

Formulation et caractérisation physico-chimique de biofilms d'emballage à matrice d'amidon renforcée de fibres végétales

[Formulation and physico-chemical characterization of packaging biofilms with starch matrix reinforced with vegetable fibers]

Hermann J. Yandjou¹, Patrice Boni², Chakirou A. Toukourou¹, and Valentin D. Wotto³

¹Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquées (LEMA), École Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi 01BP2009 COTONOU, Benin

²Laboratoire d'Étude et de Recherche en Chimie Appliquée (LERCA), École Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi 01BP2009 COTONOU, Benin

³Laboratoire de Chimie-Physique (LCP), Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi 01BP526 COTONOU, Benin

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This research work aims to transform and study the physico-chemical properties of leaf-based agro-materials of *Musa sapientum* and *Tectona grandis* species. Indeed, the latter are traditionally used as a food packaging medium in West Africa and Benin in particular. The analysis by phytochemical screening of the main chemical groups present at the level of the leaves reveals the presence of molecules of interest, namely: flavonoids; catechol tannins and anthocyanins. The latter are indeed recognized for their pharmacological benefits. In addition, leuco anthocyanins and gallic tannins are only present in *Tectona grandis* leaves. To produce biofilms based on the leaf species studied, a Box-Doehlert experimental design was carried out. Fifteen (15) formulations were thus made, varying the leaf, starch, and glycerin contents of the mixture.

It has been observed that, for low water sensitivity (0.1471) and low thickness (0.0573mm) of bioplastics, 1g of leaves are required; 6g of starch and 4.23mL of glycerin for the leaf of *Tectona grandis* while for that of *Musa sapientum* (low thickness: 0.0617mm, low sensitivity to water: 0.3466), it takes: 1.74g of leaf; 6g of starch and 2.5mL of glycerin.

KEYWORDS: Biodegradable; *Musa sapientum*; *Tectona grandis*; Cassava.

RESUME: Le présent travail de recherche, vise à transformer et étudier les propriétés physico-chimiques d'agro-matériaux à base de feuilles des espèces *Musa sapientum* et *Tectona grandis*. En effet ces dernières sont traditionnellement employées comme support d'emballage alimentaire en Afrique de l'Ouest et au Bénin en particulier. L'analyse par screening phytochimique des principaux groupes chimiques présents au niveau des feuilles révèle la présence de molécules d'intérêt à savoir: flavonoïdes; tannins catéchiques et anthocyanes. Ces dernières sont en effet reconnues pour leurs bienfaits pharmacologiques. En outre les leuco anthocyanes et les tannins galliques ne sont présentes que dans les feuilles *Tectona grandis*.

Pour la production de biofilms à base des espèces de feuilles étudiées, il a été procédé à un plan d'expérience de Box-Doehlert. Quinze (15) formulations ont ainsi été réalisées, en faisant varier les teneurs en feuilles, en amidon et en glycérine du mélange.

Il a été observé que, pour une faible sensibilité à l'eau (0,1471) et une faible épaisseur (0.0573mm) des bioplastiques, il faut 1g de feuilles; 6g d'amidon et 4,23mL de la glycérine pour la feuille de *Tectona grandis* alors que pour celle de *Musa sapientum* (faible épaisseur: 0,0617mm, faible sensibilité à l'eau: 0,3466), il faut: 1,74g de feuille; 6g d'amidon et 2,5mL de glycérine.

MOTS-CLEFS: Biodégradable; *Musa sapientum*; *Tectona grandis*; Manioc.

1 INTRODUCTION

Les rapports de l'ONU soulignent que la population mondiale pourrait atteindre 9,7 milliards d'habitants en 2050, accentuant ainsi la pression de l'humanité sur les écosystèmes si nous ne changeons pas de modèle de développement. Développer des technologies appropriées, sobres et durables, qui limitent au maximum les émissions et la consommation de ressources non-renouvelables, est ainsi essentiel dans tous les domaines [1].

Par exemple, plus de 90 % des plastiques tous secteurs confondus sont issus de ressources fossiles [2]. Le plastique possède en effet de nombreux avantages car léger, peu cher et facile à transformer. Mais d'importants inconvénients poussent à repenser sa production, son usage et sa fin de vie. Les plastiques sont pour la plupart pétro-sourcés et représenteront à ce rythme 20% de la consommation en pétrole et 15% des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 [3], [4].

