

Caractérisation de fibres extraites de nervures de feuilles de bananier en vue du développement d'un composite bio-sourcé à matrice tanin.

Characterization of fibers extracted from banana leaf veins towards a bio-sourced composite with a tannin matrix

Maurane Gaëlle Fokam Fokam^{1,2}, Christian Bopda Fokam¹, Anatole Mbouyap Chengoué¹, Valentin Rougier², Bienvenu Kenmeugue¹ et Véronique Michaud^{2*}

¹Civil and Mechanical Engineering Laboratory,
National Advanced School of Engineering,
University of Yaounde I, Yaounde, Cameroon

² Laboratory for Processing of Advanced Composites (LPAC),
Institute of Materials (IMX), Faculty of Engineering (STI),
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
1015 Lausanne, Switzerland
*veronique.michaud@epfl.ch

Résumé

Les bananiers constituent une source abondante de déchets agricoles qui peuvent être exploités pour extraire des fibres. Alors que le tronc et le pseudo-tronc sont actuellement exploités, les nervures des feuilles pourraient constituer une source précieuse de fibres à utiliser dans des matériaux composites structuraux. Ainsi, des nervures de feuilles de la variété Grande Naine de *musa acuminata* ont été collectées au Cameroun dans deux plantations. Les fibres ont été extraites en utilisant le rouissage à l'eau, l'ébullition à l'eau et la soude caustique pour évaluer le rôle de l'extraction sur les propriétés. Les densité, apparence, composition chimique, et dégradation thermique sont proches de celles des autres fibres de banane, avec une longueur moyenne de fibre supérieure à 2m, et un diamètre entre 125-150 μ m. L'ébullition et la soude conduisent à une rigidité d'environ 15 GPa, et 350-400 MPa de résistance à la traction. Une analyse statistique de Weibull a révélé une légère influence du lieu de culture, et une grande influence de la méthode d'extraction, la méthode d'ébullition montrant un bon compromis entre propriétés et facilité d'extraction.

Abstract

Banana trees are an abundant source of agricultural waste that can be exploited to extract fiber. While the trunk and pseudo-trunk are currently exploited, the leaf veins could be a valuable source of fiber for use in structural composite materials. Leaf veins of the Grande Naine variety of *musa acuminata* were collected in Cameroon from two plantations. The fibers were extracted using water retting, water boiling and caustic soda to assess the role of extraction on properties. The density, appearance, chemical composition, and thermal degradation were close to those of other banana fibers, with an average length over 2 meters, and 125-150 μ m range diameters. Water boiling and soda treatment led to a Young's modulus in the 15 GPa range and 350-400 MPa failure strength. A Weibull statistical analysis of the fiber failure revealed a slight influence of the growth location, and a major influence of the fiber extraction method, with the water boiling method showing a good balance between properties and ease of extraction.

Mots Clés : Fibre naturelle, méthode d'extraction, tanin, bio-composite, propriétés mécaniques
Keywords: Natural fiber, extraction methods, tannin, bio composite, mechanical properties

1. Introduction

Ces dernières années, les fibres naturelles extraites du jute, du sisal, de l'ananas, du lin, du chanvre ou de la banane ont gagné en intérêt pour des applications de renforcement dans la fabrication de pièces composites [1-2]. Les fibres naturelles présentent de nombreux avantages, notamment leur extraction à partir d'une ressource renouvelable ou, mieux encore, à partir de flux de déchets agricoles, ce qui permet de produire ces fibres de manière économe en énergie et de réduire l'impact sur l'environnement, par rapport aux fibres synthétiques telles que le verre, l'aramide ou le carbone. Elles présentent d'autres caractéristiques intéressantes telles que la biodégradabilité, des propriétés mécaniques spécifiques proches de celles des fibres synthétiques, un bon rapport coût-efficacité et une faible densité [3-6]. Néanmoins, elles présentent également des inconvénients, dont l'un des plus importants pour les composites est leur grande sensibilité à l'humidité [7-9], et parfois la longueur limitée de ces fibres, qui rend la production de textiles plus difficile. En outre, leurs propriétés peuvent être très différentes selon le type de plante, la nature de la méthode d'extraction et, même pour les mêmes plantes, selon le climat et le type de culture, en fonction des années, de sorte qu'une grande variabilité des propriétés est la norme [10-11].

