribué à la croissance de comptoirs de vente de nourriture et de biens de consommation pour la nouvelle classe ouvrière en pleine émergence. L'évolution de l'ère industrielle a mené à la création de magasins à rayons, ce qui a créé le besoin d'informer le consommateur sur le produit et, plus tard, à différencier le produit pour mieux le vendre. De nos jours, la mondialisation du commerce a poussé l'emballage à répondre à d'autres besoins de préservation à plus longue durée. Par exemple, le transport de produits congelés ou frais sur de longues distances a été permis grâce au développement de nouveaux emballages qui répondent techniquement à ces besoins. Par ailleurs, la prise de conscience des populations à propos des dangers d'intoxication alimentaire, accompagnée d'une certaine volonté de détenir des produits frais de qualité supérieure, nous a permis d'assister à la naissance des emballages dits actifs et intelligents qui communiquent directement au consommateur l'information sur les caractéristiques du produit (Gbesso, et al., 2015).

Depuis l'apparition des politiques de développement durable, nous assistons à l'émergence des emballages dits « durables », « écologiques » ou « verts ». Ces emballages présentent plusieurs avantages comme la sauvegarde de l'environnement et la protection de la santé publique.

1.5.2. Les matériaux d'emballages alimentaires

Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour la fabrication des emballages alimentaires, comme le papier, le carton, les textiles, le fer-blanc, les alliages d'aluminium, le verre, les matières plastiques et les matières végétales. Certains emballages comme les briques alimentaires sont composites (ex : plastique/aluminium/carton), leur recyclage implique une procédure préalable de séparation de ces composants (Conseil de la transformation agro-alimentaire et des produits de consommation, 2010).

❖ Emballage en verre et en métal

Les emballages en verre et en métal figuraient auparavant parmi ceux qui étaient les plus utilisés dans l'industrie alimentaire, mais ils coûtent chers et sont plus lourds à transporter. Dès leur conception, les emballages en verre sont prévus pour résister à l'écrasement vertical, aux chocs

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

sur les lignes de conditionnement (physique ou thermique), au transport, ainsi qu'à la pression interne à l'intérieur du contenant. De plus, ces emballages sont recyclables à l'infini. Ils sont souvent utilisés pour les boissons. On retrouve généralement le verre pour les boissons alcooliques, comme le vin par exemple (Conseil de la transformation agro-alimentaire et des produits de consommation, 2010).

❖ Emballage en aluminium

L'aluminium est extrêmement fonctionnel en tant que matière d'emballage alimentaire, car il tolère des températures extrêmes. Par conséquent, il convient bien aux aliments qui ont besoin d'être surgelés, grillés, cuits ou simplement conservés au frais. Certains récipients sont suffisamment robustes pour contenir des quantités importantes d'aliments, tout en conservant la légèreté qui caractérise l'aluminium. L'inconvénient le plus important des emballages alimentaires en métal et aluminium est leur incompatibilité avec le réchauffement par micro-ondes.

Tout comme l'acier et le verre, l'aluminium présente un caractère indéfiniment et entièrement recyclable, sans altération de ses propriétés intrinsèques. Sa valorisation permet de limiter la consommation énergétique. Il est principalement utilisé comme emballage de boissons sucrées comme les sodas, les boissons énergétiques ou encore les sirops (Conseil de la transformation agro-alimentaire et des produits de consommation, 2010).

❖ Emballage papier/carton

Cet emballage est un dérivé de l'industrie du bois. Les fibres de cellulose sont recyclables jusqu'à sept fois, ce qui rend ce produit intéressant au point de vue environnemental mais également au plan des coûts.

Dans l'industrie alimentaire, nous utilisons habituellement une pâte à sulfate blanchie hautement collée (communément appelée SBS ou le food board). Généralement, un matériau mesurant moins de 300 micromètres d'épaisseur est appelé papier, alors qu'un matériau qui mesure plus de 300 micromètres est appelé carton. L'unité de mesure est la masse par unité de surface. Les cartons sont sensibles à l'humidité et changent de propriétés physiques en fonction de l'environnement externe (Conseil de la transformation agro-alimentaire et des produits de consommation, 2010).

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

❖ Emballages en plastique

Pour les plastiques, ce sont des polymères souvent dérivés du pétrole et leur prix varie énormément avec ce dernier. La plupart des plastiques utilisés en emballage sont des thermoplastiques commerciaux. Parmi les matériaux utilisés pour l'emballage alimentaire, nous retrouvons : le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide chlorure de polyvinyle, l'acétate de polyvinyle et le polyéthylène téréphtalate. Chaque plastique a ses propriétés et caractéristiques de perméabilité aux gaz et à l'humidité. Chaque matériau a un symbole utilisé communément dans l'industrie (PP, PETE, PVC, CPET, etc.). L'industrie du plastique a développé un sigle de recyclage avec un numéro pour les six plastiques les plus utilisés. Nous voyons de plus en plus d'emballages plastiques multicouches qui procurent plus de barrières aux aliments et permettent parfois plus de fonctionnalité. Ces produits ne sont actuellement pas recyclables dans la plupart des cas, surtout ceux qui présentent des mélanges avec des matériaux comme le papier ou l'aluminium (Conseil de la transformation agro-alimentaire et des produits de consommation, 2010).

❖ Les emballages composites et multicouches

Ce sont des emballages qui permettent de combiner les avantages de différents matériaux. En raison de la diversité des avantages et inconvénients propres à chaque emballage, on va chercher à conjuguer les propriétés complémentaires de chaque matériau afin de concevoir un emballage efficace.

Par exemple, en utilisant du carton, on se sert d'une ressource renouvelable, mais le manque d'étanchéité pose problème. On va donc associer au carton du plastique qui, lui, possède des propriétés d'étanchéité intéressantes (Conseil de la transformation agro-alimentaire et des produits de consommation, 2010).

1.5.3. Les feuilles végétales comme emballages alimentaires au Bénin

Au Bénin, l'utilisation des emballages plastiques date de très longues années et est une pratique courante. Situé à côté de deux (02) pays grands (le Nigéria et le Ghana) producteurs de pétroles et par ricochet de plastique, cette situation géographique met le pays dans un environnement où l'on consomme beaucoup ces produits parce que fabriqués à côté. L'offre en

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *Musa sapientum*

emballage plastique est abondante et moins chère et de ce fait, on utilise de plus en plus les plastiques pour divers emballages. En effet, la quantité des déchets plastiques dans les villes de Cotonou a été estimée à 4,4% de la masse des ordures ménagères et 10,1% de leur volume tandis que dans la ville Porto Novo, elle est estimée à 2,6 % de la masse et 7,8 % du volume des ordures ménagères (Gbesso, et al., 2015). Malgré les conséquences néfastes liées à leur utilisation, l'usage des sachets plastiques non biodégradables se renforce dans les zones urbaines et s'étend également vers les zones rurales à un rythme accéléré. Plusieurs études ont été effectuées sur les espèces végétales utilisées comme emballage alimentaire au Bénin.

D'après les études de Gbesso G. H. François et al. (2015), effectuée sur dix (10) espèces de feuilles végétales utilisées comme emballages alimentaire au Bénin, l'espèce *Thalia geniculata* a la plus grande fréquence de citation, 45 %, suivie de *Lasimorpha senegalensis*, de *Tectona grandis* et de *Musa sapientum* avec respectivement 35 % et 30 % des enquêtés. Les autres espèces telles que *Pouteria alnifolia*, *Alchornea cordifolia*, *Tachyphrynium braunianum*, *Icacina trichantha* sont faiblement citées par la population.

De plus, les études de Caroline ONZO (2014) sur la caractérisation physico-chimiques, phytochimiques et toxicité des espèces végétales utilisées comme emballages alimentaires en Afrique de l'Ouest montrent que les espèces *Tectona grandis*, *Musa sapientum*, *Thalia geniculata* et *Manihot esculenta* ne sont pas toxiques (ONZO, et al., 2014). L'évaluation de l'activité antimicrobienne de ces mêmes espèces a montré qu'elles peuvent être utilisées comme des agents antimicrobiens biologiques pour la conservation des denrées alimentaires emballées (ONZO, et al., 2015).

Tous ces résultats ajoutés à ceux de ONZO et al. (2012) selon lesquels les espèces *Musa sapientum* et *Thalia geniculata* présentent des caractéristiques mécaniques et physiques potentielles qui peuvent être utilisées pour confectionner des emballages, prouvent que les feuilles de *Musa sapientum* sont disponibles, ne sont pas toxiques et peuvent être utilisées pour produire des emballages alimentaires biodégradables.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

1.6. Mise en forme des agro matériaux

1.6.1. Généralité

La plupart des composites à matrice polymère ont jusque-là été développés sur des machines dédiées à l'élaboration des matériaux plastiques. Les plastiques sont mis en forme par un grand nombre de technologies, chacune étant adaptée au matériau à transformer. Ces machines sont conçues en fonction des propriétés physico-chimiques du polymère, mais également des caractéristiques recherchées pour le produit fini. Les technologies de mise en forme des plastiques sont: l'extrusion, l'extrusion gonflage, le calandrage, le thermoformage, le moulage par injection, l'injection multiphasée, l'injection soufflage, le moulage, le rotomoulage, etc.

La mise en forme des agro-matériaux est au début de son développement industriel. A l'exception des presses de thermopressage, les équipements spécifiques de mise en forme ne sont pas fabriqués en série comme pour les polymères synthétiques. Certains agro matériaux ont cependant été fabriqués et étudiés avec les équipements classiques. C'est le cas des matériaux développés dans notre travail où le procédé retenu est le thermopressage. Les principaux procédés et méthodes d'élaboration d'éco-matériau sont présentés dans les paragraphes suivants.

1.6.2. L'extrusion

L'extrusion est le plus important des procédés de mise en forme des polymères (agro polymère inclus) car elle présente l'avantage de fonctionner en continu. Ce procédé est soit utilisé pour la mise en forme d'un produit fini (film, plaque, profilé, tube, etc.), ou pour des étapes intermédiaires du procédé de fabrication : granulation ou encore polymérisation.

Le terme « extrusion » désigne généralement un système vis-fourreau équipé d'une filière dont les fonctions sont les suivantes : transport et malaxage de la matière, plastification ou fusion du polymère grâce à la chaleur apportée (apport thermique et dissipation visqueuse), et mise sous pression du polymère nécessaire à sa transformation, à son écoulement à travers une filière de mise en forme. L'extrusion monovis et l'extrusion bisis sont deux technologies qui coexistent (SOULAMA, 2014).

1.6.3. Le thermopressage

Le thermopressage est également appelé moulage par compression. Cette technologie est issue de l'industrie des composites à base de résines thermodurcissables. Le thermopressage

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

consiste en la fabrication de panneaux de particules par compression de matériaux dans un moule avec application de la chaleur en présence d'un liant éventuellement. C'est un procédé qui permet une mise en œuvre facile de biopolymères comme les protéines dont le comportement se rapproche de celui des thermodurcissables, mais aussi comme l'amidon ou encore les composites fibres lignocellulosiques/protéines comme le tourteau de tournesol (GENEAU, 2006)

Cependant, la présence d'eau dans les biopolymères impose plusieurs contraintes lors du moulage par compression. Pour pallier à ce problème, la matière est chauffée au-delà de 100°C, l'eau passe sous forme vapeur et tend à s'échapper. Si cette vapeur d'eau n'est pas évacuée au début du cycle, par exemple par une entrouverture du moule, des cloques risquent de se former à la détente du moule à chaud, quand la pièce n'explose pas. Pour diminuer la pression de vapeur, le moule peut être refroidi avant son ouverture, mais ceci ralentit considérablement les cadences de fabrication.