L'alternative à l'élimination des déchets plastiques est principalement le recyclage, mais non sans peine. En outre certains produits plastiques ne sont pas compatibles lors de la refonte. Et même lorsqu'ils peuvent être recyclés, des déchets plastiques échappent à la collecte et arrivent directement dans l'environnement [5]. Certains affirment même que seule la biodégradabilité en conditions naturelles, permettra de résoudre les problèmes liés à l'accumulation des déchets dans notre environnement [2].

En parallèle, les résidus agricoles constituent des ressources abondantes, peu chères et renouvelables. En Europe par exemple, les résidus de l'agriculture représentent 50% de la masse des récoltes. Il en existe une grande diversité, issue de cultures annuelles (pailles) ou pérennes (bois de taille), d'effluents d'élevage (fumier) et qui peuvent être utilisés dans de nombreux secteurs, convertis pour la production de bioénergies, de biomatériaux ou de biomolécules [3], [6].

Le développement de biocomposites à hautes performances est ainsi en augmentation dans le monde entier. Récemment, plusieurs applications industrielles ont été élaborées avec des composites contenant des fibres naturelles et des matrices bio polymères, notamment l'amidon [7], [8], [9], [10].

Au Bénin, des voies de valorisations des agro-ressources sont également étudiées, notamment la fabrication d'emballages biodégradables avec des parties des espèces locales de *Thalia geniculata*, *Tectona grandis* ou *Musa sapientum* [11], [12]. Leur innocuité ainsi que leur aptitude au contact alimentaire ont fait l'objet d'études, ce qui justifie d'ailleurs de les retrouver dans l'artisanat agroalimentaire du Bénin [13]. La mise au point de procédés efficaces de mise en forme de ces agro-matériaux locaux, permettra leur usage plus étendu et conforme aux enjeux de développement durable.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MATERIEL

Les feuilles des deux espèces ont été triées afin d'éliminer les corps étrangers. Elles ont ensuite été étiées puis lavées convenablement à l'eau de robinet. Chacune des feuilles est séchée puis conservée au laboratoire à température ambiante ($25\pm 2^\circ\text{C}$). Pour l'élaboration des biofilms plastiques, les feuilles ont été broyées puis tamisées à 2mm de granulométrie.

L'amidon a été utilisé comme matrice polymère de base pour l'élaboration des biofilms. Il a été extrait des tubercules de manioc (*Manihot esculenta*) ayant 15 mois de maturité.

Plusieurs solvants ont été utilisés dans la réalisation des tests de caractérisation. Il s'agit de l'hexane, de l'eau distillée, de l'éthanol. Le plastifiant utilisé est la glycérine dans le cadre de l'élaboration des biofilms.

Le tableau 1 résume le matériel technique utilisé pour effectuer les essais.

Tableau 1. Matériels techniques utiles à l'élaboration des biofilms plastiques

MATERIELS	USAGES
Four	Incinération des échantillons
Plaque plane	Etalage des pâtes
Etuve thermostabilisée	Conditionnement des échantillons
Balance	Mesure des masses
Hotte de chimie	Analyses physicochimiques (screening phytochimique, etc)
Bain marie	Maintient à température constante des milieux réactionnels
Plaque chauffante	Opérations de chauffages

2.2 METHODES

2.2.1 EXTRACTION DE L'AMIDON

Aussitôt récolté, le manioc a été épluché. Cette étape consiste à éliminer les écorces internes et externes de la racine. La racine ainsi dénudée est lavée de manière à éliminer toute impureté. Elle est alors réduite en une pulpe fine par râpage. La pulpe obtenue est mélangée à de l'eau puis tamisée, ceci dans le but d'éliminer les fibres et autres débris grossiers du lait d'amidon. Le lait d'amidon a été ensuite soumis à une décantation. La phase solide obtenue est séchée sous ombre ($37\pm 2^\circ\text{C}$) afin d'éviter le brunissement de l'amidon. Les mottes d'amidon obtenues de cette opération sont broyées et tamisées pour la production d'une poudre blanche d'amidon.