Il peut également être intéressant de tirer parti des déchets agricoles : le bananier Cavendish (*Musa Acuminata*) est une source prometteuse de fibres longues, extraites de plusieurs parties de la plante. Plutôt légères, flexibles et faciles à tisser, ces fibres pourraient être compétitives sur le marché et présentent donc un bon potentiel de développement [12-14]. Une fois les bananes récoltées, les feuilles et les tiges sont généralement ramassées et brûlées, ce qui génère de la pollution et gaspille des ressources potentielles [13]. Par conséquent, afin de préserver l'environnement et d'ajouter de la valeur à l'activité agricole, plusieurs chercheurs ont exploré des méthodes d'extraction des fibres de bananiers, en particulier dans les pays qui sont de grands producteurs de bananes pour la production alimentaire, tels que l'Inde, le Brésil, le Cameroun et le Nigéria [14-23]. La plupart des études se sont concentrées sur les propriétés chimiques et mécaniques des fibres de banane extraites du tronc et du pseudo-tronc [11, 24-28]. Très peu d'études ont été menées sur les fibres extraites de la nervure principale de la feuille, bien que celles-ci aient une longueur intéressante (plus d'un mètre de long) et ne soient pas encore valorisées par ailleurs [29].

Récemment, des matériaux composites utilisant des fibres naturelles ont été développés, souvent incluant une matrice aussi bio-sourcée [30–38]. Dans le souci de rendre les composites entièrement biosourcés, des recherches ont été menées pour remplacer les durcisseurs synthétiques par des bio durcisseurs dans des résines tanniques. Un durcisseur totalement bio dérivé d'un extrait d'exsudat d'arbres africains *Vachellia nilotica* et Sénégal Sénégal a été proposé [39]. Les propriétés mécaniques d'un composite totalement biosourcé utilisant des fibres orientées ou un mat avec des directions aléatoires dans le plan sont donc intéressantes à explorer. Les objectifs de la recherche menée dans ce projet sont donc les suivants :

- (i) évaluer les propriétés des fibres de nervures de feuilles de bananier par rapport aux fibres de bananier provenant du tronc et du pseudo-tronc ainsi que d'autres fibres naturelles utilisées dans les renforts structurels,
- (ii) évaluer les avantages de l'utilisation d'une méthode simple pour extraire ces fibres, afin que cela puisse être fait près du site de production, sans utilisation de produits chimiques autres que l'eau, par rapport aux méthodes de référence d'extraction à la soude caustique. Pour cela, on a évalué trois méthodes d'extraction : rouissage à l'eau (R), extraction dans l'eau bouillante (C) et extraction à la soude (S).
- (iii) évaluer l'influence de l'emplacement des cultures et de l'utilisation de pesticides sur les propriétés des fibres, afin de déterminer si les ensembles de données relatives aux propriétés des fibres peuvent être moyennés et leur écart-type évalué pour les combiner dans un matériau composite à un stade

ultérieur. Pour cela, on a évalué deux sources de fibres : une plantation industrielle dans le Penja (nommée P) et une plantation paysanne près de Yaoundé (nommée Y).

(iv) à plus long terme, étudier les performances des composites 100% biosourcé basés sur des fibres de nervures de banane unidirectionnelles ou mats et une résine bio tanin. Pour cela on a extrait des tannins de plusieurs espèces indigènes au Cameroun, et fabriqué des composites par compression à chaud, qui ne sont pas présentés dans cet article par souci de concision.

2. Résultats

2.1 Extraction des fibres.

Le Tableau 1 présente les méthodes d'extractions et les rendements obtenus, en % massique de fibre extraite par rapport à la masse de nervure initiale. L'extraction par cuisson dans l'eau bouillante, illustrée Figure 1, donne un bon rendement et des fibres qui se manipulent aisément. Peu de différences sont observées selon les sites de production.