Pendant la compression à haute température, de nombreux processus physiques et chimiques sont mis en œuvre dans le matériau et se produisent de façon simultanée. Leur étude doit prendre en compte tous les phénomènes physiques locaux tels que le transfert de masse et de chaleur, en utilisant les stratégies de contrôle de la pression et de la température.

1.6.4. Le thermoformage

Le thermoformage est aussi une méthode de production de panneaux de particules en deux phases qui consiste à faire acquérir, sous l'action de la chaleur et de la pression, une forme particulière à un matériau fibreux précédemment pressé en plaque. Le matériau de base est ramolli sous l'effet de la chaleur puis mis en forme sur un moule de forme simple. Le thermoformage de plaques lignocellulosiques pré-pressées peut se faire sous pression, par drapage, sous ventilation libre ou par simple collage de feuilles. Cette technologie est souvent utilisée pour la mise en forme des panneaux intérieurs des portières des automobiles, des emballages alimentaires ou aussi des objets d'art (English , et al., 1997)

1.6.5. Le moulage

Le moulage est un procédé de mise en forme qui consiste à introduire dans un moule le mélange amorphe ou pulvérulent qui durcit ou se consolide en adoptant la forme de l'intérieur du moule. La consolidation se fait par simple séchage, par refroidissement (pour les matrices

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

thermoplastiques) ou par apport de chaleur ou d'un précurseur physique ou chimique qui amorce la réticulation des matrices thermodurcissables. Le moulage par compression et le moulage par stratification sont les procédés les plus adaptés au moulage des particules (HOUNDJA, 2019).

1.6.6. La finition

La finition des agro-matériaux intervient après le démoulage. Elle concerne les opérations visant :

- la stabilité dimensionnelle des panneaux (traitements contre la prise d'humidité),
- la mise au format par sciage, ponçage, découpe et conditionnement,
- les traitements post-formage tels que la peinture, l'enduction de vernis, de produits de protection contre les agressions biologiques, et le placage.

Les différentes opérations de finition effectuées sur notre matériau sont énumérées dans le chapitre suivant.

1.7. Caractérisation mécanique des agro matériaux

Dans cette partie du développement, les thèmes matériaux biosourcés et agro matériaux désignent les mêmes types de matériaux.

1.7.1. Caractéristiques mécaniques générales

Les matériaux présentant des caractéristiques mécaniques performants sont ceux qui possèdent un module élevé et une masse volumique faible (Berthelot, 2013). Il est évident également que l'élaboration de ces matériaux ne doit pas aboutir à un coût prohibitif, qui dépend d'ailleurs du domaine d'utilisation. Par exemple, dans le domaine de l'espace, de l'aviation, de hautes performances sont recherchées, et le coût du matériau a une incidence faible. Par contre, dans le domaine de l'automobile, l'amélioration des performances ne peut pas se faire au détriment du coût du produit fini. L'incidence du coût du matériau est élevée.

D'après le tableau 2 les performances spécifiques de matériaux usuels élaborés sous forme massive. Les matériaux traditionnels tels l'acier, les alliages d'aluminium, le bois, le verre ont des modules spécifiques comparables. Par contre, on constate que la contrainte spécifique du verre est nettement supérieure à celle de l'acier et des alliages d'aluminium. D'autre part, il est un fait établi que les contraintes à la rupture mesurées sur les matériaux sont bien plus faibles que les contraintes

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

théoriques. Cette différence est attribuée à la présence de défauts ou de microfissures dans les matériaux. Pour augmenter les valeurs des contraintes à la rupture, il est alors nécessaire de rechercher des processus d'élaboration qui conduisent à une diminution des défauts. Cet objectif est atteint en élaborant les matériaux sous forme de fibres de très faibles diamètres de quelques dizaines de micromètres. Il est évident qu'il est nécessaire de partir de matériaux qui ont déjà des caractéristiques spécifiques élevées, lorsqu'ils sont élaborés sous forme massive. Les caractéristiques mécaniques de matériaux composites élaborés à base de fibres sont reportées dans le tableau 3. Ces valeurs montrent nettement l'intérêt de l'élaboration des matériaux sous forme de fibres, relativement à la contrainte spécifique à la rupture.

Du fait de leurs faibles sections, les fibres ne peuvent toutefois être utilisées directement dans des applications mécaniques. D'où l'idée de les incorporer dans une matrice polymère pour constituer un composite à fibres. La matrice a alors diverses fonctions : lier les fibres entre elles, transférer les charges mécaniques aux fibres, protéger les fibres de l'environnement extérieur, etc. Ainsi est né un nouveau matériau, modulable et présentant des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Un des facteurs les plus importants qui déterminent les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite est la proportion relative de matrice et de renfort.

Tableau 2: Caractéristiques mécaniques spécifiques des matériaux usuels élaborés sous forme massive (Berthelot, 2013)

	Module de Young E (GPa)	Contrainte à la rupture σ_u (MPa)	Masse Volumique ρ (kg/m ³)	Module Spécifique $\frac{E}{\rho}$ (MN m/kg)	Contrainte Spécifique $\frac{\sigma_u}{\rho}$ (kN m/kg)
Acier	210	340–2 100	7 800	26,9	43–270
Alliages d'aluminium	70	140–620	2 700	25,9	52–230
Bois	30		390	33,3	
Verre	70	700-2 100	2500	28	280–840
Tungstène	350	1 100–4 100	19 300	18,1	57–210
Béryllium	300	700	1830	164	380

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Tableau 3: Caractéristiques mécaniques spécifiques des matériaux élaborés à base de fibres (Berthelot, 2013)

Fibre	Module de Young E (GPa)	Contrainte à la rupture σ_u (MPa)	Masse Volumique ρ (kg/m ³)	Module Spécifique $\frac{E}{\rho}$ (MN m/kg)	Contrainte Spécifique $\frac{\sigma_u}{\rho}$ (kN m/kg)
Verre E	72,4	3 500	2 540	28,5	1 380
Verre S	85,5	4 600	2 480	34,5	1 850
Carbone à haut module	390	2 100	1 900	205	1 100
Carbone à contrainte élevée	240	3 500	1 850	130	1 890
Kevlar (aramide)	130	2 800	1 500	87	1 870
Bore	385	2 800	2 630	146	1 100

1.7.2. Facteurs influençant les caractéristiques mécaniques des agro-matériaux

Comme cela a été expliqué précédemment, les propriétés par conséquent les caractéristiques des matériaux composites dépendent de la composition du matériau et des propriétés des constituants. Par exemple le pourcentage de liant, la teneur en eau des matières premières, la taille (granulométrie) des fibres, le pouvoir d'absorption d'eau des constituants influencent les caractéristiques mécaniques des agro-matériaux.

Dans le cas des agro-matériaux qui sont généralement des composites à fibre courtes, un des facteurs les plus importants, qui déterminent les caractéristiques mécaniques est la proportion relative de matrice et de renfort. Cette proportion peut être exprimée soit en fraction volumique (ou fraction en volume), soit en fraction massique (ou fraction en masse). Les fractions massiques sont plus faciles à mesurer lors de l'élaboration des matériaux. Par contre, les fractions volumiques interviennent directement dans les modèles théoriques décrivant le comportement mécanique des

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

matériaux (Dujardin, 2014) et (CHEVALIER, 1985). Dans le cas de cette étude le comportement des agro-matériaux sera étudié en variant la fraction massique du liant et/ou des fibres.

1.7.3. Loi de comportement des agro-matériaux

Les agro-matériaux à réaliser sont des matériaux composites biosourcés à fibre courtes. Le comportement de ces types de matériaux est assimilé à celui d'un matériaux isotrope (Berthelot, 2013), (Sidoroff, 1980) et (SOULAMA, 2014).

D'après la théorie de l'élasticité, la loi de comportement élastique des matériaux est la loi de Hooke généralisée :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} \quad (1)$$

$\underline{\underline{\sigma}}$ est le tenseur des contraintes. C'est un tenseur d'ordre 2 symétrique à 6 éléments indépendant.

$\underline{\underline{\varepsilon}}$ est le tenseur des déformations. C'est un tenseur d'ordre 2 symétrique à 6 éléments indépendant.

$\underline{\underline{C}}$ est le tenseur des rigidités. C'est un tenseur d'ordre quatre (4) comportant quatre-vingt-un (81) éléments.

Après des simplifications, on peut représenter le tenseur $\underline{\underline{C}}$ par une matrice symétrique à trente-six (36) éléments dont 21 sont indépendants (Sidoroff, 1980). Nous avons alors la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les caractéristiques du matériau sont les coefficients de la matrice C_{ij} .

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Pour un matériau isotrope, les propriétés mécaniques sont les mêmes dans toutes les directions quel que soit le changement de repère. Dans le cadre de l'élasticité linéaire, les caractéristiques d'un tel matériau sont fonctions uniquement de deux paramètres caractéristiques indépendants. Il s'agit des coefficients de Lamé λ et μ tels que :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu & 0 & 0 \\ & \text{Sym.} & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{Gornet, 2011}) \quad (3)$$

Dans certain cas, ces deux coefficients sont exprimés en fonction de deux autres : le module de Young E et le coefficient de Poisson ν (CHEVALIER, 1985).

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\mu + \lambda)} \quad (5)$$

μ est aussi appelé Module de cisaillement ou Module de Coulomb du matériau G et exprimé en fonction de E et ν .

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (6)$$

Nous remarquons que les deux paramètres principaux caractéristiques du comportement élastique d'un matériau isotrope sont E et ν .

En plus de ces paramètres, les résistances à la rupture (par extension et par compression) permettent aussi de connaître les limites d'écoulement des matériaux (CHEVALIER, 1985).

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

1.7.4. Essais de caractérisations mécaniques

1.7.4.1. Importance des essais de caractérisation

Afin de connaître les caractéristiques qui traduisent le comportement mécanique d'un matériau, on a recours à un certain nombre d'essais normalisés. Ces essais permettent de déterminer des valeurs des propriétés mécaniques que les ingénieurs utilisent pour diverses applications. On peut citer l'essai de flexion, l'essai de traction, l'essai de compression et l'essai de torsion (Mbacke, 2013). Dans le cas de cette étude, les essais de flexion 3 points et de traction ont été réalisés pour déterminer quelques caractéristiques mécaniques des agro-matériaux d'emballage.

1.7.4.2. Essai de traction

L'essai de traction est classiquement le plus pratiqué pour la caractérisation de la résistance mécanique d'un polymère. L'éprouvette normalisée, en forme d'haltère ou droite de dimensions précises, est placée entre deux mors et soumise à une force de traction unidirectionnelle, exercée par le déplacement de l'un des mors avec une vitesse constante. Les courbes de contrainte en fonction de la déformation sont tracées. Plusieurs types de comportement peuvent être ainsi caractérisés. Précisons que ces comportements type sont conditionnés par la vitesse de déformation et la température. L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- le module de Young, E , ou module d'élasticité longitudinale ;
- la limite d'élasticité (lorsqu'elle existe), R_e , qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- la résistance à la traction R_m ou σ_m , qui définit la limite à la rupture ;
- l'allongement à la rupture A , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture ;
- le coefficient de Poisson, qui donne la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique (GENEAU, 2006)

Dans le cas de cette étude, la résistance à la rupture, le mode de rupture et l'allongement à la rupture ont été évalués par les essais de traction uniaxiaux. Pour cela, les éprouvettes de traction sont des éprouvettes droites. L'éprouvette en forme d'haltères conduit généralement à des amorces

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

de fissures au voisinage de l'épaule de l'éprouvette, ce qui engendre des erreurs sur l'estimation des caractéristiques à la rupture du matériau (Berthelot, 2013).

