



HAL
open science

Study of the technological properties of a wood-plastic composite developed in Benin

Togbé Armel Amadji, Edmond Codjo Adjovi, Jean Gérard, Jonathan Barés,
Vincent Huon

► To cite this version:

Togbé Armel Amadji, Edmond Codjo Adjovi, Jean Gérard, Jonathan Barés, Vincent Huon. Study of the technological properties of a wood-plastic composite developed in Benin. *Bois et Forêts des Tropiques*, 2021, 348, pp.49-63. 10.19182/bft2021.348.a36750 . hal-03345298

HAL Id: hal-03345298

<https://hal.science/hal-03345298>

Submitted on 15 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Étude des propriétés technologiques d'un composite bois-plastique élaboré au Bénin

Togbé Armel AMADJI¹
Edmond Codjo ADJOVI²
Jean GÉRARD^{3,4}
Jonathan BARÉS⁵
Vincent HUON⁵

¹ Université d'Abomey-Calavi
Laboratoire d'énergétique et de
mécanique appliquée (LEMA)
01 BP 2009
Cotonou
Bénin

² École Nationale Supérieure des Travaux
Publics
Université nationale des sciences,
technologies, ingénierie et
mathématique d'Abomey
BP 2282, Goho
Abomey
Bénin

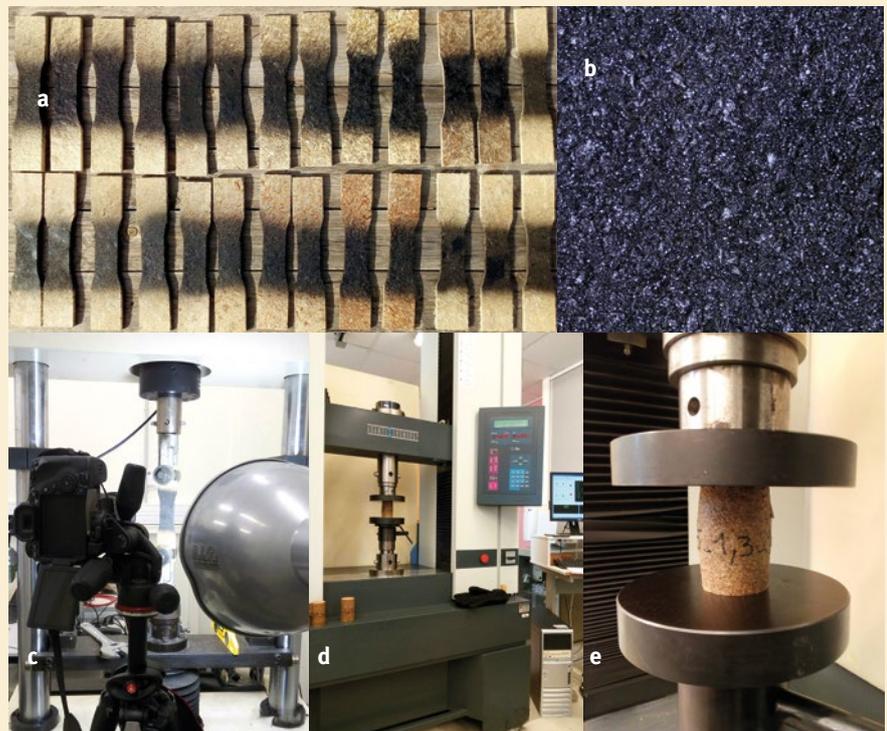
³ CIRAD
UPR BioWooEB
34398 Montpellier
France

⁴ BioWooEB
Univ Montpellier, CIRAD
Montpellier
France

⁵ LMGC
Univ Montpellier
CNRS
Montpellier
France

Auteur correspondant /
Corresponding author:

Jean GÉRARD - jean.gerard@cirad.fr



Photos 1.

Essais mécaniques : a) Éprouvettes de traction avec mouchetis (échelle 1 : 8) ; b) Distribution des points sur la surface d'observation avec mouchetis (échelle 1 : 1) ; c) Montage d'essai de traction ; d) Montage d'essai de compression ; e) Mode de déformation des éprouvettes de compression.

Mechanical tests: a) Tensile test specimen with speckles (scale 1:8); b) Distribution of points on the observation surface with speckles (scale 1:1); c) Tensile test set-up; d) Compression test set-up; e) Deformation mode of compression specimens.

Doi : 10.19182/bft2021.348.a36750 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 19 septembre 2020 ; date d'acceptation : 12 février 2021 ; date de publication : 18 juin 2021.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Amadji T. A., Adjovi E. C., Gérard J., Barés J., Huon V., 2021. Étude des propriétés technologiques d'un composite bois-plastique élaboré au Bénin. Bois et Forêts des Tropiques, 348 : 49-63.
Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.348.a36750>

RÉSUMÉ

Étude des propriétés technologiques d'un composite bois-plastique élaboré au Bénin

Au Bénin, les déchets issus de la transformation du bois sont très insuffisamment valorisés dans une perspective de réutilisation par l'industrie du bois. Les technologies de transformation de ces produits connexes, économiquement accessibles aux populations des pays en développement, constituent un domaine très peu abordé dans la littérature internationale. Dans le présent travail, un matériau constitué d'un mélange de sciure de bois de teck et de pâte de polystyrène recyclés, suivant une technologie simple à mettre en œuvre et de type *low-tech*, a été caractérisé. Les résultats obtenus ont montré que les propriétés du composite varient significativement avec la granulométrie de la sciure utilisée. La masse volumique apparente du matériau est comprise entre 686 et 826 kg/m³, son taux d'absorption d'eau est inférieur à 15 % et son taux de gonflement en épaisseur est inférieur à 5 % après 24 heures d'immersion. Une corrélation élevée a été observée entre ses propriétés physiques et sa porosité qui varie entre 34 et 43 % suivant la granulométrie des sciures de bois utilisées. Le composite présente un module d'élasticité en traction compris entre 582 et 1 057 MPa, une résistance en traction comprise entre 2 et 3 MPa et un coefficient de Poisson variant de 0,14 à 0,24. En compression, son module d'élasticité varie entre 270 et 470 MPa et sa résistance entre 6 et 9 MPa. Une mise en œuvre du composite ainsi élaboré peut être envisagée en substitution du bois pour des éléments faiblement chargés comme des pièces de coffrage de construction légère.

Mots-clés : déchets de bois, polystyrène, recyclage, matériau composite, propriétés physiques, propriétés mécaniques, Bénin.

ABSTRACT

Study of the technological properties of a wood-plastic composite developed in Benin

In Benin, very little reuse of waste from timber processing occurs within the wood industry. Few studies in the international literature address technologies for processing these by-products that are economically accessible to populations in developing countries. In this study, the aim was to characterise a material made of teak sawdust mixed with recycled polystyrene pulp using an easily implemented low-tech technology. Our results show that the properties of this composite material vary significantly with the grain size of the sawdust used. The material's bulk density ranges from 686 to 826 kg/m³, the moisture absorption rate is below 15% and thickness swell is below 5% after soaking for 24 hours. A high correlation was observed between its physical properties and its porosity, which varies from 34-43% depending on the grain size of the sawdust used. The composite material has a tensile modulus of elasticity ranging from 582 to 1057 MPa, tensile strength from 2 to 3 MPa and a Poisson coefficient ranging from 0.14-0.24. The compression modulus of elasticity ranges from 270-470 MPa and compressive strength from 6 to 9 MPa. This composite material can thus be considered for use as a wood substitute for non-load-bearing products such as shuttering for light construction.

Keywords: wood waste, polystyrene, recycling, composite material, physical properties, mechanical properties, Benin.

RESUMEN

Estudio de las propiedades tecnológicas de un composite de madera y plástico fabricado en Benín

En Benín, los residuos de la transformación de la madera no se recuperan suficientemente para reutilizarse en la industria maderera. Las tecnologías para el procesamiento de estos productos connexos, que son económicamente accesibles para la población de los países en desarrollo, han recibido muy poca atención en la literatura internacional. En el presente trabajo se caracterizó un material consistente en una mezcla de serrín de teca reciclado y pasta de poliestireno reciclada mediante una tecnología sencilla de aplicar y accesible para todos (*low-tech*). Los resultados mostraron que las propiedades del composite varían significativamente con la granulometría del serrín utilizado. El material tiene una densidad aparente de 686 a 826 kg/m³, un índice de absorción de agua inferior al 15 % y un índice de hinchamiento del espesor inferior al 5 % tras 24 horas de inmersión. Se observó una elevada correlación entre sus propiedades físicas y su porosidad, que varía del 34 al 43 % según la granulometría del serrín utilizado. El composite tiene un módulo de elasticidad de tracción entre 582 y 1057 MPa, una resistencia a la tracción entre 2 y 3 MPa y un coeficiente de Poisson entre 0,14 y 0,24. En compresión, su módulo de elasticidad varía entre 270 y 470 MPa y su resistencia entre 6 y 9 MPa. El composite puede utilizarse como sustituto de la madera para elementos con poca carga, como las piezas de encofrado en la construcción ligera.

Palabras clave: residuos de madera, poliestireno, reciclaje, material composite, propiedades físicas, propiedades mecánicas, Benín.

Introduction

Dans les pays en développement (PED), d'importantes quantités de déchets sont générées au cours de la transformation du bois. Le plus souvent, cette production de déchets est due non seulement à l'utilisation d'équipements non adaptés ou trop vétustes mais également à l'absence de maîtrise des techniques de transformation du bois par les opérateurs de la filière (Sales, 2003). Ces pertes touchent aussi bien l'industrie du bois que la production forestière en amont.