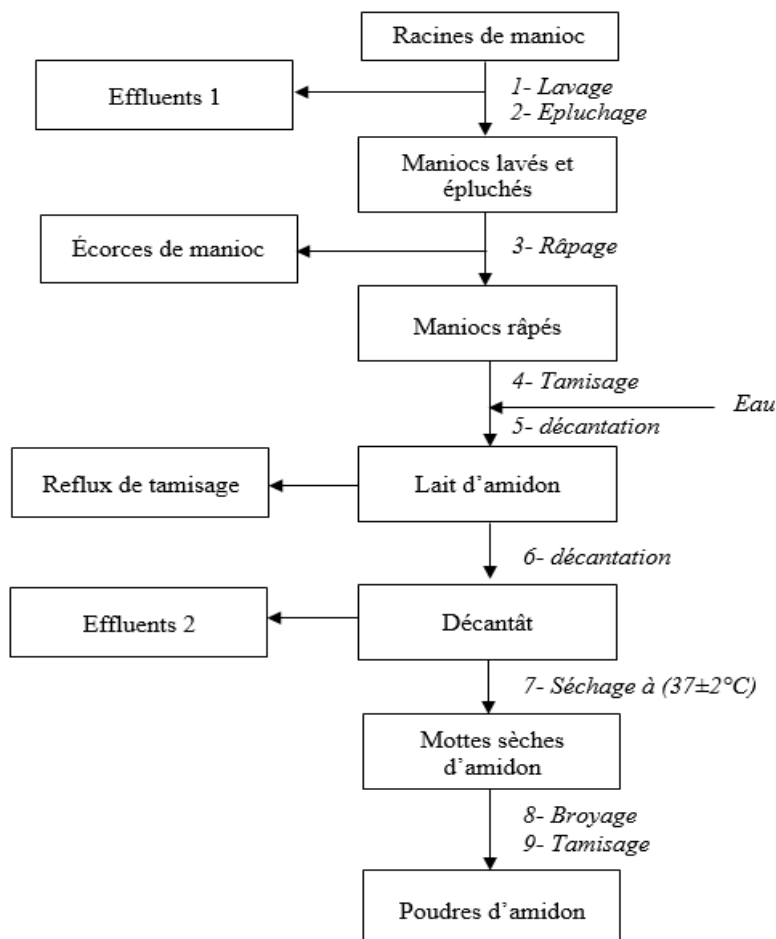


Fig. 1. Principales étapes d'obtention de la poudre d'amidon de manioc



Fig. 2. Racines de Manioc (a) Lait d'amidon (b)

2.2.2 DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

• Teneur en eau et épaisseur des échantillons

La teneur en eau des échantillons a été déterminée suivant la méthode A.O.A.C [14]. Les échantillons dont les masses initiales (m_i) sont connues sont mis à l'étuve à 105 °C pendant 24h. Leur masse finale stable après un séjour respectivement dans l'étuve à 105 °C et au dessiccateur est notée (m_f). La teneur en eau est alors obtenue par différence gravimétrique.

L'épaisseur des échantillons est mesurée avec un pied à coulisse (NF EN ISO 13385-1) [15]. La mesure en millimètres s'obtient en cherchant la graduation pour laquelle le "0" de la mâchoire mobile s'arrête.

• Teneur en cendres des échantillons

Les échantillons sont incinérés au four à 525 °C pendant 24h. Le taux de cendre (T_{cendres}) est déterminé par la formule [16]:

$$T_{\text{cendres}}(\%) = \frac{m_s}{m} \times 100 \quad (F_1)$$

m_s/m Avec m_s : la masse de la cendre obtenue; m : la masse initiale de l'échantillon.

Le taux de lipides totaux (T_h) a été évalué de façon classique par extraction au Soxhlet à l'aide de l'hexane comme solvant. Pour cela, 40g de l'échantillon ont été mis sous reflux avec 200mL de l'hexane pendant 6 heures. Le taux de lipides a été calculé à l'aide de la formule:

$$T_h = \frac{M_h}{M_e} \times 100 \quad (F_2)$$

Avec M_h : masse de l'huile obtenue après évaporation du solvant de l'extrait et M_e : masse initiale de l'échantillon.