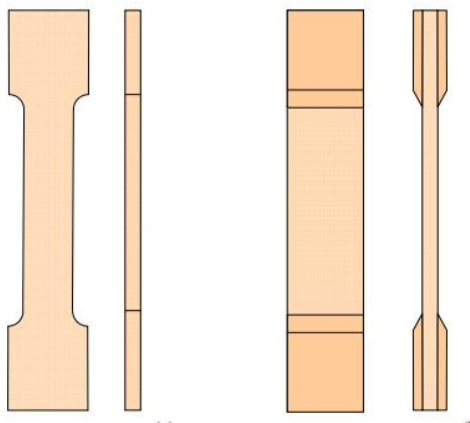


Figure 1.11: Eprouvette de traction haltère (à gauche) et droite (à droite)

1.7.4.3. Essai de flexion

L'essai de flexion, pratiqué en trois points et parfois en quatre, est souvent appliqué aux matériaux durs et fragiles et dont l'allongement à la rupture est faible, et en particulier aux composites dont la matrice est chargée de fibres comme le cas de cette étude. Les grandeurs calculées pour caractériser la résistance mécanique en flexion sont essentiellement la contrainte à la rupture en flexion et le module d'élasticité en flexion. De façon générale, les modules d'élasticité en flexion sont plus faibles que les modules d'Young mesurés en traction (GENEAU, 2006).

Ces deux types d'essai permettent de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux pour l'essentiel des usages ciblés des objets mis en forme. Les autres types d'essais, qui correspondent souvent à des applications spécifiques, n'ont pas été menés dans le cadre de ce travail.

1.8. Conclusion

Au terme de ce chapitre de présentation de la synthèse bibliographique, d'une part, les matériaux composites sont constitués d'une matrice ou liant et du renfort ou charge (particules ou fibres). La ressource ligno-cellulosique est employée comme charge dans un agro-matériau à base de matrice polymère. Cette ressource végétale constitue une ressource renouvelable, naturellement biodégradable, et dispose de nombreuses qualités techniques élevées. Les particules de feuille de

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Musa sapientum ont été choisies comme renforts à la matrice qui est constituée d'amidon, substance d'origine végétale. D'autre part, les différentes méthodes de mise en forme d'agro-matériau ont été parcourues et le moulage par compression qui est un procédé très productif et qui présente plusieurs avantages sera utilisé dans cette étude.

Enfin, ce chapitre permet également de parcourir les enjeux liés à l'utilisation des feuilles végétales comme emballage au Bénin et aussi les propriétés de ces feuilles végétales. De ces études l'espèce *Musa Sapientum* choisie n'est pas toxique, elle est disponible et présente des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques pouvant servir à la fabrication d'emballage biodégradable.

CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

2.1. Introduction

La précision dans la détermination des caractéristiques des matériaux dépend non seulement du matériel utilisé, mais aussi des différentes méthodes employées. Dans ce chapitre, les différentes étapes de l'élaboration des agro-matériaux ainsi que les matériels et méthodes utilisés pour les essais permettant de déterminer leurs caractéristiques physiques et mécaniques ont été exposés.

2.2. Matériaux

2.2.1. L'eau de gavage

L'eau de gavage est l'eau issue des forages du campus disponible en grande quantité qui est claire, limpide, sans saveur et à une température atmosphérique autour de 26°C à 28°C.

2.2.2. L'amidon

L'amidon est un glucide complexe (polysaccharide ou polyoside) composé de chaînes de molécules. Il s'agit d'une molécule de réserve pour les végétaux supérieurs et un élément courant de l'alimentation humaine. Il a été utilisé dans le cas de cette étude comme un liant pour la mise en forme des agro matériaux.

L'amidon utilisé est celui du manioc, issu de la production de la farine de manioc << *gari* >>. Il a été acheté chez les productrices de << *gari* >> de la commune d'Allada au Bénin. Ensuite, il a été séché pour obtenir la poudre de la figure suivante.



Figure 2. 1: Amidon de manioc séché

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *Musa sapientum*

2.2.3. Le feuilles de bananiers

Les feuilles fraîches de *Musa sapientum* utilisées ont été cueillies au campus d'Abomey-Calavi de l'Université d'Abomey-Calavi. Elles sont grandes, larges, entières et vertes. Elles sont généralement déchirées en franges suivant les nervures latérales perpendiculaires à la nervure principale qui est épaisse.



Figure 2. 2: Feuilles de bananier (Musa sapientum)

2.3. Matériels

2.3.1. Matériel de synthèse des matières premières et d'élaboration du composite

Les équipements utilisés pour faire la synthèse des matières premières et l'élaboration des agro-matériaux, se retrouvent aux départements de Génie Mécanique et Energétique (GME) et de Génie Civil (GC) de l'EPAC. Les principaux matériels utilisés sont présentés ci-après.

a) Etuve

L'étuve de marque « Memmert » et de portée maximale 200°C a assuré le séchage des matières premières et du composite.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*



Figure 2. 3: Etuve

b) Moulin

Il s'agit d'un moulin utilisé pour moudre les céréales. Il a servi à moudre les feuilles après les séchages.

c) Presse hydraulique

C'est une presse utilisée pour faire des essais de compression sur les matériaux et aussi pour la mise en forme. Il peut fournir jusqu'à 15 000 kN avec une précision de 5 kN.



Figure 2. 4: Presse hydraulique

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

d) Moule

Les agro-matériaux ont été réalisés dans le moule présenté à la figure suivante. Il permet de faire des matériaux de dimension 200mm x 300mm et une épaisseur maximale de 50mm.



Figure 2. 5: Moule

e) Balance électronique

La balance électronique de portée 65kg et de précision 1g a permis d'évaluer la masse des éprouvettes et les proportions des constituants.



Figure 2. 6: Balance électronique

f) Plaque chauffante

Il s'agit d'une plaque chauffante ordinaire utilisée dans les cuisines.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*



Figure 2. 7: Plaque chauffante

2.3.2. Matériel de caractérisation physique

L'analyse granulométrique a été faite au Laboratoire d'Etudes et de Recherche en Génie Civil (LERGC). Il s'agit donc, du matériel utilisé pour déterminer la teneur en eau et l'absorption d'eau des matériaux utilisés. Les principaux matériels utilisés sont :

- a) **Etuve** (*Figure 2. 3*)
- b) **Balance électronique** (*Figure 2. 6*)
- c) **Burette graduée**

Elle est présentée à la figure suivante. Elle a une capacité de 250 ml avec une précision de 2 ml.

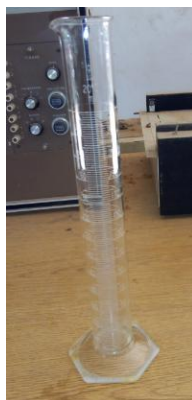


Figure 2. 8: Burette graduée

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

d) Pissette

Présentée à la figure suivante, elle a permis de prendre avec précision les quantités d'eau requises pour les essais.



Figure 2. 9: Pissette

2.3.3. Matériel de caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique des agro-matériaux est l'une des étapes importantes de cette étude. Pour ce faire, les éprouvettes d'essai de flexion trois points ont été réalisées avec les agro-matériaux élaborés. Les essais de flexion ont été réalisés sur le dispositif de la figure suivante :



Figure 2. 10: Dispositif d'essai de flexion

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Ce dispositif est muni d'un comparateur qui permet de lire les déformations de l'éprouvette selon les charges appliquées. C'est un comparateur de précision 0,01 mm.

Pour évaluer certaines caractéristiques en traction, le dispositif de la figure suivante a été utilisé pour caractériser les éprouvettes en traction.

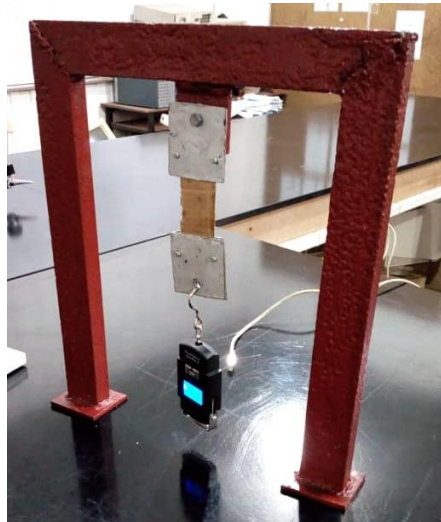


Figure 2. 11: Dispositif d'essai de traction

Ce dispositif est muni de talons qui permettent de limiter les contraintes dans les bords des éprouvettes. Il permet de faire des essais de rupture en traction. On peut déterminer la résistance à la rupture en traction, l'allongement à la rupture et aussi observer le mode de rupture des matériaux.

2.4. Méthodes

2.4.1. Méthode de synthèse des matières premières

Les matières premières utilisées dans l'élaboration des agro-matériaux de cette étude n'ont pas été utilisées directement dans le procédé. Elles ont subi des traitements.

➤ Amidon

Après séchage, la poudre obtenue a été séchée à l'étuve à 100 ± 5 °C pendant 24h pour faire évaporer totalement l'humidité.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

➤ Feuilles de *musa sapientum*

Les feuilles de *musa sapientum* ont été transformées en une mouture de feuilles sèches (**Figure 2. 13**) après une série de transformations citées ci-après :

- Premier séchage des feuilles au soleil ;
- Deuxième séchage à l'étuve pendant 24 h à 100 ± 5 °C (**Figure 2. 12**) ;
- Broyage au moulin ;
- Séchage de la mouture de feuille à l'étuve pendant 24 h à 100 °C.



Figure 2. 12: Feuilles de *Musa sapientum* après séchage à l'étuve



Figure 2. 13: Feuilles broyées

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

2.4.2. Méthode d'élaboration du composite

2.4.2.1. Formulation des échantillons

Le mélange utilisé pour la confection des agro-matériaux d'emballage est composé d'eau, de l'amidon et de la mouture de feuilles de bananier. Les pourcentages de ces constituants représentent un ensemble de paramètres fondamentaux caractérisant le matériau. Pour cela, le choix de la composition a été fait judicieusement.

Selon les études de Amen en 2009, le pourcentage de liant donnant des caractéristiques mécaniques meilleures à un matériaux à base de particule fibre se situe entre 10 et 15% (NENONENE, 2009). Pour cela, les pourcentages de liant utilisé au départ sont 5%, 10%, 15% et 20%. Lors de la réalisation des premiers échantillons, avec 5% de liant, on n'obtient pas un résultat acceptable. Il serait mieux alors de commencer par 10% pour aller à 25% d'amidon.

Le pourcentage d'eau qui permet d'avoir des meilleurs caractéristiques mécaniques dans le cas d'un matériau à base de particule de fibre est de 27% pour un procédé de thermocompression (SOULAMA, 2014) et (NENONENE, 2009). Pour le cas des agro-matériaux à base de feuilles de bananier, avec 25% d'eau et 15% d'amidon, le matériau n'est pas compact après le moulage (Figure 2. 14)



Figure 2. 14: Echantillon avec 25% d'eau et 15% d'amidon

Selon les études de Amit Ramdhonee et Pratima Jeetah en 2017, une humidité relative de 50% est conseillée (norme ISO 187) pour la mise en œuvre des papiers à partir de la cellulose

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

(Amit, et al., 2017). Après des essais, un pourcentage de 50% a été utilisé pour la réalisation des matériaux. Le pourcentage de fibre est calculé en fixant les pourcentages d'amidon et d'eau.

2.4.2.2. Désignation des échantillons

Plusieurs types d'échantillons ont été réalisés. Donc pour pouvoir les reconnaître, une nomenclature a été faite selon la constitution.

