



## Effect of Water Absorption on the Behavior of Bio-Composites

---

Ladaci Naouri, Ahmed Belaadi and Ladaci Fares

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

October 7, 2021

# INFLUENCE DE L'ABSORPTION D'EAU SUR LE COMPORTEMENT DES BIO-COMPOSITES

Ladaci Naouri  
Dept of technologie  
ENSET- SKIKDA  
ALGERIA  
naouriladagm@gmail.com

Belaadi Ahmed  
Dept of Mechaniks  
Skikda University  
ALGERIA  
ahmedbelaadi1@yahoo.fr

Ladaci Fares  
Dept of technologie  
Skikda University  
ALGERIA  
ladaci fares @hotmail.fr

**Abstract**— Le but essentielle de ce travail est d'étudier l'absorption d'eau des composites naturel à base d'une matrice époxy et de fibre de lin et de sisal à différentes architectures ainsi que leur hybridation .

Concernant les renforts fibreux, notre choix s'est porté sur les fibres de lin et de sisal en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques alliant rigidité, résistance et légèreté. A cela, s'ajoute le fait qu'elles sont largement disponibles.

Donc, Pour un meilleur développement de ces composites, il est nécessaire d'avoir une information supplémentaire sur leur durabilité. Ainsi d'avoir de faibles propriétés d'absorption d'eau, de sorte qu'ils peuvent être utilisés dans des applications où l'humidité pourrait être impliquée ou ils pourraient être mouillée parfois. La faible absorption d'eau assure également la durabilité du composite.

Nous avons analysé d'abord la cinétique de diffusion d'eau dans les différents composites, via une approche d'optimisation basée sur les modèles de Fick.

La procédure consiste à suivre la masse absorbée au cours du temps jusqu'à la saturation en eau. De ce fait, les échantillons ont été pesés après avoir être immergés dans l'eau.

Nous avons étudié aussi l'effet de plusieurs paramètres géométriques et l'orientation des fibres sur la cinétique de diffusion d'eau au sein des composites.

Les résultats montrent des améliorations significatives du comportement pour les composites à différentes architectures par rapport aux composites hybrides.

**Keywords**— *biocomposite ,fibre de lin, fibre de sisal, hybride, absorption d'eau.*

## I. INTRODUCTION

L'innovation sur les biocomposites ne cesse de croître ces dernières années [1], ils présentent des intérêts environnementaux considérables : ils sont renouvelables annuellement, biodégradables et recyclables [2,3]. Un grand intérêt a été accordé au développement des fibres, comme phase de renforcement dans ces matériaux en raison de leur faible coût, leur densité peu élevée, Les fibres végétales voient leurs applications se développer aussi bien dans l'habitat que dans les transports et les loisirs...[4,5].

Ces fibres peuvent provenir du bois, de tiges (lin, jute, chanvre, ...)[6], de feuilles (sisal, ananas, banane...)[7], de

fruits (coton, coco...)[8] ou d'herbes (bambou, riz...)[9-10].

Les fibres végétale sont de plus en plus utilisées en substitution les fibres de verre en tant que renfort de matériaux composites .En effet ,celle-ci offrent une alternative judicieuse d'un point de vue environnemental et mécanique [11].

En raison de la nature hydrophile de la fibre, l'utilisation des composites à fibres végétales dans des structures extérieures nécessite de connaître leur comportement dans un milieu humide [12].

Certains travaux de recherche ont montré que l'exposition prolongée de composite à fibres végétales à l'humidité et à la température entraîne une sévère diminution des propriétés mécaniques [13, 14, 15,16,17].

Des études de la littérature [18-19] ont montré que la plupart des fibres végétales ont des structures et des constituants presque similaires. En effet, ces fibres sont particulièrement sensibles aux conditions climatiques et au milieu auxquels elles sont exposées. L'humidité peut notamment poser problème et remettre en cause le choix des fibres végétales face aux fibres synthétiques. l'humidité, est également un paramètre important à prendre en considération [20]. Des travaux de recherche ont déjà été réalisés et se sont intéressés en particulier à l'influence de l'absorption d'eau sur le comportement des composites à fibres végétales, mais il peut être intéressant de comprendre le comportement séparé des matrices et des fibres avant de considérer le comportement des composites. Plusieurs études récentes ont étudiées l'absorption d'eau sur les matériaux composites à fibres végétales et ses conséquences parmi les quel on site :

Scida et al. [21] ont réalisé une étude sur l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques des composites à matrice epoxy et à fibres de lin en comparant deux types d'architectures : unidirectionnel et sergé. Que ce soit pour le composite à renfort sergé ou le composite à renfort unidirectionnel, les deux matériaux suivent un comportement fickien pour l'absorption. Toutefois, les auteurs ont noté que le composite avec renfort sergé avait

une cinétique d'absorption plus importante que l'unidirectionnel et ont également montré que l'absorption d'eau à saturation était plus importante pour ce type d'architecture.