Au Bénin, les déchets de la transformation du bois sont très insuffisamment valorisés. Plus de 4 500 tonnes de sciures sont produites chaque année dans le pays (Chanhou *et al.*, 2018). La quasi-totalité est utilisée par les populations locales comme source d'énergie, comme composant d'assainissement dans le secteur avicole, ou bien abandonnée dans des décharges sauvages, contribuant ainsi à la pollution de l'environnement, notamment en milieu urbain. Ces déchets ne sont donc pas valorisés dans des conditions économiquement satisfaisantes, dans une perspective de réutilisation par l'industrie du bois. Les technologies de transformation des produits connexes de l'industrie du bois à la portée des populations des PED constituent un domaine très peu abordé dans la littérature internationale. Les technologies étudiées et proposées aujourd'hui impliquent l'utilisation de liants fabriqués dans les pays développés. Ces liants ont un coût élevé, leur approvisionnement est souvent aléatoire, et ils sont difficilement utilisables de façon rentable par les opérateurs locaux. Est-il envisageable de mettre au point et de développer des procédés de type *low-tech* accessibles aux PME et TPE locales, pour transformer et valoriser ces déchets ?

Parallèlement, le Bénin est aussi confronté à un problème majeur de gestion des déchets non biodégradables. Les décharges du pays reçoivent chaque année plus de 120 000 tonnes de plastiques de différents types (UEMOA, 2013) dont le polystyrène expansé d'emballage, provenant essentiellement des activités commerciales d'importation. Ce polystyrène est le troisième thermoplastique le plus utilisé dans le monde après le polyéthylène et le polypropylène (Abdel Mohsen, 2014).

Une valorisation simultanée des produits connexes de l'industrie du bois et des déchets de polystyrène serait envisageable pour obtenir des composites bois-plastique aux propriétés mécaniques et physiques adaptées pour une utilisation sous forme de matériaux destinés à différents types d'emplois intérieurs ou extérieurs.

De nombreux travaux scientifiques, qui ont parfois débouché sur des applications industrielles, ont porté sur la valorisation des produits connexes de l'industrie du bois. La fabrication de panneaux de particules ou de panneaux de fibres est un axe de valorisation majeur (Maldas *et al.*, 1988 ; Borsoi *et al.*, 2013 ; Chindaprasirt *et al.*, 2015 ; Taghiyari *et al.*, 2018), et différentes méthodes d'élabora-

tion de ces panneaux sont mises en œuvre. Les techniques d'extrusion (Flores-Hernández *et al.*, 2013), d'injection (Kuo *et al.*, 2009) et de thermoformage (Poletto *et al.*, 2011) ont été aussi étudiées. Cependant, comme mentionné précédemment, ces procédés restent peu accessibles aux PED du fait du coût des intrants et des technologies mises en œuvre.

Un itinéraire de valorisation de la sciure de bois, accessible à des opérateurs locaux et adapté aux réalités des conditions de transformation dans un contexte sous contraintes (Afrique subsaharienne, et Bénin en particulier), a été proposé par Agoua *et al.* (2013) pour élaborer un matériau de type composite. Cette technologie met en œuvre un liant à base de polystyrène d'emballage dissous dans un solvant pour fabriquer des panneaux de sciures de bois. Ce matériau est un composite bois-polystyrène (CBPo) constitué de 33 à 40 % de sciure de bois et de 60 à 67 % de colle de polystyrène expansé d'emballage (polystyrène dissous dans de l'essence selon le ratio [masse essence/masse PS = 1,8]). Cependant, il a été développé uniquement pour ses propriétés thermiques ; ses caractéristiques mécaniques et physiques ne sont pas connues, ce qui limite son utilisation en tant que produit d'ingénierie.

L'étude proposée porte sur la fabrication d'un CBPo et la détermination expérimentale de ses principales propriétés physiques et mécaniques, suivant un échantillonnage univarié (granulométrie). Cette étude s'inscrit dans une série de travaux consacrés à la maîtrise et à l'amélioration des propriétés du CBPo pour une utilisation comme matériau de construction. Les caractéristiques physiques évaluées sont les masses volumiques apparente et particulaire (ou de la matière), le taux d'absorption d'eau et le gonflement en épaisseur. La porosité du composite a été également déterminée ; elle a été évaluée en tant que paramètre lié au procédé de mise en forme utilisé (moulage par compression) et pouvant influencer les propriétés du CBPo. Le module de Young, le coefficient de Poisson et la contrainte maximum en traction et en compression sont les caractéristiques mécaniques étudiées.

Matériels et méthodes

Matériaux constitutifs de base

Le composé ligneux de base utilisé pour la fabrication du CBPo est de la sciure de bois de teck de plantation (*Tectona grandis* L. f.) obtenue auprès de l'Office national du bois (ONAB), la plus importante société de transformation du bois de teck en République du Bénin. Le choix du teck est lié à l'importance de cette essence au Bénin ; elle est largement plantée, exploitée et utilisée, pour son fort potentiel de transformation associé à sa forte valeur ajoutée (Atindogbé *et al.*, 2013). La courbe granulométrique de la

sciure (figure 1) montre qu'elle est constituée principalement, à plus de 90 %, de particules de taille comprise entre 0,16 mm et 2,5 mm. Quatre classes granulaires ont été distinguées pour l'étude (tableau I).

Avant d'être utilisées, les sciures ont été séchées en étuve à 103 ± 2 °C jusqu'à l'état anhydre (masse d'un échantillon variant de moins de 0,1 % entre deux pesées successives espacées de 2 heures), puis emballées afin de préserver leur état anhydre et se prémunir ainsi de l'effet défavorable de l'humidité à l'interface bois-plastique (Almusawi, 2017).

Le polystyrène expansé d'emballage (PSE) utilisé a été collecté dans les magasins de vente de motocycles et d'appareils électroménagers de la ville de Cotonou, et sur les décharges du centre Valdera de l'Université d'Abomey-Calavi. Il a été nettoyé manuellement de toutes ses impuretés, avec de l'eau savonneuse, puis rincé et séché au soleil. Il a ensuite été réduit à la main en fragments de moins de 5 cm de côté. De façon similaire aux expérimentations de Agoua *et al.* (2013), le polystyrène utilisé a été dissous dans de l'essence. La densité du polystyrène massif ainsi obtenu (non totalement solidifié, après 6 mois de désorption) est en moyenne de 0,91. L'essence utilisée est composée en moyenne de 20 à 30 % d'alcane, 5 % de cyclo-alcane, 30 à 45 % d'alcène, et 30 à 45 % d'hydrocarbures de la famille du benzène. Cette essence est issue du commerce de détail où elle est largement disponible à moindre coût ; elle est incolore et sa masse volumique à 15 °C est comprise entre 715 et 770 kg/m³.

Préparation du composite

La dissolution des morceaux de PSE dans l'essence a permis de fabriquer le liant (ou « colle ») qui va constituer la matrice du composite. Le ratio [masse essence/masse polystyrène] utilisé est de 1,22. Ce ratio avait été expérimentalement optimisé par Agoua *et al.* (2013). Il minimise la quantité d'essence, solvant volatil dont l'évaporation

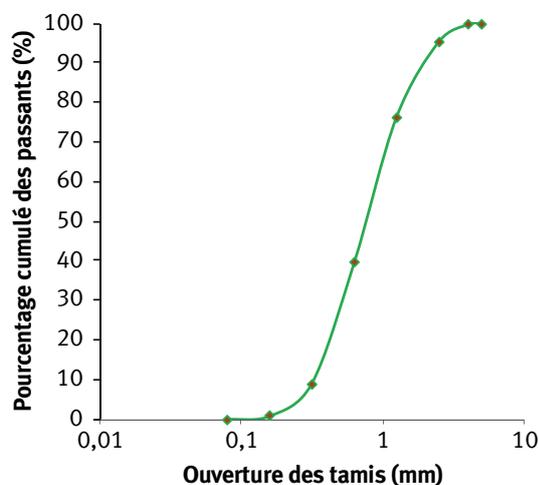


Figure 1.
Courbe granulométrique de la sciure utilisée.
Sieve curve of the sawdust used.

Tableau I.
Identification des échantillons.
Identification of samples.

Taille des particules (mm)	Ouverture du tamis (mm)	Code échantillon
$0,160 \leq t < 0,315$	0,160	Cg160
$0,315 \leq t < 0,630$	0,315	Cg315
$0,630 \leq t < 1,250$	0,630	Cg630
$1,250 \leq t < 2,500$	1,250	Cg1250

conditionne le temps de stabilisation et le durcissement du composite.

Le mélange colle de polystyrène - sciures a été réalisé à l'aide d'un malaxeur de marque Hobart afin de garantir l'homogénéité du composite. Le temps de mélange est de 90 secondes. Quatre échantillons ont été formulés sur la base de quatre classes granulaires différentes, Cg160, Cg315, Cg630 et Cg1250 (tableau I), avec une proportion massique de 40 % de particules de bois dans le composite. Le choix de cette proportion résulte d'essais préliminaires qui ont montré que le composite devenait moins homogène lorsque la proportion en particules de bois diminue, et moins intéressant mécaniquement quand cette proportion augmente.

Les mélanges à l'état foisonné sont étalés à l'air libre pendant 20 minutes afin de les rendre consistants, par volatilisation de l'essence, pour éviter les fuites de matière du moule pendant le moulage et permettre un démoulage sans colmatage. Les dimensions intérieures du moule sont de 571 mm x 148 mm x 40 mm.

Le moulage est effectué à l'aide d'une presse mécanique par compression à froid sous faible contrainte (5 MPa) afin de préserver l'intégrité des particules de bois et limiter les sollicitations exercées sur le moule. Cette contrainte est maintenue pendant 5 mn pour permettre une bonne distribution du composite dans le moule. Après démoulage, les quatre catégories de plaques d'épaisseur 10 mm obtenues, correspondant chacune à une classe granulaire, ont été séchées à l'air dans les conditions ambiantes pendant 30 jours, jusqu'à stabilisation de leur masse.

Mesure des masses volumiques et de la porosité des échantillons

Pour chaque échantillon, les trois caractéristiques suivantes ont été déterminées : masse volumique particulaire (ou masse volumique effective de la matière constitutive) ρ_p , masse volumique apparente ρ_b et porosité p . Six éprouvettes ont été utilisées par échantillon. La masse des éprouvettes a été déterminée à l'aide d'une balance digitale de type Mettler AE 160 de précision 0,0001 g.