Tableau 4: Désignation des échantillons

Composition			Désignation
<i>Amidon</i>	<i>Eau</i>	<i>Fibre de bananier</i>	
10%	50%	40%	A10M40E50
15%	50%	35%	A15M35E50
20%	50%	30%	A20M30E50
25%	50%	25%	A25M25E50

2.4.2.3. Procédure de réalisation des échantillons

Les agro-matériaux qui font l'objet de cette étude ont été élaborés par moulage par le dispositif de la Figure 2. 16. Les différentes étapes de l'élaboration sont les suivantes :

a. La préparation du liant

Le mélange eau + amidon est chauffé à une température comprise entre 70 et 80 °C pendant une durée de cinq (5) minutes. Dans cette plage de température, on observe la gélatinisation de l'amidon (BEN HAJ, 2015). Nous obtenons donc une colle d'amidon.

b. La cuisson du mélange fibre + liant

La mouture de feuilles est introduite dans la colle. Le mélange est continuellement remué et maintenu à une température variant entre 70 °C et 80 °C pendant une durée de dix (10) minutes.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*



Figure 2. 15: Cuisson du mélange liant + fibre

c. Le moulage

Après la cuisson, le matériau est dans une forme quelconque. Cette étape permet de lui donner une forme précise. Dans ce cas, le matériau a été moulé avec le dispositif de la figure ci-dessous avec une force entre 10 et 15kN pendant moins de cinq (5) minutes (Kpajouda, 2019).

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

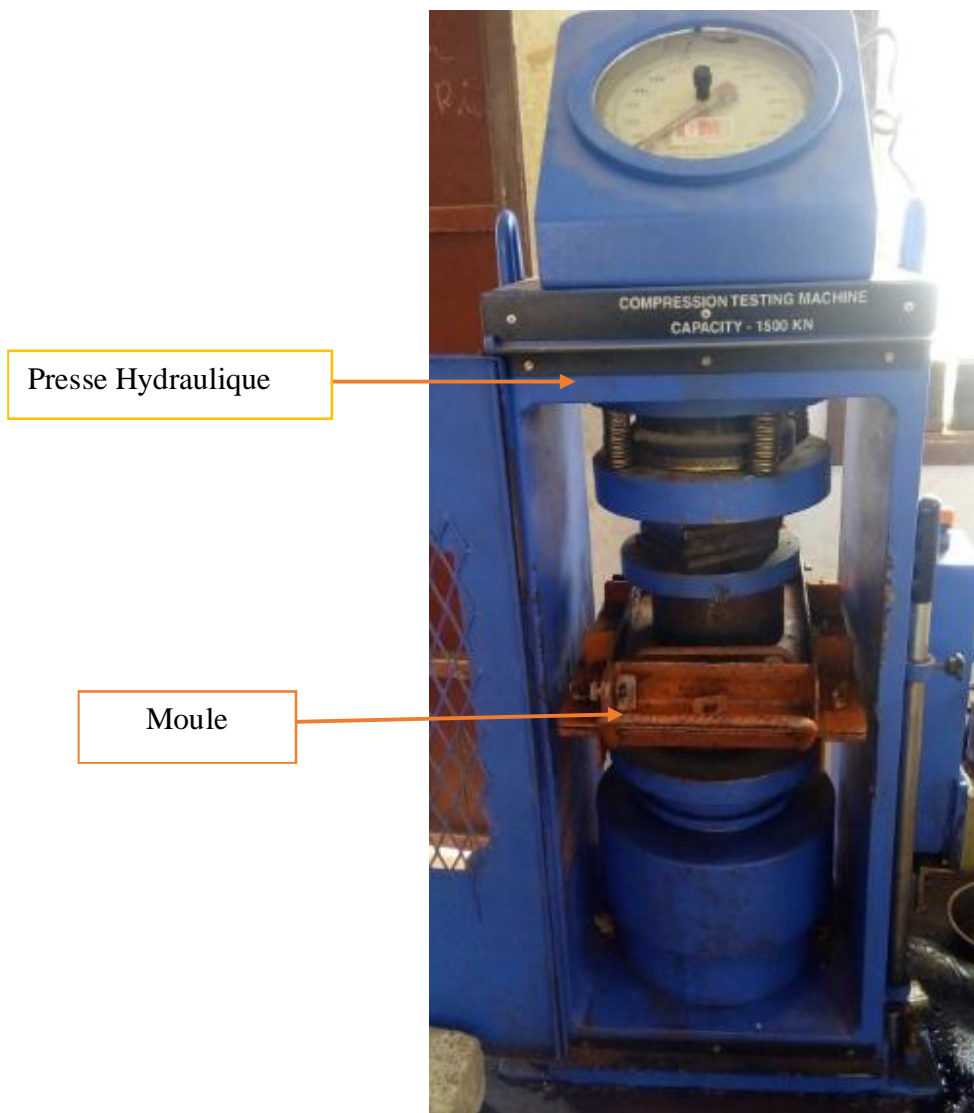


Figure 2. 16: Dispositif d'élaboration des agro-matériaux

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

d. Le séchage

C'est l'étape de finition de la mise en forme des agro-matériaux d'emballages moulés. Elle se fait en deux étapes. Le premier séchage à l'étuve à une température de 70 °C pendant 2 heures et le second séchage dans l'étuve à 100°C pendant 2 heures.

2.4.3. Méthode de caractérisation physique

2.4.3.1. Teneur en eau (NF P 94-050)

La teneur en eau ou le taux d'humidité d'un matériau est la quantité d'eau que ce matériau contient par unité de masse.

➤ Matériels

- étuve ;
- une balance électronique.
- un bocal

➤ Méthodologie

- Tarer un bocal, soit T.
- Mettre l'échantillon dans un bocal et peser ; soit m_1 cette masse ;
- Mettre ensuite l'échantillon dans le bocal à l'étuve à une température de 105°C et pendant une durée de 24h ;
- Peser à nouveau l'échantillon + le bocal ; soit m_2 cette masse ;

➤ Expression du résultat

Le taux d'humidité est donné par l'expression :

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (7)$$

2.4.3.2. Absorption d'eau (NF P 18 - 555)

L'essai a pour but de déterminer le potentiel d'absorption d'eau des matériaux dans un milieu à fort humidité.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

- Matériels
 - Une étuve ;
 - Une éprouvette graduée ;
 - Un bocal marqué d'un trait de jauge ;
 - Une balance de précision 1 g ;
- Méthodologie
 - Mettre le matériau à l'étuve à une température de 105°C et pendant 24 h ;
 - Prélever une masse de l'échantillon dans le bocal telle qu'il occupe environ la moitié du volume du bocal ;
 - Compléter l'eau distillée jusqu'au trait de jauge, peser m_0
 - Suivre dans le temps le niveau de l'eau dans le bocal et après une diminution perceptible, compléter l'eau jusqu'au trait de jauge ;
 - Peser m_1 .
- Expression du résultat

Le taux d'absorption d'eau est alors donné par :

$$Ab\% = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (8)$$

2.4.3.3. Distribution granulométrique (NF P94-056)

L'analyse granulométrique est un essai consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs tailles. L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

➤ Matériel nécessaire

- une série de tamis ;
- une étuve avec thermostat ;
- des balances de portées allant jusqu'à 30 kg ;
- des plateaux ;
- des brosses métalliques

➤ Mode opératoire

- déterminer le diamètre D du plus gros élément ;
- prélever une masse M d'échantillon telle que $M=0,2D$ (M en kg et D en mm) ; en pratique on choisit M telle que $0,2D \leq M \leq 0,6D$.
- sécher le matériau à l'étuve avec une température maximale de 105°C ;
- placer l'échantillon sur la passoire de plus grand diamètre ;
- tenir le tamis d'une main, légèrement inclinée, et l'agiter de long en large en la frappant à chaque oscillation contre l'autre main à la cadence de 125 coups environ par minute. Tous les 25 coups environ tourner le tamis horizontalement d'un angle de 90° ; frapper quelques coups secs contre la monture au besoin pour faire sauter 2 ou 3 fois les gravillons avant de continuer l'agitation horizontale ;
- arrêter le tamisage lorsqu'aucun grain ne traverse plus le tamis pendant une période de 25 secousses ;
- recueillir le tamisât sur la passoire immédiatement inférieure et recommencer l'opération et ainsi de suite ;
- peser les refus sur chaque tamis et le tamisât sur le fond ; on appelle refus sur un tamis le poids de matériau retenu sur ce tamis et tamisât le poids de matériau passant à travers le même tamis ;
- vérifier que la somme des poids obtenus (refus cumulés plus dernier tamisât) ne diffère de plus de 2% du poids initial de l'échantillon ;

➤ Expression des résultats

Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisâtes cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe de la distribution granulométrie en portant les ouvertures des tamis en

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. La courbe est tracée de manière continue et ne peut passer rigoureusement par tous les points.

2.4.4. Méthodes de caractérisation mécanique

2.4.4.1. Essai de flexion

➤ Principe de l'essai

On détermine la déformation d'un barreau rectangulaire (éprouvette) reposant sur deux appuis par l'intermédiaire d'un poinçon appliqué à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante. C'est la méthode la plus couramment rencontrée. Elle fait l'objet des normes ISO-178, ASTM D790, D5934 et D5943.

Le mode opératoire est simple mais certaines conditions doivent être respectées. L'éprouvette, est placée sur un montage spécifique adapté à une machine de traction ou un dispositif de flexion, avec une distance entre les appuis D égale à 16 fois l'épaisseur h . La vitesse v du poinçon est faible, de l'ordre de 1 mm/min. Lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser une éprouvette normalisée, il convient de respecter le rapport longueur/épaisseur $L/h=20$ (SOULAMA, 2014).

On enregistre la courbe de la flèche y en fonction de la force F à partir de laquelle il est possible de calculer la contrainte à la rupture, le module d'Young et le module cisaillement.

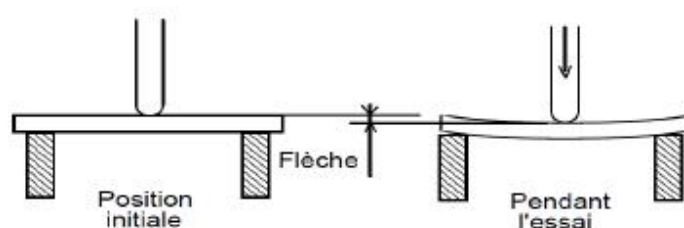


Figure 2. 17: Principe de l'essai de flexion 3 points

➤ Géométrie des éprouvettes

Les éprouvettes de flexion utilisées sont parallélépipédiques de dimensions 150 x 50 mm (SOULAMA, 2014) avec des épaisseurs variant de 3 à 7 mm.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

➤ Expression des résultats

Les différents paramètres déterminés après cet essai sont :

- Le module de Young $E = \frac{F.x.(3D^2 - 4x^2)}{4.b.h^3.y}$ (FANCHON, 1998) **(9)**

- La contrainte à la rupture en flexion $\sigma_r = \frac{3.F_r.D}{2.b.h^2}$ (NENONENE, 2009) **(10)**

Fr : La force de rupture par flexion ;

F : La force appliquée au cours de l'essai ;

X : Le point où la mesure de y a été prise.