Venkateshwaran *et al.* [22] ont ajouté des fibres de sisal avec différentes fractions massiques (25, 50 et 75%). L'hybridation des fibres de banane avec celles de sisal a permis d'améliorer à la fois les propriétés mécaniques et la résistance à l'absorption d'eau.

Pour illustrer l'effet de l'hybridation sur l'absorption d'eau, des travaux de recherche sont intéressés à l'étude de l'effet de l'hybridation fibres de verre et fibre naturelles sur l'absorption d'eau des matériaux composites [23].

Panthapulakkal *et al.* [24, 25] ont évalué l'effet de l'hybridation chanvre-verre sur l'absorption d'eau, les propriétés thermiques et mécaniques de composites hybrides à fibres courtes à matrice polypropylène (PP). Ils ont montré que l'hybridation chanvre-verre a significativement augmenté la résistance à l'absorption d'eau. En effet Kushwaha *et al.* [26] ont évalué l'effet de l'hybridation sur l'absorption d'eau des composites hybrides bambou-verre/époxy et bambou-verre/polyester. L'absorption d'eau a été réduite par l'augmentation des fibres de verre dans les composites. En effet, l'hybridation bambou-verre entraîne une diminution de la masse à saturation respectivement d'environ 38 % et 51% pour les composites hybrides bambou-verre/époxy et bambou-verre/polyester.

Zhang *et al.* [27] ont trouvé que l'absorption d'humidité par la fibre de lin suit initialement une relation linéaire avec une diffusion de type de Fickienne et ralentit quand la teneur en eau s'approche de l'équilibre. La molécule de cellulose de la fibre de lin contient des groupes hydroxyles qui forment des molécules d'eau. Cette molécule d'eau est absorbée directement par ces groupes hydrophiles et se fixe à la structure de la molécule de fibre. Lorsque les molécules d'eau sont absorbées, elles peuvent être attirées par d'autres groupes hydrophiles ou former d'autres couches au-dessus des molécules d'eau déjà absorbées. En règle générale, la fibre de lin peut absorber plus de 10% d'humidité en m. avec une humidité relative de 90%.

Assarar *et al.* [28] ont étudié le comportement d'absorption d'eau des composites à fibres de lin et résine époxyde, indiquant qu'il s'agit d'un comportement fickien à la température ambiante. Le comportement d'absorption d'eau des composites lin/époxy est initialement linéaire (diffusion fickienne) mais ralentit jusqu'à ce que le taux d'humidité approche de son niveau de saturation. L'absorption d'eau saturée à l'équilibre est d'environ 13,5% pour chaque échantillon.

Dhakal *et al.* [29] ont évalué l'effet de l'hybridation des fibres unidirectionnelles de lin avec des fibres de carbone sur l'absorption d'eau, les propriétés mécaniques des composites hybrides. Au bout de 27 jours d'immersion dans l'eau à 23°C, les résultats ont montré que l'hybridation entraîne une diminution de l'absorption d'eau d'environ 85% par rapport au composite à fibre de lin.

Deux matériaux ont été étudiés dans ce manuscrit : le premier est le lin orienté comme suit : à fibres unidirectionnelles, à (0/90°)s et à renfort hybride, le second est le sisal à renfort orientées de la même architecture que le lin.

La diffusion de l'eau dans les composites à fibres naturelles et matrice époxy est un phénomène largement répandu. Des essais d'absorption d'eau ont été réalisés pour mesurer la reprise d'eau dans nos matériaux. Cette technique a pour but de mesurer la quantité d'eau absorbée par l'échantillon au cours du temps jusqu'à un éventuel niveau de saturation, et d'en déduire par la suite sa cinétique d'absorption en la comparant à des résultats atteints par la littérature

Nous analysons d'abord la cinétique de diffusion d'eau dans les deux composites par identification de leurs paramètres de diffusion 3D, via une approche d'optimisation basée sur les modèles de Fick. Nous étudions ensuite l'effet de plusieurs paramètres géométriques et l'orientation des fibres sur la cinétique de diffusion d'eau au sein des deux composites.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A Matériaux et procédures

Le choix des renforts étudiés, s'est porté sur le lin et le sisal, ces derniers présentent une alternative très intéressante, vu les avantages qu'ils présentent de par leurs caractéristiques mécaniques très concurrentes et par leur disponibilité géographique.