Tab. 1. Résumé de toutes les méthodes d'extraction

Processus d'extraction		Solution par trempage	Temps de trempage (heures)	Température	Texture apparente de la fibre	Rendement de fibre obtenue (%)
Rouissage à eau froide.	FPR	Eau	720	37°C	Lisse, Tendre	65.6 ± 0.3
	FYR				Couleur blanchâtre	68.0 ± 0.5
Cuisson.	FPC	Eau	5	100°C	Lisse, Tendre	78.6 ± 0.2
	FYC				Couleur blanchâtre	81.9 ± 0.1
Solution de 8% de NaOH.	FPS	NaOH (aq)	96	Température ambiante 25°C	Lisse, dure,	76.2 ± 0.2
	FYS				Couleur foncée	77.8 ± 0.1



Fig. 1. Nervures de bananier/cuisson à l'eau/fibres extraites lors du séchage/coupe MEB d'une fibre FYC

2.2 Longueur et diamètre moyens des fibres

600 fibres de nervures de feuilles de bananier ont été prélevées par type d'échantillon avant traitement et leur longueur L a été mesurée. La distribution de la longueur a suivi une distribution cumulative de Weibull, donnée dans l'Eq. (1) :

$$F(L, \alpha, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{L}{\beta}\right)^\alpha} \quad (\text{Eq. 1})$$

avec F la probabilité cumulée de trouver une fibre de longueur L , α et β sont les paramètres d'ajustement représentant le module de Weibull et la longueur caractéristique, respectivement. Comme le montre la figure 2, la distribution est assez large avec une longueur moyenne de $2,08 \pm 0,08$ mètres pour les fibres Y et de $2,27 \pm 0,09$ mètres pour les fibres P. La figure 2 présente les diamètres moyens avec leur écart-type mesurés par MEB et par microscopie optique pour tous les types de fibres. On constate que le rouissage conduit à des diamètres de fibres légèrement plus élevés, tandis que la soude caustique, comme on s'y attendait, conduit à des diamètres plus faibles.

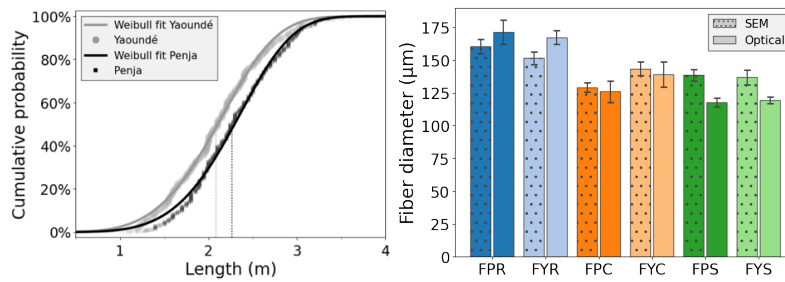


Fig. 2. gauche: Distribution cumulative des longueurs des fibres Y et P; droite: Diamètre moyen des fibres pour chaque lieu et méthode d'extraction, avec l'écart-type.

2.3 Densité apparente, densité des fibres et teneur en eau

La figure 3 a) et b) montre respectivement la densité apparente des fibres, ainsi que la densité des parois des fibres extraites par rouissage à l'eau, ébullition et soude caustique à Penja et Yaoundé. Le traitement chimique à la soude caustique donne des fibres avec la densité apparente la plus élevée, ce qui est attendu si l'on considère que le lumen de ces fibres est fermé. Lorsque la porosité du lumen est prise en compte, les densités des fibres sont très proches les unes des autres et en accord avec celles rapportées dans la littérature [26-29]. La porosité a été mesurée à partir des analyses de sections transversales à $47,55 \pm 0,32 \%$ pour FPC, $46,07 \pm 0,43 \%$ pour FYC, $52,16 \pm 0,55 \%$ pour FPR et $51,96 \pm 0,55 \%$ pour FYR, et 0 pour FPS et PYS. La figure 3 c) montre la teneur en eau résiduelle des fibres extraites par rouissage à l'eau, ébullition et soude caustique à Penja et Yaoundé. On observe que les fibres extraites par rouissage à l'eau retiennent moins d'eau que celles extraites par les autres méthodes. Ces valeurs sont en accord avec la littérature [40-42].