2.4.4.2. Essai de traction

➤ Principe de l'essai

La charge est généralement appliquée sur les têtes de l'éprouvette par l'intermédiaire de mâchoires auto-serrantes, de manière à assurer une répartition homogène des contraintes dans la partie utile de l'éprouvette. Elle est habituellement mesurée à l'aide d'une cellule de charge adaptée à la machine ou le dispositif d'essai. Les déformations peuvent être mesurées soit à l'aide d'extensomètres, soit à l'aide de jauges d'extensométrie. Les extensomètres fixés mécaniquement à l'éprouvette sont faciles d'emploi. Il est nécessaire de veiller toutefois à l'absence de glissement lors de leurs utilisations. Les jauges d'extensométrie, de mise en œuvre plus délicate, sont utilisées pour des mesures plus précises des déformations. Il est nécessaire également de bien veiller à ce que, lors d'un essai de traction longitudinale, la direction de la charge appliquée coïncide réellement avec la direction des fibres ou de la chaîne. Le principe d'essai de traction est schématisé par la figure suivante.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

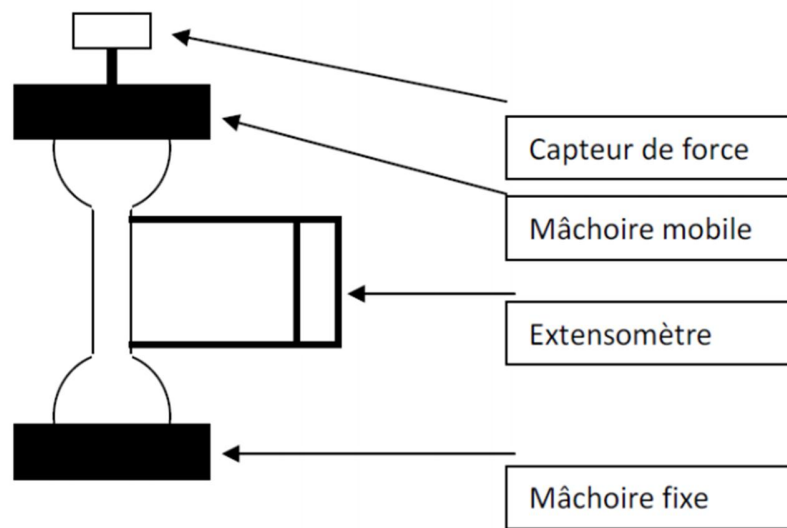


Figure 2. 18: Principe de l'essai de traction

➤ Géométrie des éprouvettes

Selon la norme ISO-527, les essais de tractions sur les matériaux composites renforcés par des fibres doivent être faits avec de éprouvettes droites. Les éprouvettes utilisées sont droites de dimensions environs 30 x 100 mm (YANDJOU, 2012).

➤ Expressions des résultats

Les différents paramètres déterminés après cet essai sont :

- Résistance à la rupture $\tau = \frac{F}{S}$ (ONZO, et al., 2014) (11)

- La déformation à la rupture $\varepsilon_r = \frac{L - L_0}{L_0}$ (Mercier, et al., 2002) (12)

- Mode de rupture : Par observation de l'éprouvette après la rupture.

2.5. Conclusion

Les matériaux, les matériels et les méthodes utilisés pour les caractérisations physiques et mécaniques des matières premières et des agro-matériaux réalisés ont été exposés dans ce chapitre. Les différentes méthodes d'élaboration et de préparation utilisées pour la confection des matériaux ont été également décrites dans ce chapitre. Tous ces méthodes et matériels permettront de pouvoir élaborer

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

un processus de confection des agro-matériaux d'emballage. Toutefois, les dispositifs expérimentaux utilisés pour réaliser les essais de flexion et de traction peuvent être remplacés par une (des) machine(s) d'essais mécaniques sans influencer les caractéristiques des matériaux.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

3.1. Introduction

L'ensemble des matériels et méthodes utilisés ont permis d'obtenir une multitude de résultats. Dans ce chapitre, ceux obtenus à la suite des caractérisations physiques de nos matières végétales et ceux issus de la confection des éprouvettes après élaboration seront exposés. En outre, la présentation et l'analyse des résultats des essais de flexion trois points pourront permettre de tirer des conclusions fiables sur les propriétés mécaniques et la méthode de mise en œuvre des agro-matériaux d'emballages fabriqués.

3.2. Caractéristiques physiques des matières premières

3.2.1. Teneur en eau

Après les essais, la teneur en eau de l'amidon est de $10,438 \pm 0,507$ % et celle de la mouture de feuilles de bananier est de $10,881 \pm 1,079$ %. De ces résultats, on retient que les feuilles de *Musa sapientum* contiennent plus d'humidité que l'amidon utilisé.

Par ailleurs, d'après les résultats de LAOUINI, la teneur en eau des grains d'amidon est généralement de 10% (LAOUINI, 2011). De plus, la teneur en eau des amidons examinés par Maldonado Alvarado est comprise entre 6 et 15% (Alvarado, 2014). Ces résultats confirment les caractéristiques trouvées pour l'amidon utilisé.

3.2.2. Absorption d'eau

Des essais de détermination du pouvoir d'absorption d'eau des matières premières, il en ressort que l'amidon peut absorber jusqu'à $76,67 \pm 4,44$ % d'eau tandis que cette caractéristique est de $33,33 \pm 4,44$ % pour la mouture de feuilles.

3.2.3. Analyse granulométrique

Cet essai a été réalisé au Laboratoire d'Etude et de Recherches en Génie Civil (LERGC). Pour ce fait, une masse $m=300g$ a été prélevée et étuvée à $100^{\circ}C$ pendant 24h. Ensuite, elle est passée dans une série de tamis.

La courbe de distribution granulométrique de la mouture de feuilles est représentée à la figure ci-dessous.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

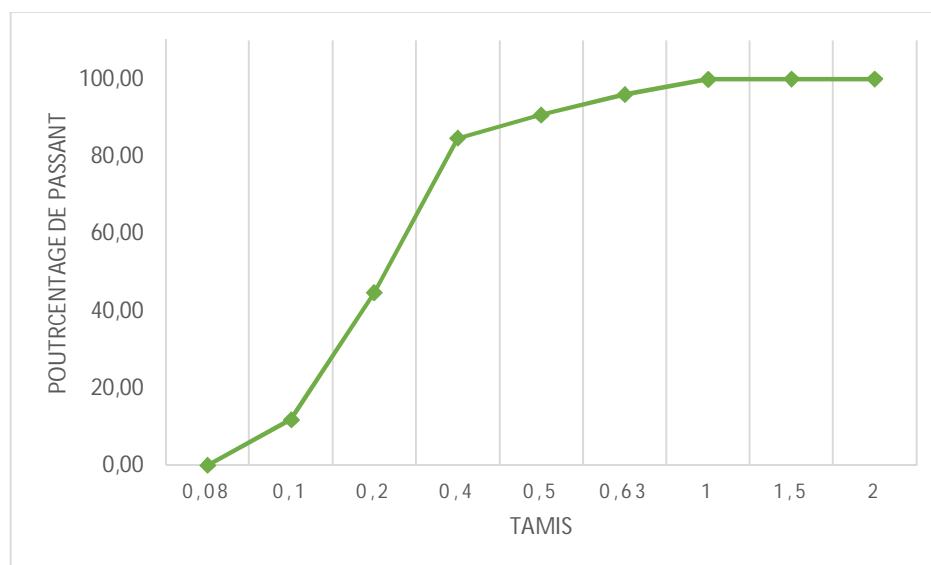


Figure 3. 1: Distribution granulométrique

Il ressort de cette analyse que la mouture de feuilles utilisée contient des particules dont 99,93% ont une taille inférieure à 1 mm. Cette distribution est plus adaptée à la production de feuilles ou de cartons dans l'industrie.

3.3. Elaboration des agro-matériaux

3.3.1. Procédure de mise en œuvre des agro-matériaux

La mise en œuvre est l'une des étapes indispensables à la réalisation des agro-matériaux d'emballage. Après avoir testé plusieurs procédés de mise en forme des agro-matériaux, nous avons retenu le procédé de moule à froid par compression. Les différentes étapes du procédé de mise en œuvre retenu sont dans la figure suivante.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

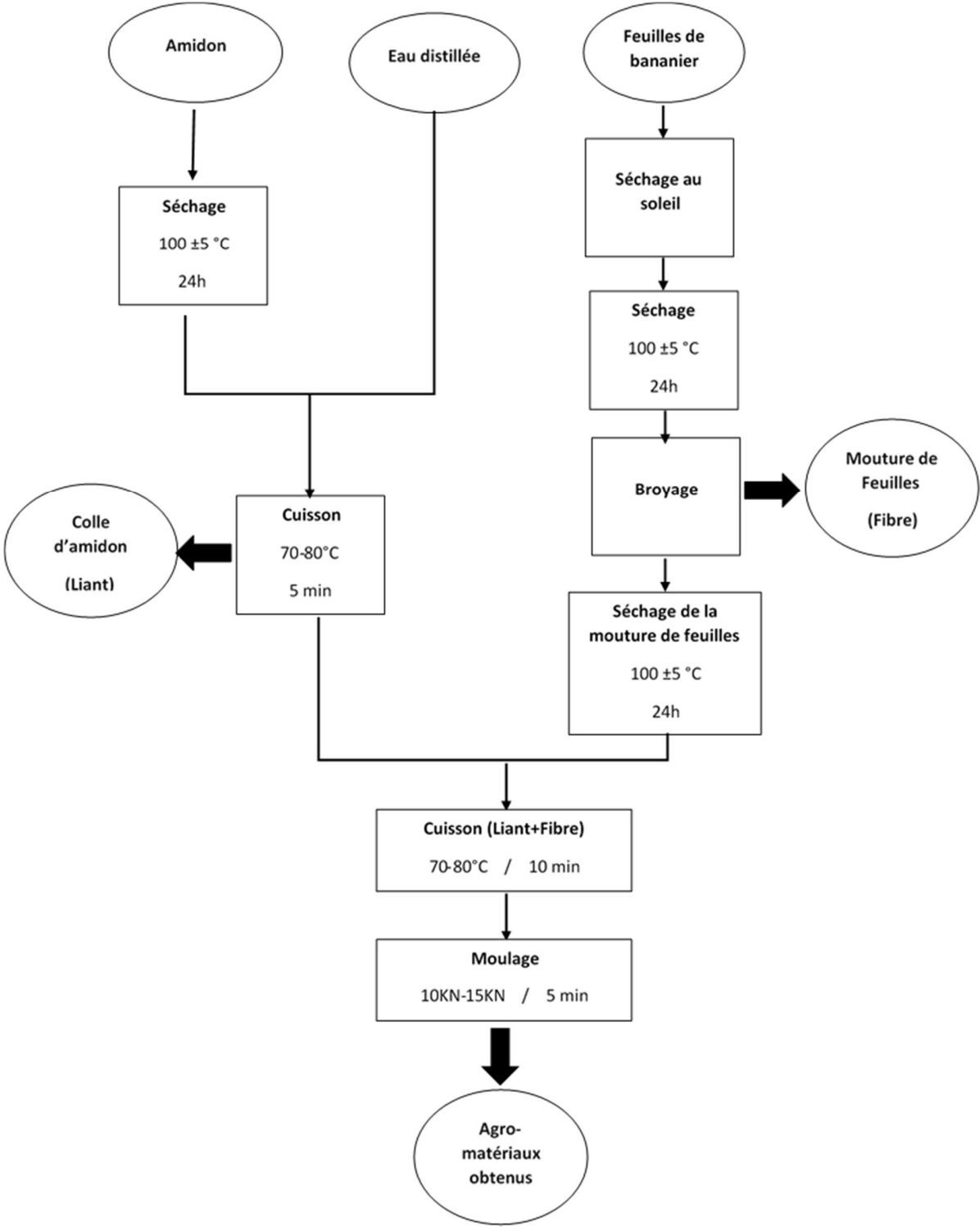


Figure 3. 2: Diagramme d'élaboration des échantillons

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

3.3.2. Différents matériaux obtenus

Avec la méthode de mise en œuvre obtenue, les différents types de matériaux obtenus selon les différentes formulations retenues sont présentés ci-dessous.