Ces matériaux sont des bio composites stratifiés dont les constituants sont fournis par des usines de fabrication et de transformation diverses en Algérie. Ainsi les fibres de lin et de sisal sont fournies par l'usine de fabrication de cordes et de câbles en fibres naturelles de BLIDA. La résine époxy de type MEDAPOXY STR d'une densité de 1.110 kg/m<sup>3</sup> avec un durcisseur HY951 forment la matrice, tous deux sont fournis par la société GRANITEX Alger (Algérie).

Ces stratifiés sont élaborés à température ambiante (25 °C) par moulage en contact, l'ensemble reste dans le moule pendant 24 heures afin d'avoir une polymérisation complète de la résine.

Ces stratifiés sont préparés sous forme des plaques de 300 x 290 mm<sup>2</sup>, orientés de la manière suivante : 4 plis à orientations unidirectionnelle UD, croisée (0/90°)s et 6 plis pour les stratifiés hybrides placés de la façon suivante :

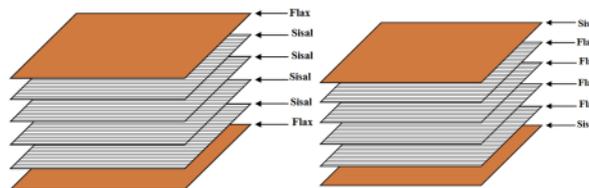


Fig 1. Configuration des stratifiés hybride utilisée.

Les plaques obtenues sont laissés à l'air libre pendant 7 jours, puis ils sont découpés en échantillons de dimensions 30 x 30 mm<sup>2</sup> à l'aide d'un disque diamanté . Enfin, les échantillons obtenus sont séchés dans un four à une température de 70 ° C. pendant 4 heures.

### B. tests d'absorption d'eau

Il existe plusieurs méthodes pour estimer la quantité d'humidité absorbée par les matériaux composites. La plus utilisée est la méthode gravimétrique, qui consiste à la prise de masse de l'échantillon avant et après vieillissement [30] . Elle consiste à suivre l'évolution de la masse des échantillons dans le temps pour des intervalles réguliers sur une période totale de plus de 600 heures. Pour cela une série d'échantillons de stratifiés de différentes épaisseurs ont été prélevés à partir de chaque plaque biocomposites afin de mesurer la cinétique d'absorption de l'eau. Les échantillons préalablement pesés sont immergés dans de l'eau distillée, puis ils sont sortis du bain et légèrement essuyés avec du papier absorbant à fin d'enlever le film d'eau présent à la surface. Les échantillons pesés sont immergés à nouveau et le processus se répète jusqu'à la saturation complète. Ces essais ont été réalisés selon la méthode standard ASTM (D1037-99, ASTM, 1999) [31] à une température ambiante de 23 °C et une humidité relative d'environ 49%. Les prises de masse ont été réalisées sur une balance **KERN PF Bis** d'une précision de 0,0001 mg.

Le taux d'absorption du matériau composite peut être calculée par la différence de masse de l'échantillon exposé à l'eau et sa masse à l'état non vieillie [32].

### C. Modèle analytique de Fick

La sensibilité à l'humidité des composites à fibres naturelles est un problème majeur dans différents secteurs, notamment l'automobile et l'industrie marine [33, 34, 35, 36]. En effet, la présence de molécules d'eau dans ces matériaux affecte leurs propriétés mécaniques ce qui peut limiter ainsi leur utilisation. La cinétique d'absorption d'eau des composites à fibres naturelles a été largement étudiée dans la littérature [37-38, 39-40] et plusieurs auteurs ont constaté qu'elle peut être décrite par le modèle de Fick La cinétique de diffusion d'eau dans un matériau peut être modélisée par différentes lois. La plus utilisée est la loi de Fick [41] . Cette loi est largement utilisée dans la littérature à cause de sa simplicité.