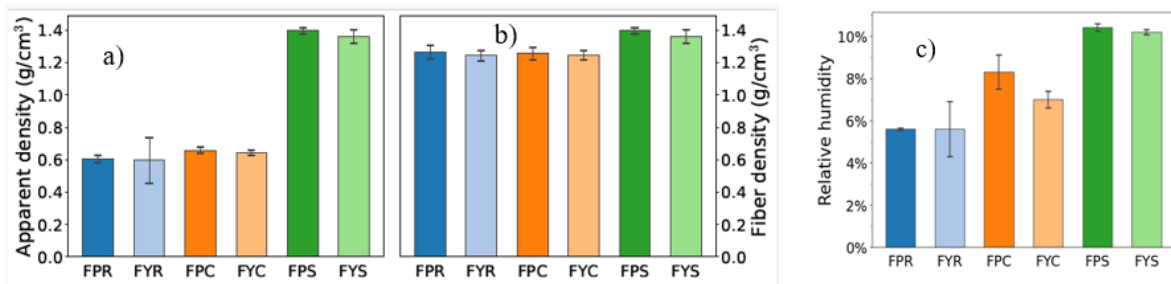


Fig. 3.a) Densité apparente ρ_{app} b) Densité des fibres ρ_f en tenant compte de la présence de lumen c) Taux d'humidité H des fibres de nervures de feuilles de bananier pour tous les types de fibres.

2.4 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques ont été caractérisées en traction, en effectuant une statistique de Weibull pour trouver la distribution statistique des contraintes à rupture.

Tab.2 Caractéristiques de Weibull pour les différents types de fibres

Fibre	FPR	FYR	FPC	FYC	FPS	FYS
m [-]	2.58	3.09	2.99	3.36	4	3.37
σ_0 [MPa]	259	242	368	332	468	418
σ_0 corrigé avec la section des fibres sans le lumen [MPa]	541	503	701	615	468	418

Dans l'ensemble, on observe que le rouissage conduit à de moins bonnes propriétés, la cuisson et la soude donnant des propriétés acceptables, avec des modules d'Young d'environ 16-17 GPa, et les contraintes données ci-dessous, ce qui place ces fibres dans une catégorie intermédiaire moins

performante que les fibres naturelles techniques comme le lin ou chanvre, mais meilleures que les fibres de palmier, laine ou coton. On remarque aussi que les lieux de productions donnent des différences significatives, mais suffisamment faibles pour que l'on puisse combiner les fibres lors de la production de textiles.

3. Conclusions

Les fibres extraites donnent des propriétés qui sont comparables avec celles de la littérature pour les fibres de banane extraites du tronc et pseudo-tronc. On remarque que la méthode d'extraction par cuisson à l'eau bouillante est simple, peu coûteuse peut être effectuée sur site, et donne des résultats prometteurs. Des composites à matrice tannin/exudat ont été produits avec ces fibres par compression dans un moule poreux permettant l'extraction de l'eau, et leur propriétés mécaniques en flexion 3 points seront présentées.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme « 100 PhDs for Africa » dans le cadre de l'initiative UM6P-EPFL Excellence in Africa. Nous remercions R. Charvet, N. Halawani du LPAC, Pr. M. A. Cheumani Yona et H. L. Assonfack du Laboratoire de l'Unité de Chimie Macromoléculaire Appliquée à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé 1. Nous remercions également la "European Society for Composite Materials" (ESCM) pour son soutien pour l'inscription à la conférence JNC.