La masse volumique particulaire ρ_p est le rapport entre la masse d'un échantillon et le volume de sa matière constitutive qui est le volume total de l'échantillon diminué du volume occupé par les pores. Le volume de la matière constitutive a été déterminé à l'aide d'un pycnomètre à déplacement de gaz (hélium), de type AccuPyc II 1340, équipé d'une cellule pour échantillon de 10 cm³. Cet appareil ne permet pas d'accéder aux porosités fermées donc ne permet pas de déterminer des densités absolues. Les éprouvettes ont été préalablement déshumidifiées dans un dessiccateur à silica-gel. Pour chaque éprouvette, 20 cycles de mesure du volume ont été réalisés.

La masse volumique apparente ρ_b est le rapport entre la masse de l'échantillon et son volume total (ou volume d'enveloppe) qui a été déterminé par la méthode de la double pesée (utilisation du principe de la poussée d'Archimède) : ce volume est déterminé par le poids du volume d'eau déplacé lors de l'immersion d'une éprouvette dans un bécher rempli d'eau pesé avant et après l'immersion.

La porosité d'un matériau exprime la proportion de vides qu'il contient par rapport à son volume total. Elle est donc égale à la différence relative des masses volumiques apparente et particulaire. Pour les éprouvettes de chaque échantillon, la porosité p (en pourcentage) a été calculée suivant la formule :

$$p(\%) = 100 \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \right) \quad (\text{équation 1})$$

Les moyennes arithmétiques ont été déterminées et les écarts-types associés ont été calculés selon l'équation :

$$\Delta p = p \times \left[\left(\frac{\Delta \rho_b}{\rho_b} \right)^2 + \left(\frac{\rho_b \Delta \rho_p}{\rho_p^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{équation 2})$$

Mesure de l'absorption d'eau et du gonflement en épaisseur

L'absorption d'eau et le gonflement en épaisseur ont été déterminés selon la norme ASTM D 1037-12 (2012). Pour chaque échantillon, six éprouvettes de dimensions [152 x 152 mm² x épaisseur originale des plaques] ont été prélevées puis immergées dans de l'eau à une température de 20 ± 1 °C. Les masses, les dimensions et les volumes ont été déterminés après deux heures puis après 24 h. L'absorption (ou le gonflement) de chaque éprouvette est égale au rapport (en %) entre l'augmentation des grandeurs mesurées et leurs valeurs initiales.

Caractérisation des échantillons en traction

L'essai de traction a été réalisé suivant la norme ASTM D 1037-12 (2012). Six éprouvettes de dimensions normalisées ont été prélevées dans chaque catégorie de plaques (figure 2). Les échantillons ont été découpés à la scie circulaire, dans la direction transverse par rapport à la direction de pressage. L'essai a été effectué sur une machine de marque MTS pilotée en déplacement par un ordinateur qui enregistre l'évolution du chargement. La vitesse d'essai utilisée est de 4 mm/min.

Afin de déterminer les caractéristiques élastiques locales du matériau (module d'élasticité et coefficient de Poisson), une analyse du champ de déplacements a été effectuée par la méthode de corrélation d'images numériques. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et relativement peu onéreuse (Claire *et al.*, 2003). À cet effet, un mouchetis de peinture (marqueur) blanc et noir a été déposé sur la face d'observation des éprouvettes (photo 1a) afin d'enrichir la texture naturelle (photo 1b). Le mouchetis est appliqué sur toutes les éprouvettes à l'exception des Cg160 dont la texture fine est suffisante pour analyser le champ de déplacements. Chaque éprouvette est montée sur la machine d'essai, éclairée par une lampe et photographiée toute les secondes à l'aide d'un appareil CANON (70D) de type Reflex (photo 1c). La détermination du champ de déplacements, le calcul du module d'élasticité et celui du coefficient de Poisson sont effectués à l'aide d'un programme informatique écrit avec le langage de programmation Python par le Laboratoire de mécanique et de génie civil de l'Université de Montpellier, France (Vu *et al.*, 2019).

La contrainte maximum est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_{t \max} = \frac{F_{t \max}}{e.l} \quad (\text{équation 3})$$

où $\sigma_{t \max}$ est la contrainte maximale à la traction en MPa, e est l'épaisseur de l'éprouvette en mm, l est la largeur de l'éprouvette en mm, $F_{t \max}$ est la charge maximale en N.

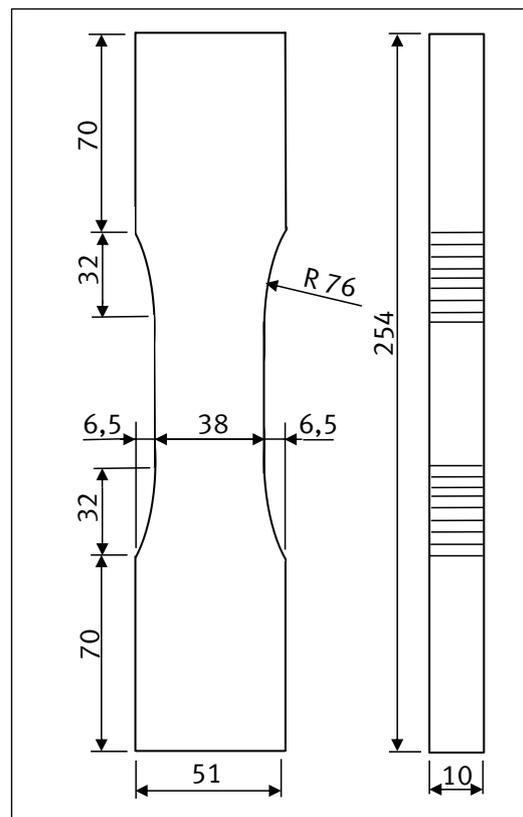


Figure 2.
 Schéma de l'éprouvette de traction
 (dimensions en millimètres).
 Diagram of the tensile test specimen
 (dimensions in millimetres).

Caractérisation des échantillons en compression

Les éprouvettes utilisées pour l'essai de compression sont de forme cylindrique. Elles ont été fabriquées à l'aide d'un moule cylindrique en acier E 400 (diamètre extérieur : 60 mm ; diamètre intérieur : 40 mm ; hauteur : 160 mm). Au démoulage, le diamètre des éprouvettes est compris entre 43 et 45 mm. Comme pour les éprouvettes de traction, les essais ont eu lieu après 4 semaines de séchage en atmosphère ambiante, après stabilisation de la masse. Les éprouvettes ont été profilées à la scie circulaire (en atelier de menuiserie) à une hauteur de 90 mm. Pour chaque échantillon, six éprouvettes ont été testées. L'essai est conduit suivant la direction du pressage. Il a été effectué sur

Lorsqu'elles subissent l'effort de compression durant l'essai, les éprouvettes prennent une forme de tonneau (photo 1e). Pour chaque éprouvette, le module d'élasticité E_c et la contrainte maximum $\sigma_{c\ max}$ ont été déterminés. Le module d'élasticité correspond à la pente de la droite d'ajustement (méthode des moindres carrés) des points compris entre $\varepsilon_1 = 0,002$ et $\varepsilon_2 = 0,005$ du domaine linéaire de la courbe contrainte (σ)-déformation (ε).

La contrainte maximum $\sigma_{c\ max}$ est calculée selon la formule ci-après :

$$\sigma_{c\ max} = \frac{4F_{c\ max}}{\pi D^2} \quad (\text{équation 4})$$

où $F_{c\ max}$ est la force de compression en N, D est le diamètre de l'éprouvette en mm.

Tableau II.

Propriétés physiques du composite : densité et porosité.
Physical properties of the composite: density and porosity.

Échantillons	Nombre d'éprouvettes	Masse volumique apparente (kg/m ³)		Masse volumique particulaire (kg/m ³)		Porosité (%)	
		Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Cg160	6	831,0	1,98	1 253,8	0,47	33,7	2,01
Cg315	6	786,6	1,78	1 244,1	0,44	36,8	1,80
Cg630	6	712,0	0,93	1 229,9	0,44	42,1	0,97
Cg1250	6	685,7	1,20	1 209,5	0,88	43,3	1,30

CV : coefficient de variation.

Caractérisation macroscopique et microscopique du composite

Le faciès de rupture en traction a été analysé et l'homogénéité des échantillons a été appréciée par imagerie successivement au niveau macroscopique puis microscopique, par microscopie électronique à balayage (MEB FEI Quanta 200 FEG, Hitachi). Les faciès de rupture observés aussi bien macroscopiquement qu'au MEB n'ont subi aucun traitement spécifique au préalable.

Analyse statistique

Les résultats des essais ont fait l'objet d'une analyse statistique en utilisant le test de Student pour la comparaison de deux moyennes et

l'ANOVA pour la comparaison de plus de deux moyennes, au seuil de 5 %.

Résultats et discussion

Propriétés physiques

Masses volumiques et porosité

Les résultats du calcul des masses volumiques apparente et particulaire du composite sont présentés dans le tableau II. On observe que les deux types de masses volumiques varient selon les classes granulaires. Pour chacune des deux masses volumiques, les valeurs moyennes sont différentes d'un échantillon à un autre (test ANOVA, tableau IIIa).

La figure 3 montre que la masse volumique apparente du matériau diminue quand la taille des particules de bois augmente (de 826 kg/m³ pour Cg160 à 686 kg/m³ pour Cg1250) (tableau II), et ceci avec une corrélation élevée ($r = -0,93$). La dispersion des valeurs mesurées autour des moyennes des masses volumiques n'affecte pas cette ten-

une machine de marque MTS (photo 1d) suivant les préconisations de la norme ASTM D 1037-12 (partie 12.5 : *Speed of Testing*), soit une vitesse de sollicitation de 0,5 mm/mn, avec une marge de ± 50 %. Une vitesse de 0,6 mm/mn retenue lors d'essais préliminaires conduisait à une durée d'essai d'environ 30 mn (pour un raccourcissement total de l'ordre de 20 mm). Il a été alors décidé de réduire de moitié le temps d'essai en adoptant une vitesse de 1,2 mm/mn.