• Analyse phytochimique des espèces de feuilles

Tableau 2. Paramètres et méthodes de caractérisation phytochimique

PARAMETRES	METHODES
Flavonoïdes	Mélanger 5 mL de l'échantillon en solution à 5% et 5 mL d'alcool chlorhydrique, quelques copeaux de magnésium et 1 mL d'alcool isoamylique. L'apparition d'une couleur rose orangée en surface indique la présence des flavonoïdes [16], [17], [18].
Tannins catéchiques et galliques	Mélange de 5 mL de l'échantillon en solution à 5% et 3 mL de réactif de Stiasny, chauffé pendant 15 min. L'apparition d'un précipité prouve la présence de tannins catéchiques. Le filtrat est saturé avec de l'acétate de sodium, l'apparition d'une teinte bleu-noirâtre après ajout de FeCl_3 à 1% indique la présence des tanins galliques [16], [17], [18].
Coumarines	Un (01) gramme d'échantillon est placé dans un tube en présence de gouttes d'eau. Les tubes sont recouverts du papier filtre imbibé de soude (NaOH) dilué à 10% et sont portés à ébullition. Une fluorescence jaune témoigne de la présence de coumarines après examen sous UV à 365 nm [16], [17], [18].
Anthocyanes	A une infusion à 5%, on ajoute 5 mL de H_2SO_4 à 10% puis, 5 mL de NH_4OH à 50%. Une coloration qui vire au bleu violacé en milieu basique, indique la présence des anthocyanes [16], [17], [18].
Leuco anthocyanes	A 5 mL de l'échantillon on ajoute 5 mL d'alcool chlorhydrique. Le mélange est ensuite chauffé pendant 15 minutes au bain marie à 90°C. Une coloration rouge cerise ou violacée indique la présence de leuco anthocyanes [16], [17], [18].
Saponosides	1 g d'échantillon dissout dans 100 mL d'eau distillée, est porté à ébullition pendant 30 minutes. Le filtrat refroidi est réparti dans 10 tubes à essai (hauteur 160 mm x 16 mm de diamètre) en concentrations successives de 1/10 ^e . De l'eau distillée est rajoutée à chaque tube pour atteindre 100 mL. La hauteur de la mousse est mesurée. Si elle est supérieure ou égale à 10mm dans l'un des tubes, la dilution dans ce tube est l'indice de mousse cherché [16], [17], [18].

2.2.3 ELABORATION DES BIOFILMS PLASTIQUES

La méthode employée est inspirée de [19]. Dans un bécher de 100mL:

- Verser 70 mL d'eau distillée;
- Ajouter à celle-ci l'amidon et la poudre des feuilles selon les proportions définies;
- Ajouter de la glycérine à la solution obtenue selon les proportions prédéfinies;

- Mettre le mélange au feu doux (plaque chauffante à température modérée: 45±5°C) et commencer par agiter jusqu'à obtenir une pâte (température de gélification de l'amidon 72°C atteinte)

Les proportions mélangées sont obtenues à l'aide d'un plan d'expérience de Doehlert à trois facteurs [20], [21], présenté dans le tableau 3.

Tableau 3. Plan Box Doehlert de formulation des biofilms à base de *Musa sapientum* ou de *Tectona grandis*

Numéro d'essai	Feuilles (g)	Amidon (g)	Glycérine (mL)
1	1,5	12	2,5
2	1,5	6	2,5
3	1,5	12	5
4	2	9	5
5	1	12	3,75
6	1,5	6	5
7	2	12	3,75
8	2	6	3,75
9	1,5	9	3,75
10	1	9	2,5
11	2	9	2,5
12	1	6	3,75
13	1	9	5
14	1,5	9	3,75
15	1,5	9	3,75

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 CARACTERISATION DES FEUILLES

Les composés phytochimiques analysés dans les extraits de feuilles, sont présentés au tableau 4:

Tableau 4. Profils phytochimiques des feuilles de *Musa sapientum* et de *Tectona grandis*

Composés phytochimiques	<i>Musa sapientum</i>	<i>Tectona grandis</i>
Flavonoïdes	+	+
Tanins catéchiques	+	+
Anthocyanes	+	+
Tanins galliques	-	+
Leuco anthocyanes	-	+
Saponosides	-	-

+: Présence; -: Absence

On constate d'après les résultats du tableau que les deux espèces *Musa sapientum* et *Tectona grandis* possèdent en commun les grands groupes de composés chimiques à savoir: flavonoïdes; tannins catéchiques et anthocyanes et sont toutes dépourvues des saponosides; composés réducteurs, mucilages ou alcaloïdes. Les leuco anthocyanes et les tannins galliques sont uniquement présents dans les feuilles de *Tectona grandis*. Il a été reporté que les flavonoïdes se retrouvent dans les médicaments et ils sont efficaces pour les soins des cheveux [17].

La présence des tanins dans les espèces présente un avantage particulier étant donné que les tanins ont une activité antioxydante, ils entravent également le développement des microbes. Ils interviennent en outre dans la prévention des problèmes d'hygiène alimentaire, ce qui pourrait déjà justifier l'emploi des espèces de feuilles *Musa sapientum* et *Tectona grandis* en tant que matériaux d'emballage alimentaire.