A: A10M40E50 B: A15M35E50 C: A20M30E50 D: A25M25E50

Figure 3. 3: Matériaux après moulage

Avec le matériel utilisé, ce procédé permet d'avoir des panneaux d'épaisseur variant entre 3mm et 7mm. On remarque qu'à partir d'un pourcentage de 20% d'amidon, la texture est plus continue et le matériau n'est pas friable. On peut conclure qu'un pourcentage d'au moins 20% d'amidon serait nécessaire pour avoir de bons matériaux d'emballage avec les feuilles de bananier broyées. L'analyse des résultats d'essais de flexion permettra de mieux décider.

3.4. Caractéristiques mécaniques en flexion

3.4.1. Confection des éprouvettes de flexion

La première étape de la caractérisation mécanique d'un matériau est la confection des éprouvettes. Ces dernières doivent respecter des normes et avoir des dimensions précises. Après la confection des agro-matériaux, les plaques ont été découpées pour avoir les éprouvettes d'essais de flexion trois points. Elles sont présentées à la figure suivante.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*



Figure 3. 4: Eprouvettes de flexion trois points

3.4.2. Présentation des résultats d'essais de flexion

Les essais de flexion réalisés ont permis de déterminer le module de Young E et la résistance à la rupture σ_r en flexion des agro-matériaux. Les valeurs des modules de Young et des résistances à la flexion sont dans le tableau suivant.

Tableau 5: Valeurs du Module de Young et de la résistance à la rupture en flexion

Matériaux	A10M40E50	A15M35E50	A20M30E50	A25M25E50
E (MPa)	0,07	0,20	1,15	3,37
σ_r (MPa)	5,48	9,25	26,23	29,29

Le module de Young et la résistance à la rupture des agro-matériaux varient respectivement entre 0,07 et 3,37 MPa puis 5,48 et 29,29 MPa.

3.4.3. Evolution du module de Young en flexion en fonction du taux d'amidon

En utilisant les valeurs du *Tableau 5*, on peut tracer l'évolution du module de Young en fonction du taux d'amidon dans le matériau. La figure suivante présente l'évolution du module de Young avec le taux d'amidon.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

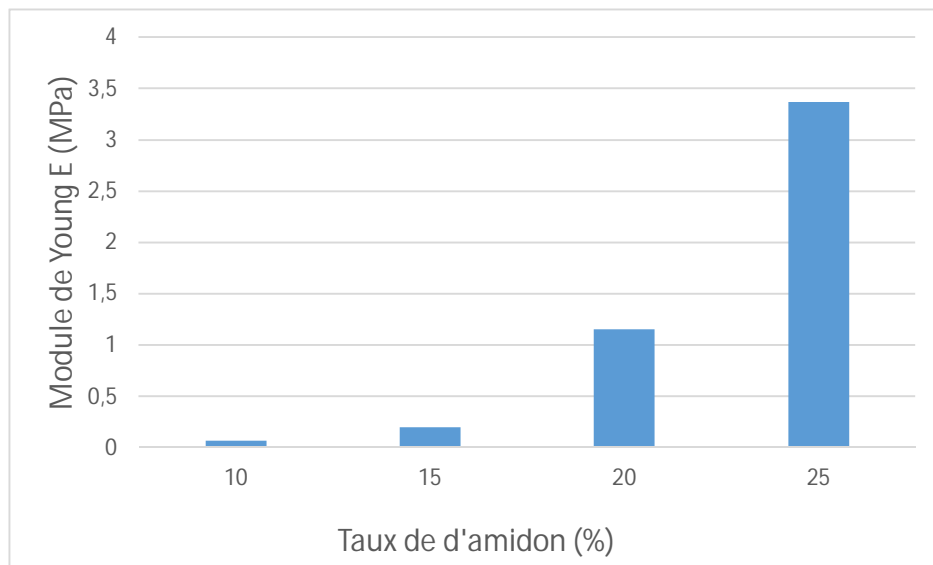


Figure 3. 5: Module de Young en fonction du taux d'amidon

On constate que le module de Young croit avec le taux d'amidon. De plus, entre un taux d'amidon de 20% et 25%, il y a une montée remarquable de E, une augmentation de 193% de E.

3.4.4. Evolution de la résistance à la rupture en flexion en fonction du taux de liant

De la même manière, l'évolution de résistance à la rupture en flexion en fonction du taux d'amidon est présentée sur la figure 3.6.

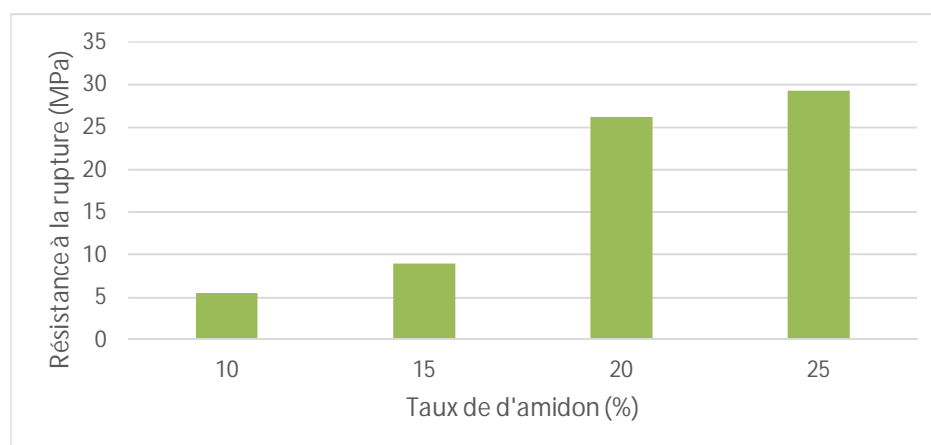


Figure 3. 6: Résistance à la rupture en fonction du taux d'amidon

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

On constate que la résistance à la rupture en flexion croit avec le taux d'amidon. Par ailleurs, entre les taux d'amidon de 20% et 25%, il n'y a pas une montée significative de la résistance à la rupture en flexion. Il y a une augmentation de 11,45%, tandis qu'entre 15% et 20%, elle est de 64,73%.

3.4.5. Corrélation entre les caractéristiques mécaniques en flexion

Après, il serait nécessaire de comparer l'évolution des deux caractéristiques mécaniques obtenues. La figure 3.7 nous présente sur un même graphique l'évolution du module de Young et de la résistance à la rupture par flexion.

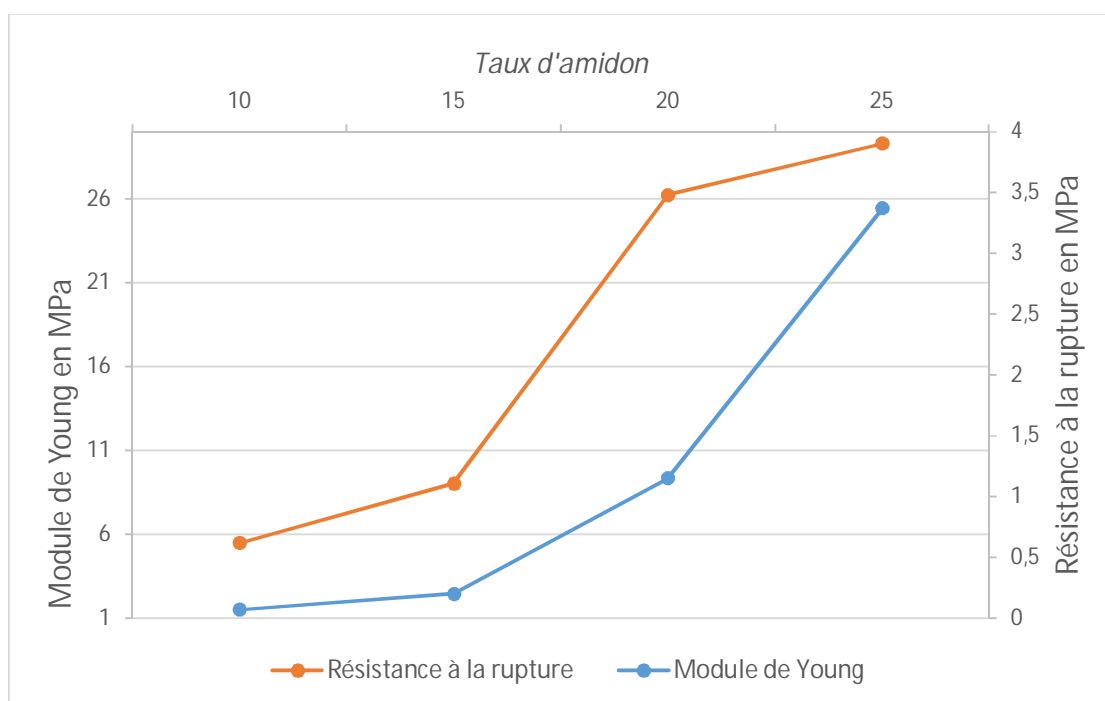


Figure 3. 7: Evolution conjointe Module de Young -Résistance à la rupture

Les deux paramètres ont une évolution exponentielle, mais cette figure montre que vers 25% d'amidon, la croissance de la résistance à la rupture diminue considérablement tandis que celle du module de Young fait une montée. Il serait mieux de vérifier l'évolution de ces paramètres au-delà de 25% d'amidon pour pouvoir bien choisir la formulation idéale.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

3.5. Caractéristiques mécaniques en traction

3.5.1. Confection des éprouvettes de traction

Les éprouvettes de traction utilisées sont celles présentées à la figure suivante. La longueur entre les talons est de 60 mm avec des épaisseurs inférieures à 3 mm.

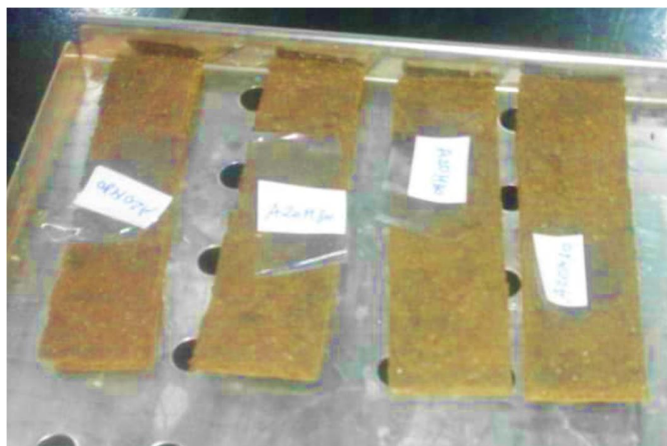


Figure 3. 8: Eprouvettes de traction

3.5.2. Résultats des essais de traction

Les essais de traction réalisés ont permis de déterminer la résistance à la rupture τ et la déformation à la rupture ϵ_r des agro-matériaux mis en œuvre. Les résultats de ces essais sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 6: Résultats des essais de tractions

Matériaux	A10M40E50	A15M35E50	A20M30E50	A25M25E50
ϵ_r (%)	0,61	1,53	1,26	0,66
τ (MPa)	0,01	0,43	0,56	0,99

La déformation à la rupture des matériaux est faible et varie entre 0,61 et 1,53%. Par ailleurs, la résistance à la rupture varie de 0,01 et 0,99 MPa.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

3.5.3. Analyse des modes de ruptures

L'analyse du mode de rupture par traction d'un matériau permet d'identifier le caractère fragile ou ductile de ce dernier. La figure suivante présente les images des éprouvettes de traction après rupture.



Figure 3. 9: Mode de rupture des agro-matériaux

Nous observons sur cette figure que la rupture de matériaux testés est fragile, brusque et sans une déformation plastique remarquable. De plus on remarque qu'il y a aussi des fissures dans les matériaux après la rupture.