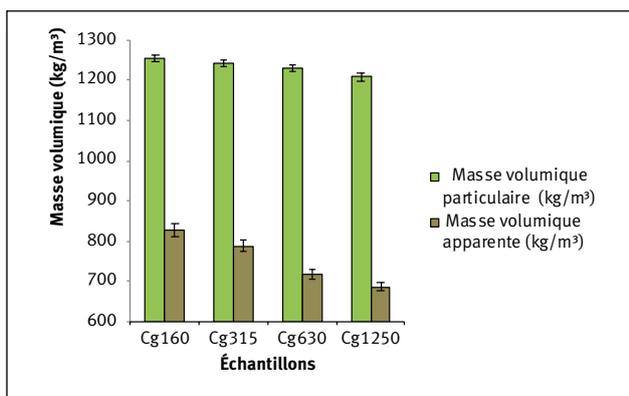


Figure 3.

Masses volumiques apparente et particulaire des échantillons.
Apparent and particulate densities of the samples.

Tableau IIIa.
 Résultats de l'ANOVA.
 Results of the ANOVA.

Propriétés analysées	Degré de liberté	Valeur de F	Valeur critique pour F	Probabilité (p)	Signification (p < 0,05 ≡ *)
Masse volumique particulaire	23	43,14	3,098	6,4026E-09	*
Masse volumique apparente	23	185,27	3,098	9,3075E-15	*
Porosité	23	110,61	3,098	1,2694E-12	*
Absorption d'eau après 24 h	23	26,13	3,098	4,0275E-07	*
Gonflement après 24 h	23	7,51	3,098	1,4759 E-03	*
Coefficient de Poisson en traction	23	10,08	3,098	2,9568 E-04	*

valeurs moyennes de cette caractéristique sont significativement différentes d'un échantillon à un autre (selon l'ANOVA ; tableau IIIa). La porosité, élevée du fait du mode de mélange, croît avec l'augmentation de la taille des particules de bois (corrélation de 0,91 entre les deux variables). Ce résultat était attendu du fait de la relation

dance. Les coefficients de variation obtenus sont faibles, allant d'un minimum de 0,93 % (échantillon Cg630) à un maximum de 1,98 % (échantillon Cg160). Cette faible dispersion des masses volumiques s'explique par la bonne homogénéité des mélanges obtenue grâce à la technique et au matériel de fabrication utilisés. Ces résultats sont différents de ceux de Stark et Berger (1997) qui montrent que, lorsque la proportion en bois est de 40 % (en poids), la taille des particules n'affecte pas la masse volumique du composite.

La figure 3 montre aussi que la masse volumique particulaire diminue lorsque la taille des particules de bois augmente, mais cette diminution, bien que régulière, reste faible pour l'ensemble des échantillons, avec moins de 4 % entre les deux classes granulaires extrêmes (1 253,8 kg/m³ pour l'échantillon Cg160 contre 1 209,5 kg/m³ pour l'échantillon Cg1250) (tableau II). Ce résultat peut s'expliquer par l'augmentation de la proportion de méats cellulaires dans les particules lorsque la granulométrie augmente. Plus les particules sont fines, plus la fragmentation du bois est élevée, plus la densité de particules augmente en se rapprochant de celle de la matière ligneuse (1,53). De plus, on remarque une très faible dispersion des mesures autour des moyennes (coefficient de variation inférieur à 1 % pour les quatre classes), indicatrice de la très bonne homogénéité du composite pour chacune des classes granulaires.

Les résultats des mesures de porosité sont présentés dans le tableau II et la figure 4. Les

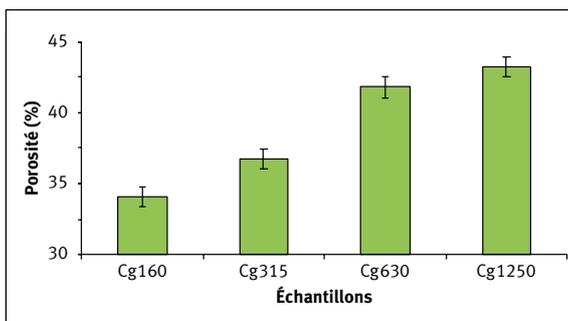


Figure 4.
 Porosité des échantillons.
 Porosity of the samples.

entre la porosité du composite et les masses volumiques apparente et particulaire. Pour comparaison, la porosité du bois de teck dont les sciures sont issues est comprise entre 40 et 43 %.

Taux d'absorption d'eau et gonflement en épaisseur

Le tableau IV présente les résultats des taux d'absorption d'eau et de gonflement en épaisseur après deux heures puis 24 h d'immersion dans l'eau pour les quatre séries d'éprouvettes de chaque échantillon. Un test de Student (tableau IIIb) montre l'absence de différence significative entre les taux d'absorption après 2 h d'immersion des échantillons pour Cg160 et Cg315, d'une part, et Cg630 et

Tableau IIIb.
 Résultats du test de Student.
 Results of the Student test.

Propriétés analysées	Classes granulaires analysées	Probabilité (p)	Signification (p < 0,05 ≡ *)
Absorption d'eau après 2 h	Cg160 et Cg315	0,7724	NS
	Cg315 et Cg630	4,3639 × 10 ⁻⁶	*
	Cg630 et Cg1250	0,0657	NS
Module de Young en traction	Cg160 et Cg315	0,0681	NS
	Cg315 et Cg630	2,86 × 10 ⁻⁴	*
	Cg630 et Cg1250	0,2566	NS
Contrainte maximum en traction	Cg160 et Cg315	0,1509	NS
	Cg315 et Cg630	0,0240	*
	Cg630 et Cg1250	0,2204	NS
Module de Young en compression	Cg160 et Cg315	0,9838	NS
	Cg315 et Cg630	2,30 × 10 ⁻⁵	*
	Cg630 et Cg1250	0,0592	NS
Contrainte maximum en compression	Cg160 et Cg315	0,7346	NS
	Cg315 et Cg630	2,67 × 10 ⁻³	*
	Cg630 et Cg1250	0,0236	*

NS : non significatif.

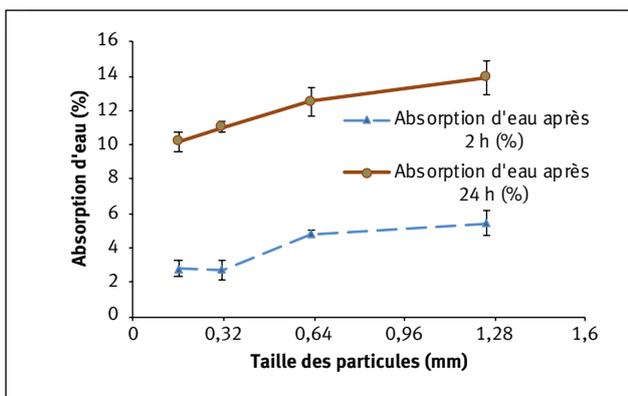
Tableau IV.

Propriétés physiques du composite : taux d'absorption et gonflement en épaisseur.
Physical properties of the composite: absorption rate and thickness swelling.

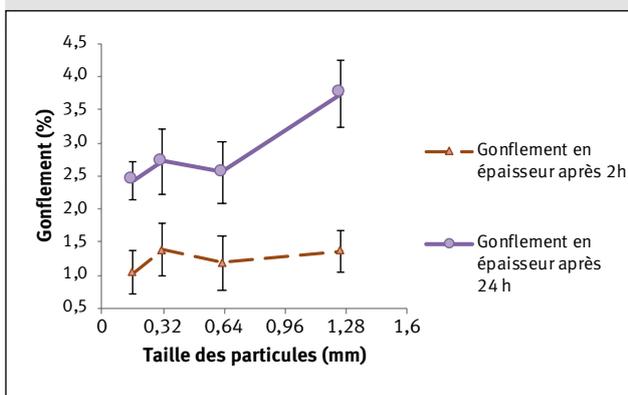
Échantillons	Nombre d'éprouvettes	Absorption d'eau (%)				Gonflement en épaisseur (%)			
		Après 2 h		Après 24 h		Après 2 h		Après 24 h	
		Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Cg160	6	2,79	17,3	10,2	8,49	1,19	28,2	2,43	12,0
Cg315	6	2,71	19,7	11,0	3,05	1,38	28,3	2,72	23,0
Cg630	6	4,81	4,5	12,5	6,51	1,19	34,5	2,55	17,9
Cg1250	6	5,43	12,8	13,9	7,13	1,37	22,7	3,74	13,6

CV : coefficient de variation.

Cg1250, d'autre part, mais les taux pour Cg315 et Cg630 sont significativement différents. L'ANOVA (tableau IIIa) met en évidence une différence significative entre les taux d'absorption des quatre classes granulaires après 24 h d'immer-

**Figure 5.**

Évolution du taux d'absorption d'eau du composite en fonction de la taille des particules.
Evolution of the water absorption rate of the composite as a function of particle size.

**Figure 6.**

Évolution du taux de gonflement en épaisseur du composite en fonction de la taille des particules.
Evolution of the thickness swelling rate of the composite as a function of particle size.

sion. Après 24 h d'immersion, le taux d'absorption, toujours supérieur à celui après 2 h, augmente avec la taille des particules (figure 5).

Aucune différence significative de gonflement en épaisseur n'est constatée entre les quatre classes granulaires après 2 h d'immersion des éprouvettes. En revanche, après 24 h d'immersion, on observe que les gonflements augmentent globalement avec la taille des particules (tableau IV et figure 6).

L'augmentation des taux d'absorption et des gonflements en épaisseur avec la taille des particules est liée au fait que le gonflement est une conséquence de l'absorption, d'une part, et que ces deux caractéristiques sont liées à la porosité, d'autre part. Dans l'ensemble, on observe qu'après 24 h d'immersion le composite bois-plastique étudié présente un taux d'absorption peu élevé (moins de 15 %), plus faible que le point de saturation des fibres du bois de teck (24 % en moyenne). Le gonflement en épaisseur est négligeable, moins de 4 %, soit une valeur plus faible que le gonflement tangentiel total du bois de teck qui est de 4,9 % en moyenne, le gonflement volumique moyen de cette essence étant de 8,9 % (la sciure utilisée dans le CBPo est celle du bois de teck). Pour comparaison, les gonflements volumiques d'un composite polypropylène-farine de bois (mélange sapin-épicéa) sont respectivement de 0,4 %, 2 %, 5,6 %, 8 % et 10,8 % pour des taux de farine de 10 %, 30 %, 40 %, 50 % et 60 % (Lahmar, 2016).