En outre, on reconnaît aux anthocyanes une solubilité dans l'eau; dans de l'alcool et dans des solvants organiques apolaires. Ils possèdent également une sensibilité à l'oxydation, à la température et à la lumière. De fait, ces molécules confèrent aux espèces de feuilles *Musa sapientum* et *Tectona grandis*, une biodégradabilité naturelle. En termes d'effets bénéfiques sur l'organisme humain, les anthocyanes augmenteraient la régulation du pourpre rétinien, la résistance des capillaires, et diminueraient la perméabilité des mêmes capillaires. Ils possèdent aussi des activités anti-œdémateuses; antioxydantes; antibactériennes et antivirales. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par [13], à l'exception des tannins galliques et les leuco anthocyanes trouvés essentiellement dans les feuilles de *Tectona grandis*. Au vu des

propriétés pharmacologiques des différents groupes chimiques retrouvés dans ces feuilles, leur utilisation comme matériaux d'emballage pourrait également avoir des vertus thérapeutiques, à condition que ces différents composés soient transmis en dose efficace ou contrôlée dans les aliments emballés.

Pour déterminer la teneur en cendres, les feuilles ont été incinérées au four à 525°C pendant 24h. Le tableau 5 montre les teneurs en cendre des feuilles.

Tableau 5. Teneur en cendre de *Tectona grandis* et de *Musa sapientum*

Echantillons	M éch (g)	M porce vide (g)	M éch+ Porc (g)	Teneur en cendre (%)	Teneur (%)
Tg1	5	68,8	69,1	6	7,0 ± 1
Tg2	5	68,8	69,2	8	
Mu1	5	68,8	69,3	10	9,0 ± 1
Mu2	5	68,8	69,2	8	

D'après les résultats du tableau on constate que les feuilles possèdent une teneur importante de cendres. Les feuilles de *Musa sapientum* et *Tectona grandis* contiendraient donc beaucoup d'ions minéraux qui peuvent être bénéfiques à l'organisme.

3.2 CARACTERISATION DE L'AMIDON

Le taux de cendre est déterminé par l'incinération au four de l'amidon séché à 525°C pendant 24h. Le tableau 6 présente le taux en cendre de l'amidon [22].

Tableau 6. Teneur en cendre de l'amidon

Echantillons	Teneur en cendre	Teneur
Amidon 1	3,66	3,56 ± 0,1
Amidon 2	3,46	

On constate de ce tableau que l'amidon possède une teneur importante de cendre. Il peut donc être constitué de beaucoup d'ions minéraux indispensables à l'organisme qui pourraient être transférés par contact vers les produits emballés. Ce qui pourrait justifier son utilisation dans la conception de l'emballage.

3.3 CARACTERISATION DES BIOFILMS

En suivant les proportions définies dans le tableau 3, les échantillons de biofilms de la figure 3 ont été obtenus:

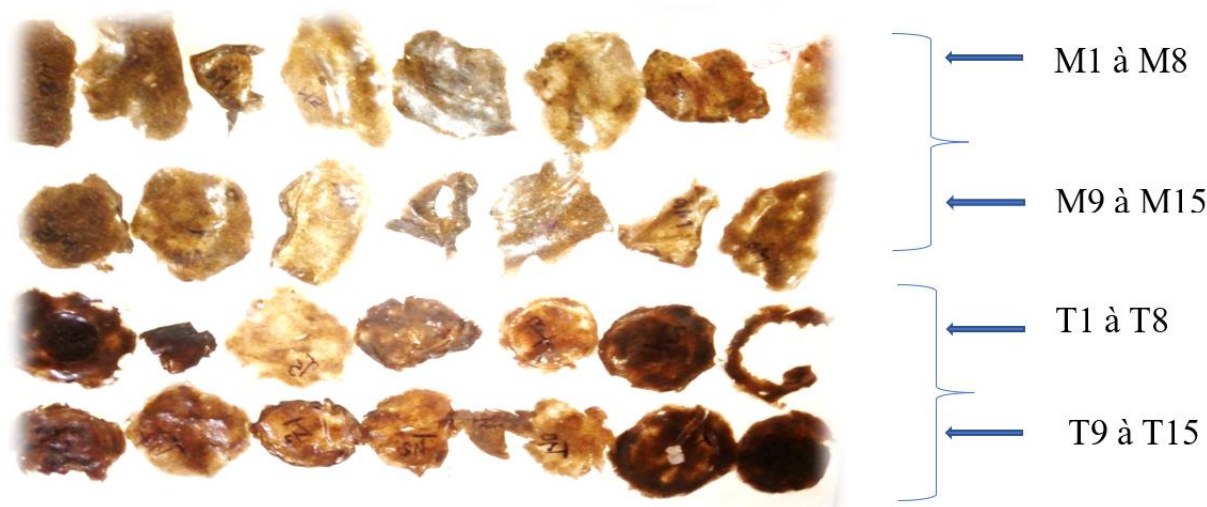


Fig. 3. Biofilms à base des feuilles de *Musa sapientum* et de *Tectona grandis*

La comparaison des différentes moyennes obtenues via la répétition des tests a été effectuée par le test de Fisher au seuil de 0,05. Elle a été réalisée après avoir confirmé la normalité de la distribution des épaisseurs et la sensibilité à l'eau ainsi que l'égalité des variances

respectivement par les tests statistiques de Shapiro et de Wilcoxon [23]. Le logiciel utilisé est Minitab. Les hypothèses nulles et alternative retenues sont:

Ho: égalité des moyennes

H1: au moins une des moyennes est statistiquement différente des autres

Les p-values sont toutes inférieures à 0,05 ce qui nous permet de dire qu'il y a une différence significative entre les moyennes pour les deux paramètres. Les différences entre les moyennes sont résumées dans les tableaux 7 et 8.

L'épaisseur des biofilms est déterminée à l'aide d'un pied à coulisse en acier inox au pas 1/10

L'épaisseur en fonction des proportions est donnée par la formule suivante:

$$E = 2,51 + 1,37x + 0,165y + 0,530z - 0,434x^2 - 0,0089y^2 - 0,0697z^2 - 0,0048x*y - 0,005x*z + 0,0007y*z \text{ (Minitab plan de Box-Bokhen)}$$

Avec x: masse de feuille; y: masse d'amidon et z: masse de glycérine

Le tableau 7 montre les épaisseurs des biofilms de *Musa sapientum* et de *Tectona grandis*

Tableau 7. Epaisseur des films bioplastiques

Echantillons	<i>Musa</i> (mm)	<i>Tectona</i> (mm)
1	0,096±0,004 ^b	0,073±0,008 ^b
2	0,053±0,004 ^f	0,076±0,004 ^b
3	0,103±0,004 ^a	0,093±0,004 ^a
4	0,090±0,004 ^d	0,050±0,006 ^e
5	0,093±0,004 ^c	0,083±0,004 ^c
6	0,063±0,004 ^f	0,086±0,004 ^c
7	0,106±0,004 ^a	0,090±0,008 ^a
8	0,083±0,004 ^e	0,096±0,008 ^a
9	0,083±0,004 ^e	0,066±0,011 ^d
10	0,083±0,004 ^e	0,050±0,006 ^e
11	0,086±0,004 ^d	0,043±0,004 ^e
12	0,060±0,004 ^f	0,060±0,006 ^f
13	0,093±0,004 ^c	0,070±0,006 ^d
14	0,096±0,004 ^b	0,076±0,004 ^b
15	0,096±0,004 ^b	0,076±0,004 ^b

L'épaisseur des biofilms à base de *Tectona grandis*, est obtenue pour des dosages en amidon respectivement proches de 1g et 6g. L'épaisseur minimale obtenue pour les biofilms à base de *Tectona grandis* dans cette étude, est significativement inférieure à celle trouvée par Kouassi [24]. On en déduit que les biofilms à base de *Tectona grandis* sont plus fins et donc plus malléables, ce qui en fait de bons candidats à la confection d'emballages souples, plutôt que *Musa sapientum*.

Le tableau 8 présente la sensibilité à l'eau de biofilms. La sensibilité des feuilles est donnée en fonction des proportions par la formule:

$$S = 1,44 - 0,382x + 0,158y - 0,870z - 0,042x^2 - 0,00124y^2 + 0,1085z^2 - 0,0038x*y + 0,173x*z - 0,0283y*z \text{ (Minitab plan de Box-Bokhen)}$$

Avec x: masse de feuille; y: masse d'amidon et z: masse de glycérine

Avec l'espèce *Tectona grandis*, on remarque que pour 2,5 et 3,75 mL de glycérine les sensibilités sont inférieures à 0,2 tandis que pour 5mL de glycérine la sensibilité est supérieure à 0,2. Il faut donc une quantité de glycérine inférieure à 5mL pour une sensibilité minimale. De plus pour la sensibilité minimale dans tous les cas la quantité de l'amidon est proche de 6g et celle de la feuille est proche de 1g. En outre les sensibilités minimales à l'eau des biofilms du *Musa* sont proches de 0,3 quelle que soit la quantité de glycérine. La plus petite valeur est obtenue pour 2,5mL de glycérine.