De façon générale, le comportement des biopolymères est plutôt du type dur et fragile, avec cependant apparition d'un seuil de plasticité et une certaine ductilité plus ou moins prononcée en fonction de leur taux de plastification (GENEAU, 2006)

3.5.4. Evolution de la déformation à la rupture en fonction du taux d'amidon

En utilisant les valeurs du Tableau 6, on peut tracer l'évolution de la déformation à la rupture en fonction du taux d'amidon dans le matériau.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

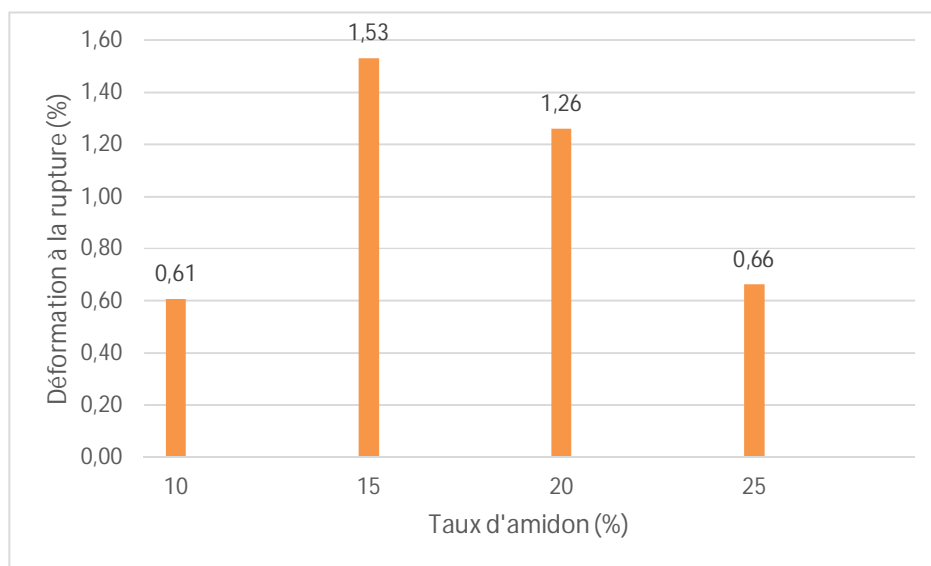


Figure 3. 10: Déformation à la rupture en fonction du taux d'amidon

Les déformations à la rupture des matériaux sont très faibles. Ceci explique le comportement fragile à la rupture observé. De plus, contrairement aux autres paramètres, la déformation à la rupture n'admet pas une évolution (croissante ou décroissante) en fonction du taux d'amidon. A un taux de 15%, on observe une déformation maximale de 1,53%, et ceci diminue avec l'augmentation du taux d'amidon.

3.5.5. Evolution de la résistance à la rupture en traction en fonction du taux d'amidon

De la même manière, l'évolution de résistance à la rupture en traction en fonction du taux d'amidon est présentée sur la figure 3.11.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

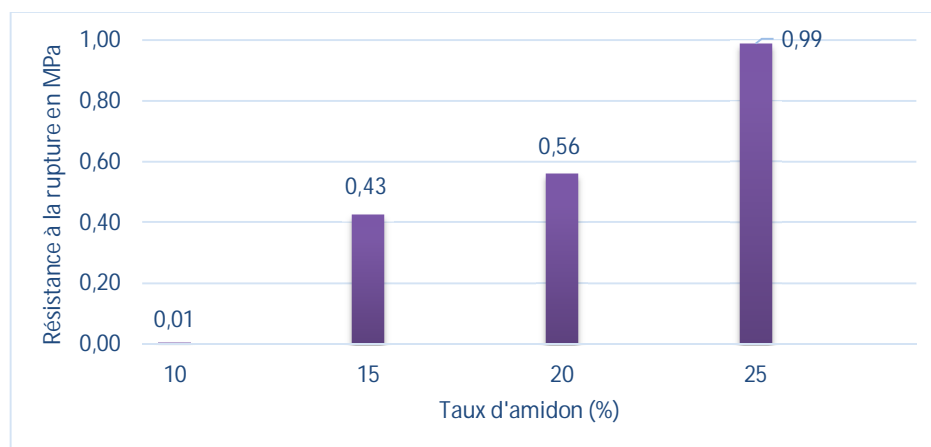


Figure 3. 11: Résistance à la rupture en traction en fonction du taux d'amidon

La résistance à la rupture par traction croît avec le taux d'amidon. De plus, entre 15% et 20% d'amidon, il n'y a pas une augmentation significative de la résistance à la traction. Elle est de 23,21%, alors qu'elle devient 43,43% entre 20% et 25%. Ces valeurs sont dix fois inférieures aux valeurs de la résistance à la rupture en traction des feuilles de *musa sapientum* (traitées ou non) qui varient entre 9,9 et 20,21 MPa (ONZO, et al., 2014).

3.5.6. Comparaison des résistances à la rupture en traction et en flexion

A présent, il serait judicieux de comparer les résistances à la rupture en traction et en flexion des agro-matériaux obtenus. Ces valeurs sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 7: Comparaison des résistances en Flexion et en Traction

Matériaux	A10M40E50	A15M35E50	A20M30E50	A25M25E50
σ_r (MPa)	5,48	9,25	26,23	29,29
τ (MPa)	0,01	0,43	0,56	0,99

On constate que les résistances à la rupture en flexion sont au moins vingt (20) fois plus grand que celles obtenues en traction. Cette comparaison est bien visible sur la figure 3.12.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*



Figure 3. 12: Comparaison des résistances en Flexion et en Traction

Les agro-matériaux obtenus présentent de meilleures propriétés flexion qu'en traction. Ce comportement est souvent observé chez les matériaux à matrice polymère et les céramiques (Berthelot, 2013).

3.6. Conclusion

Après avoir déterminé quelques caractéristiques physiques des matières premières, les échantillons des composites formulés ont été réalisés. Le module de Young et la résistance à la rupture en flexion des échantillons ont été déterminés par un essai de flexion trois (3) points. La résistance à la rupture et la déformation à la rupture en traction aussi ont été déterminées. La caractérisation physique des matières premières permet de savoir les propriétés de ces dernières, car elles ont d'influence sur les caractéristiques mécaniques des agro-matériaux. Les caractérisations mécaniques en flexion, puis en traction ont permis de connaître le mode de rupture des agro-matériaux et qu'ils sont plus résistants en flexion qu'en traction comme la plupart des matériaux composites à matrice polymère.

Pour toutes les caractéristiques mécaniques étudiées, à partir de 20% d'amidon, les propriétés mécaniques sont acceptables pour la mise en œuvre d'emballages alimentaires avec ces agro-matériaux.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

CONCLUSION GENERALE

Ce travail qui s'inscrit dans le projet de conception d'emballages alimentaires biodégradables à base des feuilles végétales au Bénin a porté sur la mise en œuvre et la caractérisation mécanique d'agro-matériaux pouvant servir dans la fabrication d'emballages alimentaires biodégradables. Ces agro-matériaux ont été réalisés par moulage et présentent des caractéristiques mécaniques acceptables pour la fabrication d'emballages alimentaires.

A travers ce travail, il a été prouvé qu'il est possible de mettre en œuvre par le procédé de moulage des agro-matériaux d'emballage avec les feuilles végétales et un liant naturel. De plus, l'étude des caractéristiques mécaniques prouve qu'à 20% d'amidon et 50% d'eau, nous pouvons avoir de matériaux acceptables pour la fabrication d'emballage alimentaire. Mais ces matériaux sont fragiles et présentent une rupture brusque à la traction avec une déformation à la rupture très faible comme la plupart des matériaux composites à matrice polymères.

Pour plus de précision sur les caractéristiques obtenues, Il serait nécessaire d'étudier l'influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux :

- du procédé d'élaboration du composite ;
- du pourcentage d'eau dans le composite au cours de l'élaboration ;
- de la granulométrie des fibres ;
- du type de liant utilisé.

Outre ces études, la caractérisation physico-chimique et phyto-chimique des matériaux obtenus est nécessaire pour prévoir le comportement de ces emballages en contact avec les aliments.

**Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de
l'espèce *musa sapientum***

ANNEXES

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Annexe A : Résultats des essais de détermination de la teneur en eau

Tableau 8: Teneur en eau de la mouture de feuilles

Masse tare	m 1	m2	%T	Moyenne	Ecart	Ecart Moyen
86	126	131	12,5	10,88	1,62	1,079
74	94	96	10		0,88	
74	143	150	10,14		0,73	

Tableau 9: Teneur en eau de l'amidon

Masse tare	m 1	m2	%T	Moyenne	Ecart	Ecart Moyen
66	97	100	9,67	10,44	0,76	0,51
70	97	100	11,11		0,67	
91	148	154	10,52		0,09	

Annexe B : Résultats des essais de détermination de l'absorption d'eau

Tableau 10: Absorption d'eau de la mouture de feuilles

Masse m (g)	m 1 (g)	m2 (g)	%T	Moyenne	Ecart	Ecart Moyen
10	110	113	30	33,33	3,33	4,44
10	110	114	40		6,67	
10	110	113	30		3,33	

Tableau 11: Absorption d'eau de l'Amidon

Masse m (g)	m 1 (g)	m 2 (g)	%T	Moyenne	Ecart	Ecart Moyen
10	280	287	70	76,67	6,67	4,44
10	281	289	80		3,33	
10	280	288	80		3,33	

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Annexe C : Résultats de l'analyse granulométrique de la mouture de feuilles

Tableau 12: Analyse granulométrique

Tamis (mm)	Masse de refus partiel (g)	Masse passant partiel (g)	Pourcentage de passant (g)
2,00	0,00	267,60	100,00
1,50	0,00	267,60	100,00
1,00	0,20	267,40	99,93
0,63	10,50	256,90	96,00
0,50	14,10	242,80	90,73
0,40	16,20	226,60	84,68
0,20	107,00	119,60	44,69
0,10	87,80	31,80	11,88
0,08	31,80	0,00	0,00

**Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de
l'espèce musa sapientum**

Annexe D : Résultats des essais de Flexion 3 points

Tableau 13: Résultats du calcul des modules de Young (E)

Matériaux	Echantillons	E (MPa)	Moyennes	Ecart	Ecart moyen
A10M40	A10M40-1	0,07	0,07	0,00	0,00
	A10M40-2	0,07		0,00	
	A10M40-3	0,08		0,01	
A15M35	A15M35-1	0,20	0,20	0,00	0,02
	A15M35-2	0,22		0,02	
	A15M35-3	0,17		0,03	
A20M30	A20M30-1	0,74	1,15	0,41	0,27
	A20M30-2	1,54		0,39	
	A20M30-3	1,16		0,01	
A25M25	A25M25-1	3,70	3,37	0,33	0,22
	A25M25-2	3,20		0,17	
	A25M25-3	3,20		0,17	

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Tableau 14: Résultats du calcul des résistances à la rupture par flexion (σ_r)

Matériaux	Echantillons	σ_r (MPa)	Moyennes	Ecart	Ecart moyen
A10M40	A10M40-1	18,38	18,57	0,19	0,25
	A10M40-2	18,94		0,37	
	A10M40-3	18,38		0,19	
A15M35	A15M35-1	29,30	31,35	2,05	6,43
	A15M35-2	41,00		9,65	
	A15M35-3	23,75		7,60	
A20M30	A20M30-1	96,98	88,90	8,08	10,77
	A20M30-2	96,98		8,08	
	A20M30-3	72,74		16,16	
A25M25	A25M25-1	96,98	99,29	2,31	1,54
	A25M25-2	100,45		1,16	
	A25M25-3	100,45		1,16	