Propriétés mécaniques du composite en traction et en compression

Module d'élasticité, contrainte de rupture et coefficient de Poisson en traction

L'essai de traction permet d'apprécier la cohésion entre les particules de bois et la matrice polymère, et de connaître les limites de sollicitation du matériau à l'étirement. La figure 7a présente des courbes-typiques contrainte-déformation de traction pour les quatre classes granulaires. Tous les échantillons ont le même comportement en traction, marqué par une rupture fragile. L'analyse du champ des

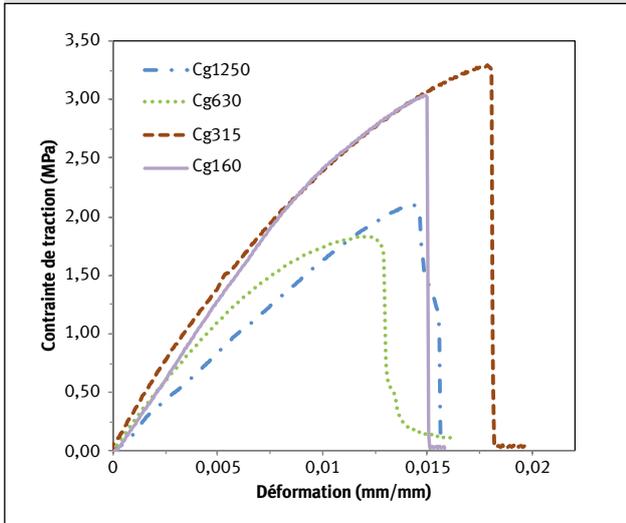


Figure 7a.
 Courbes-typiques contrainte-déformation des échantillons en traction.
Typical stress-strain curves of tensile samples.

déplacements sur la face observée (surface pulvérisée de mouchetis) a permis de constater que celui-ci est uniforme pour les faibles valeurs de charges (figure 7b), correspondant vraisemblablement à la zone élastique. Les déplacements s'amplifient ensuite sur un côté de la zone centrale de section réduite jusqu'à la rupture. L'uniformité du champ de déplacements pour les faibles valeurs de charges est un indicateur de l'homogénéité des propriétés élastiques locales du matériau.

Les valeurs des modules de Young, des contraintes de rupture et des coefficients de Poisson obtenues pour les quatre classes granulaires sont données dans le tableau V. La figure 8 associée à un test de Student (tableau IIIb) montre une augmentation statistiquement non significative du module de Young en traction quand la taille des particules de bois passe de Cg160 à Cg315, puis une diminution statistiquement significative de 45 % entre Cg315 et Cg630 ; aucune différence significative n'est observée entre les modules de Cg630 et Cg1250.

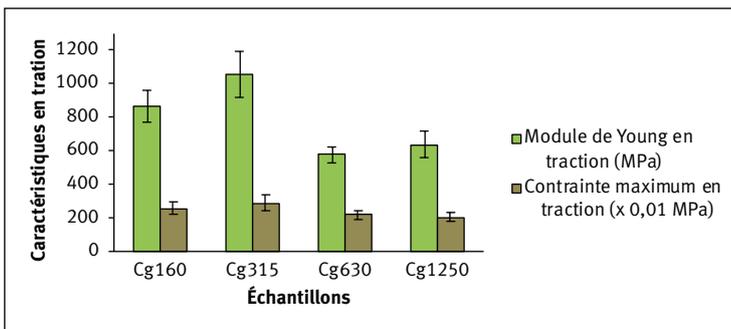


Figure 8.
 Module d'élasticité et contrainte maximum en traction.
Modulus of elasticity and maximum tensile stress.

La même tendance est observée avec la contrainte maximum en traction qui augmente de façon non significative quand la taille des particules de bois passe de Cg160 à Cg315, puis diminue de plus de 30 % lorsque la taille des particules passe de Cg315 à Cg630 puis Cg1250.

Une corrélation élevée a été observée entre la porosité et la contrainte maximum en traction ($r^2 = 0,70$), d'une part, et le module de Young ($r^2 = 0,62$), d'autre part.

Dans l'ensemble, le module de Young et la contrainte maximum en traction diminuent lorsque la taille des particules de bois augmente. La diminution des caractéristiques est liée à deux phénomènes : diminution de la quantité d'interface et augmentation de la porosité dans le composite liées à l'augmentation de la taille des particules (à masse de charges constante) ; état non totalement solidifié de la matrice, préjudiciable à la rigidité du composite.

La solidification incomplète de la matrice est liée à la présence résiduelle de solvant dans le composite. En effet, après exposition à l'air à l'état foisonné (juste avant le moulage), on observe qu'un composite à base de particules fines sèche plus rapidement qu'un composite à

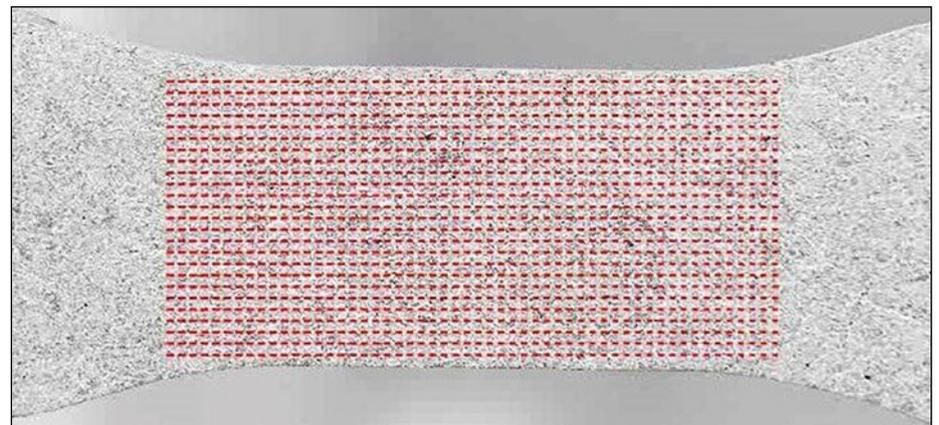


Figure 7b.
 Champs de déplacements pour les faibles valeurs de charges ($\sigma = 0,5 \text{ MPa}$) (échelle : 1/1).
Displacement fields for low load values ($\sigma = 0.5 \text{ MPa}$) (scale: 1/1).

base de particules de plus grande taille que la colle agglutine davantage. À masse égale, le volume de particules de bois est d'autant moins important que la taille de ces particules augmente, le mélange ayant alors tendance à former

des agglomérats qui bloquent le solvant et freinent son élimination du composite. L'élimination complète du solvant par évaporation est relativement longue (Hwang *et al.*, 1999). Les essais de traction ont été réalisés quatre semaines après la fabrication des éprouvettes. Pour les classes granulaires Cg630 et Cg1250, le solvant ne devait pas être totalement évaporé, ce qui n'a pas permis à la matrice PSE de jouer pleinement son rôle mécanique de transmission des efforts entre les particules de bois dans le composite. Dans le cadre de cette cam-

Tableau V.
Propriétés mécaniques du composite et de matériaux similaires.
Mechanical properties of composite and similar materials.

Échantillons selon les classes granulaires	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Traction			Compression	
		Module d'élasticité (MPa)	Contrainte maximum (MPa)	Coefficient de Poisson	Module d'élasticité (MPa)	Contrainte maximum (MPa)
Cg160	826 ± 91	866,2 ± 95,6	2,6 ± 0,3	0,14 ± 0,01	473,0 ± 52,8	9,1 ± 0,6
Cg315	787 ± 89	1057,1 ± 133,7	2,9 ± 0,5	0,16 ± 0,03	472,3 ± 47,1	9,2 ± 0,6
Cg630	715 ± 64	582,7 ± 47,3	2,2 ± 0,3	0,21 ± 0,05	305,5 ± 28,0	6,8 ± 0,5
Cg1250	686 ± 74	638,0 ± 78,7	2,1 ± 0,3	0,24 ± 0,03	272,5 ± 29,9	5,6 ± 0,7
CBPo (toutes classes granulaires confondues)	686-826	582-1057	2-3	0,14-0,24	270-470	6-9
Bois de <i>Gmelina arborea</i>	450-530	/	1,9-2,2	/	/	20-40
Bois de <i>Tectona grandis</i> (teck) (Gérard <i>et al.</i> , 2016)	570-820	/	2,2-3,5	/	/	44-70
PSE commercial (Harper, 1999)	/	/	35,9	/	3 400	82,7
PSE recyclé avec huiles usées de cuisine (Sarmiento <i>et al.</i> , 2016)	/	/	16,1 ± 1,1	/	267,2 ± 94,6	18,1 ± 2,9
Composite PS-fibres de sisal traité au benzoyle (10 à 30 % de fibres, moulé par injection à 150 °C) (Manikandan Nair <i>et al.</i> , 1996)	/	400-1 000	/	/	/	/
Composite PS-fibres de sisal non traité (10 à 30 % de fibres, moulé par injection à 150 °C) (Manikandan Nair <i>et al.</i> , 1996)	/	630-670	21-25	/	/	/
Composite PS-fibres de palmier-dattier ⁽¹⁾ (70-80 % de fibres / 20-30 % PS) (Masri <i>et al.</i> , 2018)	542-824	120-760	0,43-2,96	/	/	/
MDF ⁽¹⁾ (<i>medium density fiberboard</i>), (Binhussain et El-Tonsy, 2013)	650-790	1,35-2,5	9,5-22	/	/	/

(1) Propriétés en flexion trois points.

pagne d'essais, un séchage du composite en étuve à 100 °C pour éliminer totalement le solvant n'a pas été possible pour des raisons de sécurité. Une série d'expérimentations conduites par la suite sur un échantillonnage très restreint a montré qu'un séchage à 100 °C permet l'élimination rapide et quasi complète du solvant à l'origine des composés organiques volatils. Ce séchage sera de plus indispensable pour pallier les problèmes de toxicité liés à l'évaporation de ces composés.