Donc ,après différentes prises de masse dans le temps, les caractéristiques liées à l'absorption d'eau des composites sont déterminées par le pourcentage en masse d'eau absorbée  $M_t$  défini par l'équation 1 :

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 (\%) \quad (1)$$

où :

$w_0$  : est la masse de l'échantillon non immergé à  $t = 0$  .

et  $w_t$  : est la masse des échantillons après un temps d'immersion donné.

## 3. RESULTS ET DISCUSSION

### A. absorption d'eau

Sur la base des résultats des expériences, les absorptions d'eau obtenues pour la totalité des composites et renforts étudiés sont représentées sur la figure 2; Cette figure présente l'évolution du taux d'absorption d'eau (Wt) des fibres de lin et de sisal a différents architecture.

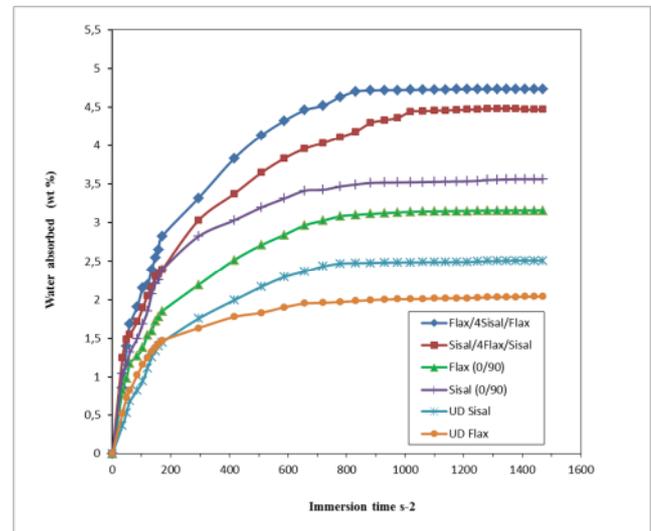


Fig2 : Résultats d'absorption d'eau du sisal et du lin

Les résultats obtenus montrent que les courbes de d'absorption des deux composites présentent deux zones différentes d'absorption. Dans la première partie, l'absorption d'eau augmente d'une manière proportionnelle avec la racine carrée du temps d'immersion exprimé en seconde. Cette zone est quasi-linéaire pour des valeurs d'absorption Wt inférieures 3 % . , Cette partie linéaire de la courbe renseigne sur la diffusivité des molécules d'eau qui dépend de la vitesse de pénétration de l'eau dans le matériau. La deuxième partie est non-linéaire jusqu'à la saturation, signifiant que la prise de masse augmente progressivement jusqu'à l'apparition d'un plateau d'équilibre appelé palier de saturation. Ce palier présente la masse d'eau absorbée par le matériau lorsque le temps de vieillissement veut au plus de 1400 s<sup>0.5</sup> d'immersion.

On a également observé que ; l'architecture unidirectionnelle était le moins sensible à l'absorption d'eau, parce que les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances dans la direction des fibres [42].

On peut remarquer tout d'abord que, comme attendu, que le composite à fibres de lin présente un faible pourcentage d'absorption que le sisal. Ceci se traduit que les fibres de lin sont composées principalement de cellulose et que les chaînes de ce derniers sont reliées par des liaisons Hydrogène reproduites de façon très régulières entre les groupements ce qui rend leur absorption est minimal [43,44].

Les résultats obtenus sont très proches de ceux obtenus par la littérature [45,46]. On a constaté aussi que l'orientation des fibres a un impact significatif sur l'absorption d'eau. Par exemple, les fibres de lin orienté à 0° et 90° absorbent, 3,15% d'eau cependant les fibres de sisal ont absorbées 3,56%. Et la quantité d'eau absorbé par les le renfort hybride lin/4sisal/lin (4.7 %) est supérieur par rapport aux renfort sisal/4lin /sisal (4.4 %).

#### 4. CONCLUSION

En raison de la nature hydrophile de la fibre, l'utilisation des composites à fibres végétales dans des structures extérieures nécessite de connaître leur comportement dans un milieu humide.

L'objectif de ce travail était de mieux comprendre le phénomène d'absorption de l'humidité au sein des bio-composite : le lin et le sisal ainsi d'évaluer l'effet de l'orientation des fibres sur la cinétique d'absorption d'eau.

Les résultats expérimentaux ont conduits à plusieurs conclusions :

- L'absorption d'eau des deux composites non-hybrides à fibres de lin et de sisal (UD et orienté (0/90°)s) sont moindre par rapport à l'orientation hybride,
- Les fibres de lin ont une influence significative sur le processus de diffusion d'eau. En effet, sa résistance à l'absorption d'eau est plus élevée que celle du sisal.
- Le modèle de Fick 3D décrit rigoureusement le comportement global de diffusion.