Références

- [1] Z. S. Ng, L. C. Simon, and A. Elkamel, "Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 96, no. 1, pp. 85–90, Apr. 2009, doi: 10.1007/s10973-008-9855-8.
- [2] A. Gholampour et T. Ozbakkaloglu, « A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications », *J Mater Sci*, vol. 55, no 3, p. 829-892, janv. 2020.
- [3] Y. Li, Y.-W. Mai, and L. Ye, "Sisal fibre and its composites: a review of recent developments," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 11, pp. 2037–2055, Aug. 2000, doi: 10.1016/S0266-3538(00)00101-9.
- [4] S. Kumar, V. Choudhary, and R. Kumar, "Study on the compatibility of unbleached and bleached bamboo-fiber with LLDPE matrix," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 102, no. 2, pp. 751–761, May 2010.
- [5] A. M. M. Edeerozey, H. M. Akil, A. B. Azhar, and M. I. Z. Ariffin, "Chemical modification of kenaf fibers," *Mater. Lett.*, vol. 61, no. 10, pp. 2023–2025, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.matlet.2006.08.006.
- [6] Y. Chen, X. Huang, T. Sun, and J. Chu, "Experimental study of plant fiber-polymer composite for indirect evaporative cooler application," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 199, p. 117543, 2021.
- [7] A. V. Kiruthika and K. Veluraja, "Physical Properties of Plant Fibers (Sisal, Coir) and Its Composite Material with Tamarind Seed Gum as Low-Cost Housing Material," *J. Nat. Fibers*, vol. 14, no. 6, pp. 801–813, Nov. 2017.
- [8] R. Selzer and K. Friedrich, "Influence of water up-take on interlaminar fracture properties of carbon fibre-reinforced polymer composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 334–338, Jan. 1995.
- [9] A. K. Rana, A. Mandal, B. C. Mitra, R. Jacobson, R. Rowell, and A. N. Banerjee, "Short jute fiber-reinforced polypropylene composites: Effect of compatibilizer," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 69, no. 2, pp. 329–338, 1998.
- [10] K. L. Pickering, M. A. Efendy, and T. M. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 83, pp. 98–112, 2016.
- [11] A. Chengoue Mbouyap, T. Tchotang, C. Fokam Bopda, H. L. Assonfack, J. B. Saha Tchinda, and M. A. Cheumani Yona, "Impact of Cultivation Area on the Physical, Chemical, and Mechanical Properties of Banana Pseudo-Stems Fibers in Cameroon," *J. Nat. Fibers*, vol. 20, no. 2, p. 2198274, Aug. 2023, doi: 10.1080/15440478.2023.2198274.
- [12] M. Sakthivel and S. Ramesh, "Mechanical Properties of Natural Fibre (Banana, Coir, Sisal) Polymer Composites," *Sci. PARK*, vol. 1, no. 1, 013, ISSN: 2321 – 8045.
- [13] Waraczewski, R. & Sołowiej, B. G. Potential Valorization of Banana Production Waste in Developing Countries: Bio-Engineering Aspects. *Fibers* **12**, 72 (2024).
- [14] Venkateshwaran, N. & Elayaperumal, A. Banana fiber reinforced polymer composites - A review. *J. Reinf. Plast. Compos.* **29**, 2387–2396 (2010).
- [15] S. Alzate Acevedo, Á. J. Díaz Carrillo, E. Flórez-López, and C. D. Grande-Tovar, "Recovery of Banana Waste-Loss from Production and Processing: A Contribution to a Circular Economy," *Molecules*, vol. 26, no. 17, Art. no. 17, Jan. 2021, doi: 10.3390/molecules26175282.
- [16] Rao, K. M. M. & Rao, K. M. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Compos. Struct.* **77**, 288–295 (2007).