Le coefficient de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué, la direction longitudinale dans le cas présent de l'essai de traction. Pour les échantillons testés, le coefficient de Poisson est compris entre 0,14 et 0,24 (tableau V). La figure 9 montre qu'il croît quasi linéairement avec la taille des particules ($r^2 = 0,92$). Il est donc aussi fortement corrélé à la porosité du composite ($r^2 = 0,98$).

Propriétés du composite en compression

La figure 10 montre que le composite a un comportement de type ductile caractérisé par trois domaines : un premier domaine de comportement élastique quasi linéaire (déformation < 0,025) où les contraintes et les déformations peuvent être reliées par la loi de Hooke ; un deuxième domaine (déformation comprise entre 0,025 et 0,15) caractérisé par des déformations irréversibles avec apparition des premières fissures ; un troisième domaine où le matériau est entièrement ruiné (déformation > 0,15).

La comparaison des courbes montre que l'accroissement de la taille des particules (de 0,160 à 1,25 mm) n'influence pas le mécanisme d'endommagement du composite qui reste de type ductile quel que soit l'échantillon.

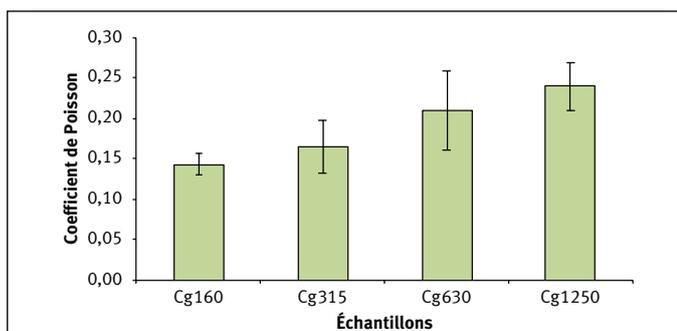


Figure 9.
Coefficient de Poisson en traction.
Poisson's ratio in tension

Les moyennes des modules d'élasticité et des contraintes maximums en compression sont présentées dans le tableau V. Un test de Student (tableau IIIb) met en évidence l'absence de différence significative entre les modules des échantillons Cg160 et Cg315, d'une part, et les modules des échantillons Cg630 et Cg1250, d'autre part. En revanche, une diminution significative est observée entre les modules des échantillons Cg315 et Cg630.

Une diminution significative de la contrainte maximum en compression (tableau IIIb) est constatée lorsque la taille des particules de bois augmente entre les classes Cg315, Cg630 et Cg1250, mais aucune différence significative n'est observée entre les contraintes maximums des classes Cg160 et Cg315.

Globalement, le module d'élasticité longitudinal du composite en compression ainsi que la contrainte maximum diminuent quand la taille des particules de bois augmente (figure 11). Une forte corrélation a été observée entre la porosité et la contrainte maximum en compression ($r^2 = 0,90$), d'une part, et le module de Young ($r^2 = 0,93$), d'autre part.

Comme pour l'essai de traction, ces résultats s'expliquent par la diminution de l'adhésion interfaciale entre les particules de bois et la matrice de PSE due à la présence résiduelle de solvant dans le composite. Cette présence résiduelle de solvant est plus marquée dans les éprouvettes de compression, plus massives et de section plus importante que les éprouvettes de traction. De ce fait, comme cela apparaît dans le tableau V, l'impact de la granulométrie sur la diminution des propriétés est plus marqué en compression qu'en traction.

Dans l'ensemble, aussi bien en traction qu'en compression, on observe que la porosité à l'intérieur du CBPo influence négativement les propriétés. L'effet négatif de la porosité sur les propriétés mécaniques du composite est mentionné dans la littérature (Madsen *et al.*, 2007 ; Pihlatie *et al.*, 2009 ; Le Duigou, 2016 ; Almu-sawi, 2017). Cependant, dans le cas du CBPo, il reste difficile de dissocier l'effet négatif de la porosité de celui de la présence résiduelle du solvant.

Par ailleurs, dans la deuxième partie du tableau V, on observe que le module d'élasticité du CBPo en traction (582 à 1 057 MPa) est plus élevé que celui en compression (270 à 470 MPa) tandis que la contrainte maximum en traction (2 à 3 MPa) est plus faible que celle en compression (6 à 9 MPa), toutes classes granulaires confondues. La différence de taille et de format des éprouvettes utilisées pour les deux types de sollicitations peut expliquer ces tendances. Les éprouvettes de compression sont plus massives, de sections moins étroites que celles de traction. La présence (résiduelle)

du solvant serait moins importante dans les éprouvettes de traction que dans celles de compression. La matrice doit être alors davantage solidifiée dans les éprouvettes de traction que dans celles de compression, et conférer ainsi une rigidité plus importante aux éprouvettes de traction. D'autre part, l'effet négatif de la porosité (concentration de contraintes) serait plus marqué sur les éprouvettes de traction que sur celles de compression ; la contrainte maximum sera donc corrélativement plus faible sur les éprouvettes de traction que sur celles de compression.

Par ailleurs, les valeurs des propriétés du CBPo, aussi bien en traction qu'en compression, sont faibles par rapport à celles du « PSE commercial » présenté par Harper (1999) (tableau V) ; ce dernier est un homologue du PSE (PSE massif obtenu après dissolution) utilisé comme constituant dans le CBPo. On associe cette diminution des propriétés du CBPo à sa porosité, à l'adhésion insuffisante à l'interface bois-plastique, mais également à la diminution des propriétés mécaniques de la matrice issue du processus de dissolution lors du recyclage. La présence, même résiduelle, de solvant dans la matrice (colle de PSE) a un effet défavorable sur ses propriétés mécaniques. Le PSE recyclé à partir d'huiles alimen-

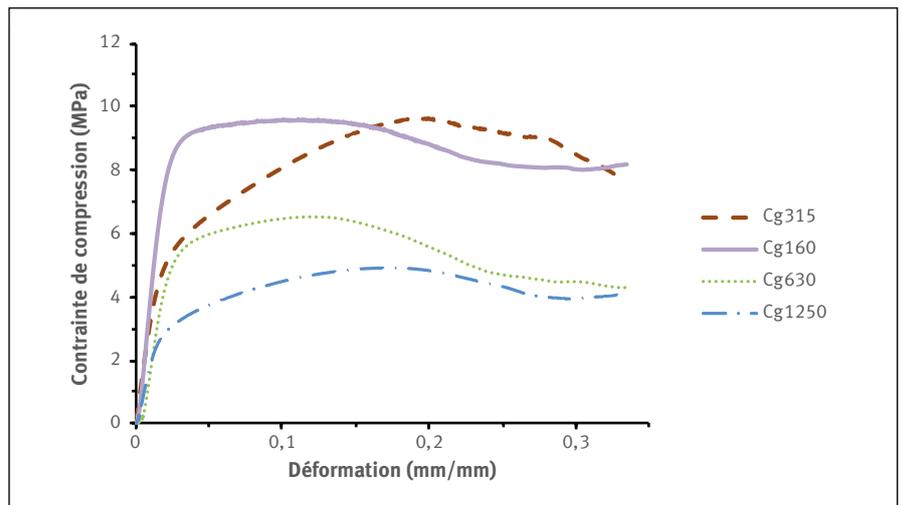


Figure 10.
 Courbes-typiques contrainte-déformation des échantillons en compression.
 Typical stress-strain curves of compression samples.

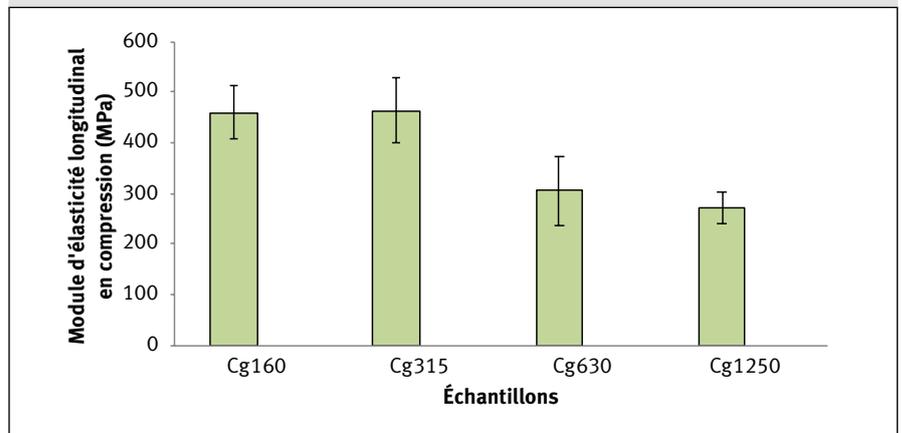


Figure 11.
 Comparaison des modules d'élasticité des échantillons en compression.
 Comparison of the moduli of elasticity of the samples in compression.