#### REFERENCES

- [1] : N. El Hajji, R.M. Dheilily, A. Goullieux, "Innovant agromaterials formulated with flax shaves and proteinic binder: process and characterization", *Composites Part B*, 43(2012), pp: 81–90.
- [2] : D. B. Dittenber and H. V. GangaRao. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 43(8) :1419 – 1429, 2012.
- [3] : K. Pickering, M. A. Efendy, and T. Le. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 83 :98 – 112, 2016. Special Issue on Biocomposites.
- [4] : H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop, M. Trada, *A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites*, *Composites: Part B*, 2011; 42: 856–873.
- [5] : D. N. Saheb, J. P. Jog, *Natural fiber polymer composites: A review*, *Advances in Polymer Technology*, 1999; 18: 351–363.
- [6] : CPL. Chow, XS. Xing, RKY. Li « Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites ». *Compos Sci Technol*, 67, pp. 306–13, 2007.
- [7] : H. Chen, M. Miao, X. Ding, « Influence of moisture absorption on the interfacial strength of bamboo/vinyl ester composites ». *Compos Part A*, 40, pp. 2013–9, 2009.
- [8] : V. Placet, « Influence de traitements hygrothermiques sur les propriétés mécaniques de composites à fibres végétales ». *AMAC Journées Nationales Composites 16 (Toulouse)*, 2009.
- [9] : A. Le Duigou, P. Davies, C. Baley, « Seawater ageing of flax/poly (lactic acid) biocomposites ». *Polym Degrad Stab*, 94, pp. 1151–62, 2009.
- [10] : S. Alix, E. Philippe, A. Bessadok, L. Lebrun, C. Morvan, S. Marais, « Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax–fibres ». *Bioresour Technol*, 100, pp. 4742–9, 2009
- [11] : A. Le Duigou .« Etude des mécanismes d'adhérence entre une fibre de lin et un PLLA-influence d'un traitement faiblement impactant à l'eau » comptes rendus des JNC 17 –Poitiers, 2011, 09 p.
- [12] : O. Faruk, A.K. Bledzki, H.P. Fink, M. Sain, « Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010 ». *Progress in Polymer Science*, 37, pp. 1552–1596, 2012.
- [13] : G. Apolinario, P. Ienny, S. Corn, R. Léger, A. Bergeret, and J. M. Haudin, "Effects of water ageing on the mechanical properties of flax and glass fibre composites: Degradation and reversibility," *Nat. Fibres Adv. Sci. Technol. Towar. Ind. Appl.*, vol. 12, pp. 183–196, 2016.
- [14] : A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli, and L. Guillaumat, "Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 90, pp. 100–110, 2016.
- [15] : M. Berges, R. Léger, V. Placet, V. Person, S. Corn, X. Gabrion, J. Rousseau, E. Ramasso, P. Ienny, and S. Fontaine, "Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 88, pp. 165–177, 2016.
- [16] : A. Céline, S. Fréour, F. Jacquemin, and P. Casari, "The hygroscopic behavior of plant fibers: a review.," *Front. Chem.*, vol. 1, no. January, p. 43, 2013.
- [17] : M. Ghasemzadeh-Barvarz, C. Duchesne, and D. Rodrigue, "Mechanical, water absorption, and aging properties of polypropylene/flax/glass fiber hybrid composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 49, no. 30, pp. 3781–3798, 2015.
- [18] : A. Moudood, A. Rahman, A. Ochsner, "Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 0(0) (2018), pp:1–17.
- [19] : A. Chilali, M. Assarar, W. Zouari, "Analysis of the hydro-mechanical behaviour of flax fibre-reinforced composites: Assessment of hygroscopic expansion and its impact on internal stress", *Composite Structures*, 206 (2018), pp: 177–184.
- [20] : N. Coniglio, K. Nguyen, R. Kurji, and E. Gamboa. Characterizing water sorption in 100% solids epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, 76(9) :1168–1177, 2013.
- [21] : D. Scida, M. Assarar, R. Ayad, and C. Poilâne. Effet de l'humidité sur le comportement mécanique des composites à fibres de lin. In