Tableau 8. Sensibilité à l'eau des biofilms

Echantillons	<i>Tectona g.</i>	<i>Musa s.</i>
1	0,527±0,047 ^d	0,266±0,006 ^c
2	0,547±0,110 ^b	0,360±0,194 ^b
3	0,174±0,096 ^f	0,322±0,056 ^b
4	0,416±0,094 ^c	0,420±0,067 ^b
5	0,241±0,003 ^e	0,317±0,007 ^b
6	0,657±0,017 ^a	0,469±0,135 ^b
7	0,621±0,051 ^b	0,321±0,479 ^b
8	0,583±0,091 ^b	0,440±0,000 ^b
9	0,568±0,237 ^b	0,393±0,013 ^b
10	0,343±0,073 ^g	0,487±0,013 ^b
11	0,5±0,1 ^d	0,343±0,053 ^b
12	0,236±0,046 ^e	0,536±0,036 ^a
13	0,387±0,045 ^c	0,543±0,021 ^a
14	0,189±0,106 ^f	0,463±0,004 ^b
15	0,411±0,072 ^c	0,448±0,001 ^b

4 CONCLUSION

Les enjeux du développement durable nous imposent de nouvelles pratiques, notamment dans le domaine des emballages alimentaires. En République du Bénin, plusieurs initiatives visent à valoriser les agroressources afin d'en faire des emballages modernes biodégradables. La présente étude a ainsi montré le fort potentiel que présentent les feuilles des espèces *Musa sapientum* et *Tectona grandis*, traditionnellement employées pour leurs vertus.

Après une caractérisation chimique des espèces en vue d'identifier leurs principaux principes actifs et groupes fonctionnels, il a été procédé à leur mise en œuvre. Ce procédé a permis de réaliser des biofilms à base de feuilles broyées, dispersées dans une matrice d'amidon de manioc. De la glycérine a alors servi de plastifiant lors des diverses formulations. Ainsi, le biofilm contenant 1,5g de feuille; 12g d'amidon et 2,5mL de glycérine pour l'espèce *Musa sapientum* et celui contenant 1g de feuille; 6g d'amidon et 3,75mL de glycérine pour *Tectona grandis* obtenus à la fin de ces travaux ont des caractéristiques physico-chimiques (sensibilité à l'eau, épaisseur etc.) idéales pour la confection d'emballages biodégradables. Les recherches doivent cependant se poursuivre, afin d'optimiser le processus de mise en œuvre.

REMERCIEMENTS

Nos sincères remerciements au Programme de Fonds Compétitifs et de Recherche (PFCR-3) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC/BENIN). Leur financement a permis de conduire les travaux à l'origine du présent article.

REFERENCES

- [1] SIMON G. (2020). Formulation et renforts de blocs en matériau terre pour une utilisation structurelle. Construction durable. INSA de Rennes, 2020. Français. NNT: 2020ISAR0007. tel-03194559.
- [2] GONTARD N., Guillard V., Gaucel S., Guillaume C. (2017). L'emballage alimentaire et l'innovation écologique dans toutes leurs dimensions. Innovations Agronomiques, INRAE, 2017, 58, pp.1-9. 10.15454/1.5137830815050605E12. hal-01668195.
- [3] DAVID G. (2019). Eco-conversion de résidus lignocellulosiques de l'agriculture en matériaux composites durables à matrice biopolyester. Autre. Université Montpellier, 2019. Français. NNT: 2019MONTG030. tel-02481223.
- [4] LAJARRIGE A. (2019). Exploring of risks and benefits related to the use of nanoclays in biodegradable materials for food contact application. Chemical and Process Engineering. Université Montpellier, 2019. English. NNT: 2019MONTG052. tel-02800339.
- [5] FANON J. (2019). Fragmentation des plastiques: effet de l'environnement et de la nature du polymère sur la taille et la forme des fragments générés. Matériaux. Le Mans Université, 2019. Français. NNT: 2019LEMA1033. tel-02954351.
- [6] LOPEZ D. (2018). Comportement d'un thermoplastique renforcé de fibres de verre soumis à des chargements thermo-mécaniques. Matériaux. Université de Bretagne Sud, 2018. Français. NNT: 2018LORIS488. tel-01977983.
- [7] HAJER D. (2018). Contribution à l'étude du comportement mécanique et vibratoire des composites biosourcés incorporant des matériaux fonctionnels. Acoustique [physics.class-ph]. Le Mans Université; Université de Sfax (Tunisie), 2018. Français. NNT: 2018LEMA1017. tel-01849252.