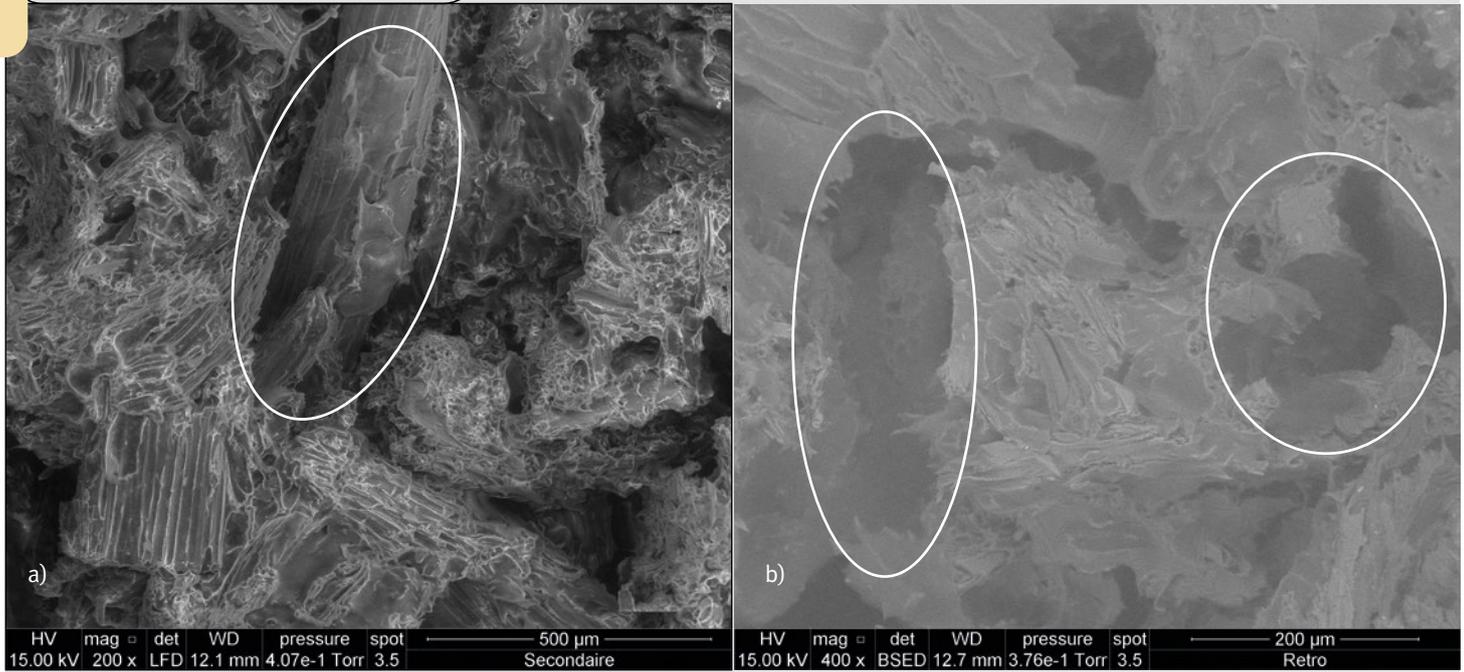


Figure 12.

Faciès de rupture d'éprouvette de traction (Cg1250) : a) montrant une particule ancrée dans la matrice plastique, non rompue et portant quelques fragments de matrice adhérant par endroits, sur la partie non ancrée (partie entourée en blanc) ; b) montrant des espaces vides ou zones d'arrachement de particules de bois (parties entourées en blanc).

Fracture facies of tensile specimen (Cg1250): a) showing a particle anchored in the plastic matrix, unbroken and bearing some sticky matrix fragments in places, on the unanchored part (part circled in white); b) showing voids or pull-out areas of wood particles (parts circled in white)

taires usagées utilisées comme solvant (Sarmiento *et al.*, 2016) a été donné en exemple, dans la deuxième partie du tableau V. La contrainte maximum de ce PSE recyclé a diminué de plus de moitié en traction et de plus de trois quarts en compression par rapport à la même propriété pour le PSE commercial présenté par Harper (1999).

Caractérisation macroscopique et microscopique du composite

Caractérisation macroscopique puis microscopique par méthode optique

La photo 2 représente une vue macroscopique des échantillons étudiés. On observe une distribution régulière des particules de bois dans la matrice, expression d'une bonne homogénéité du composite. Cette homogénéité explique la faible dispersion des densités apparentes mentionnée précédemment. La texture et l'aspect du matériau sont très variables selon la granulométrie retenue.



Photo 2.

Vue macroscopique des échantillons : de gauche à droite Cg160, Cg315, Cg630, Cg1250.
Macroscopic view of the samples: from left to right, Cg160, Cg315, Cg630, Cg1250.

Caractérisation au MEB

L'observation au MEB du faciès de rupture en traction d'un échantillon Cg1250 (figure 12a, partie entourée) montre une particule ancrée dans la matrice plastique, non rompue et portant encore sur les surfaces non ancrées quelques fragments de matrice adhérant par endroits. L'adhésion à l'interface bois-plastique est donc hétérogène. La figure 12b, obtenue également au MEB, révèle des espaces vides associés à un mouvement des particules de bois. Ce type de rupture est lié à la faible adhésion des particules à la matrice de colle (interface colle-bois fragile). Il permet d'expliquer la diminution des caractéristiques mécaniques observée pour la classe granulaire Cg1250. Sur la figure 13, on observe un fragment de particule de bois (issu de la rupture de cette particule) adhérant à la matrice dans un faciès de rupture d'échantillons Cg315. Cette observation indique une bonne adhésion interfaciale. Les deux types d'observations révèlent que la qualité de l'adhésion entre les particules de bois et la colle est variable et dépend de la granulométrie, d'où les plus faibles caractéristiques mécaniques

des composites à granulométrie élevée.



Photo 3.
 Exemples de mise en oeuvre de CBPo : panneaux à base de sciure de différentes essences de bois.
Examples of CBPo implementation: sawdust-based panels of different wood species.

Comparaison des propriétés du composite bois-plastique à celles d'autres matériaux similaires

La deuxième partie du tableau V présente, pour comparaison, les principales propriétés physiques et mécaniques de matériaux homologues au composite CBPo étudié. La masse volumique mesurée du CBPo varie de 686 à 826 kg/m³, soit des valeurs très proches de celles du composite fabriqué à base de fibres de palmier-dattier et de polystyrène étudié par Masri *et al.* (2018) mais un peu plus élevées que celles du bois de *Gmelina arborea* (Gérard *et al.*, 2016) dont le CBPo pourrait venir en substitution pour des usages en structure. *G. arborea* est une essence qui a été largement plantée au Bénin par l'ONAB et dont des peuplements arrivés à maturité sont exploités pour la production de bois d'œuvre pour de multiples usages, mais qui doit cependant être préservée d'une surexploitation. Le CBPo présente une contrainte maximum en traction de 2 à 3 MPa, soit des valeurs un peu plus élevées que celles du bois de *G. arborea* en traction transversale. Le module d'élasticité

en traction du CBPo varie de 582 à 1057 MPa selon la granulométrie, soit des valeurs du même ordre de grandeur que celles des composites à base de polystyrène et de fibres de sisal élaborés et étudiés par Manikandan Nair *et al.* (1996). La résistance en compression du CBPo varie globalement de 6 à 9 MPa ; elle est donc beaucoup plus faible que la résistance moyenne en compression longitudinale du bois de *G. arborea* (32 MPa) ou de teck (56 MPa) (Gérard *et al.*, 2016). Les contraintes maximums et les modules d'élasticité du CBPo sont globalement plus élevés que ceux du composite obtenu par Masri *et al.* (2018). Au regard des propriétés du CBPo, l'utilisation de ce matériau pourrait donc être envisagée pour des applications non structurales telles que des revêtements extérieurs verticaux.

Conclusion

Le composite bois-plastique étudié présente des propriétés physiques qui laissent augurer des perspectives intéressantes de valorisation et d'utilisation pour des emplois où une bonne stabilité du matériau est exigée. Il présente, en effet, un faible taux d'absorption (moins de 15 % en 24 h) et un très faible taux de gonflement en épaisseur. Du fait de sa bonne stabilité à l'humidité du composite, son utilisation pourrait être envisagée pour des applications en contact intermittent, voire prolongé, avec des sources d'humidité, sous réserve de propriétés mécaniques appropriées pour les usages qui en seraient faits. Cependant, une étude du comportement mécanique en milieu humide et après vieillissement est indispensable avant de développer ce type d'application. De même, des essais de durabilité naturelle vis-à-vis d'agents biologiques de détérioration (champignons lignivores, insectes dont les termites), essais qui sont en cours, permettront de valider ces potentialités d'utilisation.

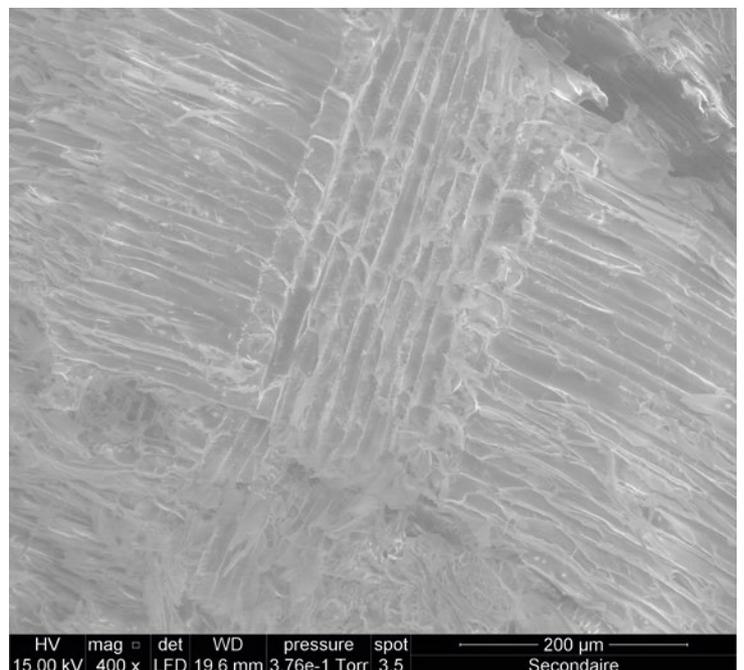


Figure 13.

Facès de rupture d'une éprouvette de traction (Cg315), montrant un fragment de particule encore solidaire de la matrice plastique après rupture.

Fracture facies of a tensile specimen (Cg315), showing a particle fragment still attached to the plastic matrix after failure.