- 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), page 186, 2011.
- [22]: N. Venkateshwaran, A. ElayaPerumal, A. Alavudeen, M. Thiruchitrabalam, « Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites », *Materials and Design*, 32, pp. 4017–4021, 2011.
- [23]: M. Boopalan, M. Niranjanaa, M.J. Umapathy, « Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites », *Composites Part B*, 51, pp. 54–57, 2013.
- [24]: S. Panthapulakkal, M. Sain, « Injection-molded short hemp fiber/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites—mechanical, water absorption and thermal properties », *Journal of Applied Polymer Science*, 103, pp. 2432–2441, 2007.
- [25]: S. Panthapulakkal, M. Sain, « Studies on the water absorption properties of short hemp– glass fiber hybrid polypropylene composites », *Journal of Composite Materials*, 41(15), pp. 1871–1883, 2007.
- [26]: P.K. Kushwaha, R. Kumar, « The studies on performance of epoxy and polyester-based composites reinforced with bamboo and glass fibers », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, pp. 1–11, 2009.
- [27]: D. Zhang, N.R. Milanovic, Y. Zhang, “Effects of humidity conditions at fabrication on the interfacial shear strength of flax/unsaturated polyester composites”, *Composites Part B*, 60 (1) (2014), pp: 86–92.
- [28]: M. Assarar, D. Scida, A. El Mahi, “Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: flax fibers and glass fibers”, *Mater Des*, 32 (2) (2011), pp: 88–95.
- [29]: H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, R. Guthrie, J. MacMullen, N. Bennett, « Development of flax/carbon fibre hybrid composites for enhanced properties », *Carbohydrate Polymers*, 96, pp. 1–8, 2013.
- [30]: H. Dhakal, Z. Zhang, and M. Richardson, "Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites," *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 1674–1683, 2007.
- [31]: ASTM. Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. Designation: ASTM D1037-99; ASTM: West Conshohocken, PA, 1999.
- [32]: C. H. Shen and G. S. Springer, "Moisture absorption and desorption of composite materials," *Journal Of Composite Materials*, vol. 10, pp. 2-20, 1976.
- [33]: Le Duigou A, Davies P, Baley C. Seawater ageing of flax/poly(lactic acid) biocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 2009; 94(7): 1151-1162.
- [34]: Le Duigou A, Bourmaud A, Davies P, Baley C. Long term immersion in natural sea water of Flax/PLA biocomposite. *Ocean Engineering* 2014; 90, 140-148.
- [35]: Stamboulis A, Baillie CA, Peijs T. Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers. *Composites Part A* 2001; 32(8): 1105-1115.
- [36]: Mokhothua TH, Johna MJ. Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites. *Carbohydrate Polymers* 2015; 131: 337-354.
- [37]: Hu RH, Sun MY, Lim JK. Moisture absorption, tensile strength and microstructure evolution of short jute fiber/poly lactide composite in hygrothermal environment. *Materials & Design* 2010; 31: 3167-3173.
- [38]: Le Duigou A, Bourmaud A, Baley C. In-situ evaluation of flax fibre degradation during water ageing. *Industrial Crops and Products* 2015; 70: 204-210.
- [39]: Cherif ZE, Poilâne C, Vivet A, Ben Doudou B, Chen J. About optimal architecture of plant fibre textile composite for mechanical and sorption properties. *Composite Structures* 2016; 140: 240- 251.
- [40]: Doan TTL, Brodowsky H, Mader E. Jute fibre/polypropylene composites II. Thermal, hydrothermal and dynamic mechanical behaviour. *Composites Science and Technology* 2007; 67: 2707-2714.
- [41]: Fick, A. *On liquid diffusion*. Journal of Membrane Science, 100, 33–38, 1995.
- [42]: J.M. Berthelot. *Composite Materials : Mechanical Behavior and Structural Analysis*. Springer New York. 1999
- [43]: A. Celino, S Freour, Jacquemin F, “The hygroscopic behavior of plant fibers: a review”, *Front Chem*, 1 (2014), pp: 1–12.
- [44]: A. Komuriah, N.S. Kumar and B.D. Prasad. “Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties”, *Mech Compos Mater*, 50 (2014), pp: 359–376.
- [45]: A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli, and L. Guillaumat. Experimental and finite elements analysis of the vibration behaviour of a bio-based composite sandwich beam. *Composites Part B : Engineering*, 110 :466–475, 2017.
- [46]: A. Couture, G. Lebrun, and L. Laperrière. Mechanical properties of polylactic acid (PLA) composites reinforced with unidirectional flax and flax-paper layers. *Composite Structures*, 154 :286–295, 2016