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce musa sapientum

Annexe E : Résultats des essais de traction

Tableau 15: Résultats du calcul des déformations à la rupture par traction (ϵ_r)

Matériau	Echantillon	ϵ_r (%)	Moyenne	Ecart	Ecart moyen
A10M40	A10M40-1	0,33	0,61	0,27	0,18
	A10M40-2	0,83		0,22	
	A10M40-3	0,66		0,06	
A15M35	A15M35-1	1,64	1,53	0,11	0,14
	A15M35-2	1,64		0,11	
	A15M35-3	1,32		0,22	
A20M30	A20M30-1	0,83	1,26	0,43	0,29
	A20M30-2	1,64		0,38	
	A20M30-3	1,32		0,06	
A25M25	A25M25-1	0,50	0,66	0,16	0,11
	A25M25-2	0,83		0,16	
	A25M25-3	0,66		0,00	

Tableau 16: Résultats du calcul des résistances à la rupture par traction (τ)

Matériaux	Echantillon	τ (MPa)	Moyenne	Ecart	Ecart moyen
A10M40	A10M40-1	0,01	0,01	0,00	0,00
	A10M40-2	0,01		0,00	
	A10M40-3	0,01		0,00	
A15M35	A15M35-1	0,36	0,43	0,07	0,09
	A15M35-2	0,56		0,13	
	A15M35-3	0,37		0,06	
A20M30	A20M30-1	0,47	0,56	0,08	0,06
	A20M30-2	0,59		0,03	
	A20M30-3	0,61		0,05	
A25M25	A25M25-1	0,98	0,99	0,01	0,04
	A25M25-2	0,94		0,05	
	A25M25-3	1,05		0,06	

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Alter énergies ÉTAT DES LIEUX DES AGROMATÉRIAUX POUR LA CONSTRUCTION EN REGION CENTRE [Conférence]. - France : ADEME, 2011.

Agende de l'environnement et la maîtrise de l'énergie Améliorer l'impact environnemental des produits [Revue]. - France : ADEME & VOUS, 2014. - 9.

ALAKOUKO Abdou Raimi Valorisation des sous-produits de la filière coton en matériaux biosourcés: Etude , conception et réalisation d'une défibreuse manuelle et d'une thermo- presse [Rapport] : Mémoire d'ingénieur. - Abomey Calavi : Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi, 2018. - p. 152.

Alvarado Pedro Gustavo Maldonado FACTEURS DÉTERMINANTS DU POUVOIR DE PANIFICATION DE L'AMIDON DE MANIOC MODIFIÉ PAR FERMENTATION ET IRRADIATION UV [Rapport] : Thèse de doctorat / Ecole doctorale Sciences des Procédés – Sciences des Aliments. - France : UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2, 2014. - p. 190.

Amit Jeetah et Ramdhonee Pratima Production of wrapping paper from banana fibres [Article] // Journal of Environmental Chemical Engineering. - 2017.

Barzin Mobashe Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites [Ouvrage]. - Broken Sound Parkway : Taylor & Francis Group, 2012. - p. 465.

BEN HAJ Sihem Nanoparticules d'amidon : Préparation, Pouvoir renforçant et Utilisation comme agent de stabilisation [Rapport]. - GRENOBLE : L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, 2015.

Berthelot Jean-Marie Mécanique des Matériaux et Structures Composites [Ouvrage]. - Le Mans : Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, 2013. - p. 667.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Borchani Karama Développement d'un composite à base d'un polymère biodégradable et de fibres extraites de la plante d'Alfa [Rapport] : Thèse de doctorat. - Tunisie : École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2016.

Bouterf Amine Comportement mécanique de la plaque de plâtre étudié par tomographie et essais mécaniques in-situ [Rapport] : Thèse doctorat. - Cedex : ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN, 2014. - p. 244.

CHEVALIER Yvon Comportements élastique et viscoélastique des composites [Ouvrage]. - 1985.

Conseil de la transformation agro-alimentaire et des produits de consommation Guide de l'emballage alimentaire [Ouvrage]. - Quebec : CTAC, 2010.

Davidovic Andréa Stanojlovic Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles - Application à l'emballage alimentaire [Rapport] : Thèse de doctorat. - Alès : Université du Sud Toulon-Var, 2006. - p. 200.

Dujardin Nicolas Un matériau biosource de choix : les fibres naturelles, caractérisation et application [Article] // 25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement, L'économie verte en question. - Créteil : [s.n.], Février 2014. - 00978360. - p. 11.

El Hadji Babacar [et al.] Nouveaux matériaux d'emballage biodégradables [Article] // Revue des composites et des matériaux avancés. - Cedex : Ecole Française de Papeterie et des Industries Graphiques, 2008. - x : Vol. X.

English B., Chow P. et Bajwa D. Paper and Composites from Agro-Based Resources [Section] // Processing into Composites. - New York : CRC Lewis Publishers Boca Raton, 1997.

FANCHON Jean Louis Guide de mécanique [Ouvrage]. - Turin : NATHAN, 1998.

FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT Les matériaux biosourcés dans le bâtiment [Ouvrage]. - Paris : [s.n.], 2015. - Vol. 147.

Gbesso Florence, Gbaguidi Marcelle et Gbesso Francois Aspects socio-économiques des emballages-feuilles des zones humides du sud Bénin [Article] // European Scientific Journal. - Novembre 2015. - 32 : Vol. 11. - ISSN: 1857 – 7881.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

GENEAU Céline Procédé d'élaboration d'agro-matériau composite naturel par extrusion bivaux et injection moulage de Tourteau de tournesol [Rapport] : Thèse de doctorat / INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE. - Toulouse : ECOLE DOCTORALE : Transferts, Dynamique des Fluides, Energétique et Procédé, 2006. - p. 381.

Gornet Laurent Généralités sur les matériaux composites [Ouvrage]. - France : École Centrale de Nantes, 2011. - p. 51.

Guerira B Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites [Ouvrage]. - 2005. - p. 21.

HOUNDJA Damien Conception et étude de l'état de contrainte et de déformation d'un biomatériau de type sandwich à base d'élément de raphia et de composites bois polymères [Rapport] : Memoire d'ingenieur. - Abomey Calavi : Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi, 2019. - p. 173.

Hounhouigan Matières végétales au Bénin: Un potentiel d'emballages biodégradables [Article] // Bulletin du Réseau TPA. - 2000. - Vol. 17.

Kokou Esso Atcholi Opportunities of naturels polymers in the biocomposites based from agro-ressources : *Grewia venusta* mucilage and *Bombax costatum* calyx, two tropical plants like sources of natural blinders for particleboards manufacturing [Article] // IRTES EA7274. - Cedex : University Bourgogne Franche-Comté, 2015. - 10 : Vol. 900. - p. 13.

Kpadjouda Rodrigue Caractérisation physique, thermique et chimique de nouveaux matériaux issus de la biomasse végétale pour l'élaboration des panneaux d'isolation thermique. [Rapport] : Mémoire d'Ingénieur / Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi. - Abomey Calavi : Université d'Abomey Calavi, 2019. - p. 114.

LAOUINI Wissal Propriétés fonctionnelles de l'amidon irradié [Rapport] : Thèse de doctorat / Institut National des Sciences. - Carthage : Université du 7 Novembre à Carthage, 2011. - p. 100.

Lebaupin Yann Comportement à l'impact et post-impact d'un composite lin/Polyamide 11 élaboré par thermocompression [Rapport] : Thèse Mécanique des matériaux et des structures / Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aerotechnique. - Laval : [s.n.], 2016. - p. 177.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

Mahfoudh Etude de la production et de la caractérisation de composites boisplastiques [Rapport]. - 2013. - p. 101.

Mbacke Mamadou Abdoul Caractérisation et modélisation du comportement [Rapport] : Thèse de doctorat. - Paris : École nationale supérieure des mines de Paris, 2013. - p. 163.

Mercier Jean P., Zambelli Gerald et Kurz Wilfried Introduction à la science des matériaux [Ouvrage]. - Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2002. - 3eme : p. 520. - ISBN 2-88074-402-4.

Moothoo Julien, Garnier Christian et Ouagne Pierre Valorisation des matières de chutes de production de composites thermoplastiques par le procédé de thermocompression [Article] // Journées Nationales sur les composites. - 2017. - 77455 : Vol. 11.

NENONENE Amen Yawo Elaboration et caractérisation mécanique des panneaux de particules de tige de Kénafe et de bio adhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage [Rapport] : Thèse de doctorat. - TOULOUSE : Université de TOULOUSE, 2009. - p. 217.

NF P 18 - 555 Norme Française de mesure de l'absorption sur les granulats.

OLODO Emmanuel Cour de Mécanique des Matériaux Composites [Ouvrage]. - Abomey Calavi : Université d'Abomey Calavi, 2017.

ONZO Caroline [et al.] Caractérisation physique et mécanique de *Thalia geniculata* et de *Musa sapientum*, deux espèces de feuilles végétales utilisées comme emballage alimentaires en Afrique de l'Ouest [Article] // International Journal of Biological and Chemical Sciences. - 2014. - 4 : Vol. 8.

ONZO Caroline [et al.] Caractéristiques physico-chimiques, phytochimiques et toxicité des espèces végétales utilisées comme emballages alimentaires en Afrique de l'Ouest [Article] // International Journal of Biological and Chemical Sciences. - Aout 2014. - 8 : Vol. 4. - pp. 1504-1516.

ONZO Caroline Fifamè [et al.] Évaluation de l'activité antimicrobienne de quatre feuilles utilisées comme emballages dans l'artisanat agroalimentaire au Bénin [Article] // Journal of Applied Biosciences. - Novembre 2015. - pp. 9015 – 9027.

Mise en œuvre et caractérisation mécanique d'agro matériaux d'emballage : cas de l'espèce *musa sapientum*

ONZO F C, AZOKPOTA P et AGBANI P Biodiversité des feuilles végétales utilisées comme emballages dans l'artisanat agroalimentaire au Sud du Bénin [Revue] // Journal of Applied Biosciences. - 1997. - 5810 : Vol. 72.

PIERRE Thomas et COLINART Thibaut Caractérisation thermo-hydrigue d'agro-matériaux à base de chanvre [Ouvrage]. - Cedex : Université de Bretagne-Sud, Université Européenne de Bretagne, 2011.

Rashid Mamunur et Shams Iftekhhar Physical and mechanical properties of medium density fiber board [Article] // Indian Academy of Wood Science. - 2014.

Serier A. et Aoufi Development of new biodegradable packaging [Article] // Advances in Materials and Processing Technologies. - 9 March 2017. - 2 : Vol. 3. - pp. 55-163.

Sidoroff François Mécanique des milieux continus [Ouvrage]. - Lyon : École Centrale de Lyon, 1980. - p. 34.

SOULAMA Sagnaba Caractérisation mécanique et thermique de biocomposites à matrice polystyrène recyclé renforcée par des coques de cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.), ou de particules de bois de kénaf (*Hibiscus Cannabinus* L.) [Rapport] : Thèse Sciences pour l'ingénieur (Génie Mécanique). - Montbéliard : Université de Technologie de Belfort, 2014. - p. 212.

Xiao-yan Zhou [et al.] An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers [Article] // Energy and Buildings. - 2010. - Vol. 42. - 1070–1074.

YANDJOU Jijoho Hermann Caractérisation physico-mécanique de *thalia welwitschii* et de *musa sapientum*, deux espèces de feuilles végétales utilisées pour l'emballage de l'akassa au Bénin [Rapport] : Mémoire de master recherche. - Abomey Calavi : Université d'Abomey Calavi, 2012. - p. 47.