La porosité du composite dépend de la taille des particules de bois et influence ses propriétés physiques. Les taux de porosité sont élevés (entre 34 et 43 %), d'où des faibles caractéristiques en compression. Outre le fait d'augmenter la pression de compactage qui a permis de réduire la porosité d'environ 10 % et d'améliorer les propriétés mécaniques, l'utilisation de la technique de thermoformage sera à expérimenter pour diminuer ce taux de porosité. Une meilleure appréciation de l'influence de la porosité sur les propriétés mécaniques pourrait nécessiter la prise en compte des propriétés spécifiques, bien que cette influence puisse être biaisée par la présence résiduelle de solvant. De même, une étude de la porosité au MEB sera aussi à envisager.

Les propriétés du composite sont d'autant plus élevées que les particules sont de petite taille, un seuil étant mis en évidence entre la granulométrie 315 et 630. La finesse des particules confère au matériau une meilleure homogénéité et rend son comportement d'autant plus isotrope. Des essais complémentaires seront cependant à conduire pour étudier le processus de migration interne de l'essence dans la sciure, son effet sur le gonflement, ainsi qu'une analyse du processus de désorption de l'essence sur particules seules pour mieux comprendre les mécanismes associés lors de l'élaboration des composites.

Le niveau de propriétés mécaniques obtenu limite l'utilisation du composite à des emplois où les éléments mis en œuvre sont faiblement chargés. L'amélioration du comportement technologique du CBPo et de ses propriétés nécessitera d'étudier plus spécifiquement ses paramètres de fabrication pour les optimiser ou la possibilité d'adjoindre au matériau des agents coupleurs. L'utilisation du CBPo dans des ouvrages de démonstration en grandeur réelle d'utilisation et en substitution de bois massifs est en cours d'étude, avec en particulier le suivi de leur vieillissement dans le temps (photo 3).

Remerciements

Ce travail a bénéficié de l'appui technique et financier du Cirad à travers son programme d'Action incitative « Soutien aux doctorants ».

Références bibliographiques

Abdel Mohsen R. A. A., 2014. Investigation of Reinforced Polystyrene Foam Waste with Natural or Synthetic Fibers. Master of Science in Environmental Engineering, The American University in Cairo, School of Sciences and Engineering, Egypt, 85 p. <http://dar.aucegypt.edu/bitstream/handle/10526/3803/thesis%208.pdf?sequence=1>

Agoua E., Allognon-Houessou E., Adjovi E., Togbedji B., 2013. Thermal conductivity of composites made of wastes of wood and expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 41: 557-562. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.016>

Almusawi A. M., 2017. Mise en œuvre et optimisation des propriétés d'une structure sandwich en matériaux biosourcés (fibres et bois de chanvre) avec une matrice en polystyrène expansé pour le bâtiment. Thèse de doctorat, spécialité Matériaux, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, France, 198 p. https://www.researchgate.net/publication/327541397_Mise_en_oeuvre_et_optimisation_des_proprietes_d%27une_structure_sandwich_en_materiaux_biosources_fibres_et_bois_de_chanvre_avec_une_matrice_en_polystyrene_expansé_pour_le_batiment

ASTM, 2012. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. Norme ASTM D1037-12, 32 p.

Atindogbé G., Fonton N. H., Lejeune P., 2013. Évaluation de la ressource en teck, *Tectona grandis* L.f., des plantations privées du Sud-Bénin. *Bois et Forêts des Tropiques*, 316 (2) : 93-103. <https://doi.org/10.19182/bft2013.316.a20533>

Binhussain M. A., El-Tonsy M. M., 2013. Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures. *Construction and Building Materials* 47: 1431-1435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.031>

Borsoi C., Berwig K. H., Scienza L. C., Zoppas B. C. D. A., Brandalise R. N., Zattera A. J., 2013. Behavior in simulated soil of recycled expanded polystyrene/waste cotton composites. *Materials Research*, 17 (1): 275-283. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000167>

Chanhoun M., Padonou S., Adjovi E. C., Olodo E., Doko V., 2018. Study of the implementation of waste wood, plastics and polystyrenes for various applications in the building industry. *Construction and Building Materials*, 167: 936-941. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.080>

Chindaprasirt P., Hiziroglu S., Waisurasingha C., Kasemsiri P., 2015. Properties of wood flour/expanded polystyrene waste composites modified with diammonium phosphate flame retardant. *Polymer Composites*, 36 (4): 604-612. <https://doi.org/10.1002/pc.22977>

Claire D., Hild F., Roux S., 2003. De la corrélation d'images numériques à l'identification de champs de propriétés. *Bulletin de la Société Française de Physique*, 139 : 29-31. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00002926>

Flores-Hernández M., Gonzáles I. R., Lomeli-Ramirez M., Fuentes-Talavera F., Silva-Guzmán J., Cerpa-Gallegos M., et al., 2013. Physical and mechanical properties of wood plastic composites polystyrene-white oak wood flour. *Journal of Composite Materials*, 48 (2): 209-217. <https://doi.org/10.1177/0021998312470149>

Gérard J. (coord.), Guibal D., Paradis S., Cerre J.-C., et al., 2016. Atlas des bois tropicaux. Caractéristiques technologiques et utilisations. Versailles, France, Éditions Quæ, coll. Guide pratique, 1 000 p. <http://www.quae.com/fr/r4976-atlas-des-bois-tropicaux.html>

Harper C. A. (ed.), 1999. *Modern Plastics Handbook*. Technology Seminars, Inc., Lutherville, Maryland, USA, Mc Graw-Hill, 1231 p. <https://mmsallaboutmetallurgy.com/wp-content/uploads/2019/08/Modern-Plastics-Handbook.pdf>

Hwang G.-C., Kim B. K., Bae S. Y., Yi S. C., Kumazawa H., 1999. Degradation of polystyrene in supercritical acetone. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 5 (2): 150-154. <https://www.cheric.org/PDF/JIEC/IE05/IE05-2-0150.pdf>

Kuo P.-Y., Wang S.-Y., Chen J.-H., Hsueh H.-C., Tsa M.-J., 2009. Effects of material compositions on the mechanical properties of wood-plastic composites manufactured by injection molding. *Materials & Design*, 30 (9): 3489-3496. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.012>

Lahmar M. A., 2016. Caractérisation d'un composite bois-polymère pour utilisation en plaques de bardage par l'extérieur. Thèse de doctorat, spécialité Génie civil, Université Claude Bernard Lyon 1, France, 175 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01587799/file/TH2016LAHMARMOHAMEDALI.pdf>

Madsen B., Hoffmeyer P., Thomsen A. B., Lilholt H., 2007. Hemp yarn reinforced composites – I. Yarn characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 (10): 2194-2203. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.06.001>

Maldas D., Kokta B. V., Raj R. G., Daneault C., 1988. Improvement of the mechanical properties of sawdust wood fibre-polystyrene composites by chemical treatment. *Polymer*, 29(7): 1255-1265. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(88\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0032-3861(88)90053-5)

Manikandan Nair K. C., Diwan S. M., Thomas S., 1996. Tensile properties of short sisal fiber reinforced polystyrene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 60 (9): 1483-1497. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960531\)60:9<1483::AID-APP23>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960531)60:9<1483::AID-APP23>3.0.CO;2-1)

Masri T., Ounis H., Sedira L., Kaci A., Benchabane A., 2018. Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes. *Construction and Building Materials*, 164 (4): 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.197>

Pihlatie M., Kaiser A., Mogensen M., 2009. Mechanical Properties of NiO/Ni-YSZ Composites Depending on Temperature, Porosity and Redox Cycling. *Journal of the European Ceramic Society*, 29 (9): 1657-1664. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.10.017>

Poletto M., Zeni M., Zattera A. J., 2011. Effects of wood flour addition and coupling agent content on mechanical properties of recycled polystyrene/wood flour composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 25 (7): 821-833. <https://doi.org/10.1177/0892705711413627>

Sales C., 2003. Innovation technologique et valorisation des sous-produits des filières bois. *Bois et Forêts des Tropiques*, 277 (3) : 35-43. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20182>

Sarmiento A. M., Guzmán H. L., Morales G., Romero D. E., Pataquiva-Mateus A. Y., 2016. Expanded Polystyrene (EPS) and Waste Cooking Oil (WCO): From Urban Wastes to Potential Material of Construction. *Waste and Biomass Valorization*, 7, 1245-1254. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9511-7>

Stark N. M., Berger M. J., 1997. Effect of Particle Size

on Properties of Wood-Flour Reinforced Polypropylene Composites. *In: Proceedings of the Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, Madison, Wisconsin, USA, Forest Products Society, Madison, WI, Proceedings No. 7277, 134-143. <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1997/stark97d.pdf>

Taghiyari H. R., Ghamsari F. A., Salimifard E., 2018. Effects of adding nano-wollastonite, date palm prunings and two types of resins on the physical and mechanical properties of medium-density fibreboard (MDF) made from wood fibres. *Bois et Forêts des Tropiques*, 335 : 49-57. <http://dx.doi.org/10.19182/bft2018.335.a31517>

UEMOA, 2013. Étude sur la gestion des déchets plastiques dans l'espace UEMOA. Rapport final. Politique commune d'amélioration de l'environnement, 253 p. <http://etudes.uemoa.int/upload/etude%20sur%20la%20gestion%20des%20dechets%20plastiques%20dans%20l%27espace%20uemoa.pdf>

Vu T. L., Barés J., Mora S., Nezamabadi S., 2019. Numerical simulations of the compaction of assemblies of rubberlike particles: A quantitative comparison with experiments. *Physical Review E* 99, 062903. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.99.062903>

Amadji *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	E. C. Adjovi
Gestion des données	T. A. Amadji, J. Barés
Analyse formelle	J. Barés, T. A. Amadji
Acquisition du financement	J. Gérard
Enquête et investigation	T. A. Amadji
Méthodologie	V. Huon, J. Barés
Gestion de projet	J. Gérard
Ressources	J. Gérard, V. Huon, J. Barés, T. A. Amadji
Logiciels	J. Barés, V. Huon
Supervision	J. Gérard, E. C. Adjovi
Validation	E. C. Adjovi, T. A. Amadji
Visualisation	T. Armel Amadji
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	J. Gérard, T. A. Amadji
Écriture – Révision et édition	J. Gérard, T. A. Amadji

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier Cedex 5, France - Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X