- [17] Fonseca-Pinheiro, L. et al. Banana Pseudostem Fibers (*Musa sp.*—cultivar AAB Prata): Physicochemical Characteristics. *Mater. Circ. Econ.* 4, (2022).
- [18] Caren, K. J., Kenneth, N. D. & David, M. M. Strength Properties of Surface-Modified Giant Cavendish (*Musa acuminata*) Banana Fibers. *J. Nat. Fibers* 19, 12746–12759 (2022).
- [19] Brindha, R., Narayana, C. K., Vijayalakshmi, V. & Nachane, R. P. Effect of different retting processes on yield and quality of banana pseudostem fiber. *J. Nat. Fibers* 16, 58–67 (2019).
- [20] Soraisham, L. D., Gogoi, N., Mishra, L. & Basu, G. Extraction and Evaluation of Properties of Indian Banana Fibre (*Musa Domestica* Var. Balbisiana, BB Group) and Its Processing with Ramie. *J. Nat. Fibers* 19, 5839–5850 (2022).
- [21] Jagadeesh, D., Venkatachalam, R. & Nallakumarasamy, G. Characterisation of Banana Fiber - A Review. *J. Environ. Nanotechnol.* 4, 23–26 (2015).
- [22] Imoisili, P. E., Fadare, O. B., Popoola, A. V & Okoronkwo, A. E. Effect of Chemical Treatment on the Morphology and Mechanical Properties of Plantain (*Musa paradisiaca*) Fiber. *IOSR J. Appl. Chem.* 10, 70–73 (2017).
- [23] Mumthas, A. C. S. I., Wickramasinghe, G. L. D. & Gunasekera, U. S. W. Effect of physical, chemical and biological extraction methods on the physical behaviour of banana pseudo-stem fibres: Based on fibres extracted from five common Sri Lankan cultivars. *J. Eng. Fiber. Fabr.* 14, (2019).
- [24] A. M. Chengoué, T. Tchotang, C. B. Fokam, and B. Kenmeugne, “Influence of extractions techniques on the physico-mechanical properties of banana pseudo-stem fibers,” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 11, no. 7, pp. 1121–1128, 2020.
- [25] R. R. R. Cecci, A. A. Passos, T. C. De Aguiar Neto, and L. A. Silva, “Banana pseudostem fibers characterization and comparison with reported data on jute and sisal fibers,” *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 1, p. 20, Jan. 2020.
- [26] Motaleb, K.Z.M.A., Mizan, R.A. & Milašius, R. Development and characterization of eco-sustainable banana fiber nonwoven material: surface treatment, water absorbency and mechanical properties. *Cellulose* 27, 7889–7900
- [27] T. Sango et al., “Step-wise multi-scale deconstruction of banana pseudo-stem (*Musa acuminata*) biomass and morpho-mechanical characterization of extracted long fibres for sustainable applications,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 122, pp. 657–668, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.06.050.
- [28] P. Manimaran, M. R. Sanjay, P. Senthamarai Kannan, M. Jawaid, S. S. Saravanakumar, and R. George, “Synthesis and characterization of cellulosic fiber from red banana peduncle as reinforcement for potential applications,” *J. Nat. Fibers*, vol. 16, no. 5, pp. 768–780, 2019.
- [29] C. V. Gomes, J. C. Araújo, D. M. Chaves, R. Fangueiro, and D. P. Ferreira, “Improving textile circular economy through banana fibers from the leaves central rib: effect of different extraction methods,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 146, pp. 195–204, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.fbp.2024.06.002.
- [30] Baley, C. (2005). *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. Techniques de l'Ingenieur.
- [31] Bourmaud, A. (2011). *Contribution à l'étude multi-échelles de fibres végétales et de biocomposites* (Ph.D. Thesis). University of Lorient, France.
- [32] Drzal, L. T., Mohanty, A., Misra, M. (2001). Bio-composite materials as alternatives to petroleum-based composites for automotive applications. *Magnesium*, 40(60), 1–3.
- [33] Elouaer, A. (2011). *Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales* (Ph.D. Thesis). Université de Reims Champagne-Ardenne, France.
- [34] Kueny, R. (2013). *Biocomposites : Composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles* (Ph.D. Thesis). Université de Lorraine. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750535>.
- [35] Pizzi, A., Kueny, R., Lecoanet, F., Massetau, B., Carpentier, D. et al. (2009). High resin content natural matrix–natural fiber biocomposites. *Industrial Crops and Products*, 30(2), 235–240. DOI 10.1016/j.indcrop.2009.03.013.
- [36] Berthelot, J. M. (2010). *Mécanique des matériaux et structures composites*. ISMANS, Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancées, Le Mans, France.
- [37] Florimond, C., Vilfayeau, J., Vidal-Salle, E., Boisse, P. (2013). *Modélisation numérique du procédé de tissage de renforts fibreux pour matériaux composites*.
- [38] Vilfayeau, J. (2014). *Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites* (Ph.D. Thesis). INSA de Lyon, Français.
- [39] Ndiwe, B., Pizzi, A., Tibi, B., Danwe, R., Konai, N. et al. (2019). African tree bark exudate extracts as biohardeners of fully biosourced thermoset tannin adhesives for wood panels. *Industrial Crops and Products*, 132, 253–268.
- [40] M. Asim et al., “A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites,” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, p. e950567, Oct. 2015.
- [41] D. E. Aizi, “Extraction, caractérisation morphologique, physico-chimique et mécanique des fibres caulinaires de *Retama monosperma* L. Boiss,” *Univ. Sci. Technol. D'Oran Mohamed Boudiaf*, 2017.
- [42] A. Beakou, R. Ntenga, J. Lepetit, J. A. Ateba, and L. O. Ayina, “Physico-chemical and microstructural characterization of ‘*Rhctophyllum camerunense*’ plant fiber,” *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 1, pp. 67–74, 2008.