- [8] KABBEJ M. (2021). Modélisation multi-échelles des transferts de matière dans des bio microcomposites. Autre. Université Montpellier, 2021. Français. NNT: 2021MONTG078. tel-03602935.
- [9] SEYED A. B. (2012). Modification des propriétés physico-chimiques de l'amidon par procédés hydrothermiques: Contribution à l'étude des transferts couplés chaleur-masse. Autre. Université de La Rochelle, 2012. Français. NNT: 2012LAROS366. tel-00823904.
- [10] LEILA A. (2019). Modélisation des transferts couplés masse-chaleur dans un matériau amylicé lors des hydrotraitements par haute pression: caractérisations physicochimiques et thermophysiques. Thermique [physics.class-ph]. Université de La Rochelle, 2019. Français. NNT: 2019LAROS025. tel-03065830.
- [11] GBESSO G. H. Gbesso F., Gbaguidi S. (2015). Aspects Socio-Economiques Des Emballages-Feuilles Des Zones Humides Du Sud Benin décembre 2015 European Scientific Journal November 2015 edition vol.11, No.32 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
- [12] HAMMOU A.-D. (2012) *Contribution à l'étude et à la modélisation du comportement dynamique des emballages*. Mécanique. Algérie-France: Thèse de l'Université Djillali Liabès SidiBel Abbès et l'Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [13] ONZO C. Azokpota P. (2014) Caractéristiques physico-chimiques, phytochimiques et toxicité des espèces utilisées comme emballage alimentaires en Afrique de l'Ouest. International Journal of Biological and Chemical Sciences 8 (4), 10504-1516.
- [14] AOAC (Association of Official Analytical Chemists), *Official methods of Analysis*. (14th edn). Association of Official Analytical Chemists, Minnesota: USA, 1984.
- [15] LNE (laboratoire national de métrologie et d'essais). <https://www.lne.fr/fr/comprendre/la-metrologie>. Consulté le 15 août 2021.
- [16] AGBANGNAN P., Tachon C., Chrostowka A., Bonin H. et Fouquet E., Phytochemical study of a tinctorial plant of benin traditional pharmacopoeia: the red sorghum (*Sorghum caudatum*) of Benin, 13 (2), pp. 121 – 135, 2012.
- [17] KOUDORO D., Yovo M. et Agbangnan C.P.D. Chemical characterisation, andiradicaland entibacterial activities of the root bark of *Cochlospermum planchonii* of Benin, vol.07 (04), 1582-1594, 2014.
- [18] SORO B., Inza B., Etchian A. T. et Bokra B. Etude phytochimique et pharmacologique de *Bridelia furruginea* benth (euphorbiceae) sur la motricité du *Taenia colinde* cobaye vol.5.No.2, 2009.
- [19] BELIBI P. C. Elaboration et caractérisation des biofilms à base d'amidon de manioc renforcés par des charges minérales bi et tri-dimensionnelles. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Haute Alsace - Mulhouse; Université de Yaoundé. Faculté des Sciences, 2013. Français. NNT: 2013MULH6011. tel-01202602.
- [20] RAMANANKOARIVO (2015). Application de la méthode de Doehlert à l'optimisation du pouvoir couvrant, du temps de séchage et de la résistance à l'eau des peintures acryliques. Génie des procédés. Madagascar: Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master 2 recherche. 81p.
- [21] GOUPY J., L. CREIGHTON (2006) *Introduction aux plans d'expériences*. DUNOD 3^e édition, Pp179-199.
- [22] PONT E. (2011). Contrôle des impuretés dans les substances pour usage pharmaceutique selon la pharmacopée européenne: évolution des connaissances et des méthodes analytiques de contrôle. Pharmacie. France: Thèse de l'Université de Limoges.
- [23] GOLDFARB B., Pardoux C. (2013). Introduction à la méthode statistique. Statistique et probabilités. Cours et exercices corrigés. Dunod, 7^e édition. Pp215—273.
- [24] KOUASSI E. K. A. (2018). *Contribution à la valorisation des sous-produits agricoles en bioproducts*. France, Mémoire de thèse de l'Université de Toulouse.