

Caractérisation et performances thermiques des fibres de *Furcraea Foetida* et de broyat d'ananas en tant que matériau isolant en vrac

Hélène CAILLET^{1,2*}, Julie BASCAULES^{1,2}, Youssoufou MAHAMAN², Patrick ROUSSET³, Jean-François MARTIN¹, Laetitia ADELARD^{1,2}, Olivier MARC^{1,2}

¹IUT de Saint-Pierre

40 Avenue De Soweto, Saint-Pierre, 97410, La Réunion

²Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT)

15 Avenue René Cassin Sainte-Clotilde, 97715, La Réunion

³CIRAD UPR BioWooEB

73 Rue Jean François Breton, 34398, Montpellier

*(auteur correspondant : helene.caillet@univ-reunion.fr)

Résumé - A La Réunion, les déchets végétaux issus de la culture de l'ananas ainsi que le *Furcraea Foetida* (peste végétale aussi connue sous le nom de choka) ne sont actuellement pas valorisés. Dans le domaine de la construction, les isolants thermiques non biosourcés génèrent des impacts environnementaux importants, bien qu'ils soient essentiels pour la réduction des consommations énergétiques des bâtiments. Nous nous intéressons dans cette étude à la valorisation de ces déchets *via* l'extraction des fibres pour l'élaboration d'isolants thermiques en vrac. Les objectifs sont (i) de caractériser les fibres de feuilles de choka, (ii) d'évaluer la conductivité thermique d'un isolant à partir des fibres de choka et (iii) celle d'un isolant en vrac à partir de broyat de feuilles d'ananas en fonction de la densité. Les conductivités thermiques minimales obtenues sont de 0,066 W/m.K pour l'isolant de fibres de choka (densité de 0,022) et de 0,058 W/m.K pour l'isolant de broyat de feuilles d'ananas (densité de 0,159).

Nomenclature

A	aire de l'échantillon, m ²	T_C	température de la face chaude, °C
C	constante de refroidissement, W/°C	T_F	température de la face froide, °C
e	épaisseur de l'échantillon, m	U	tension, V
\dot{q}	flux de chaleur émis par effet joule, W	W_{ap}	teneur en eau de l'échantillon après essai, %
\dot{q}_l	pertes latérales, W	W_{av}	teneur en eau de l'échantillon avant essai, %
R	résistance, Ohm	<i>Symboles grecs</i>	
T_B	température à l'intérieur de la boîte, °C	λ	conductivité thermique, W/m.K
T_a	température ambiante dans la salle d'expérimentation, °C		

1. Introduction

Les déchets végétaux issus de la culture d'ananas (*Ananas comosus* variété Queen Victoria) ne sont actuellement pas valorisés à La Réunion tout comme le *Furcraea Foetida*, espèce invasive [1] connue sous le nom de choka vert. Selon la Direction de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF), la production annuelle d'ananas en 2018 était de 14 300 tonnes (dont 2 500 tonnes exportées vers l'Union Européenne), ce qui représente 44 % de la production totale de fruits sur le territoire. La culture de ce fruit implique une production de déchets importante (environ 3 tonnes de déchets de feuilles d'ananas par tonne d'ananas produite). En

effet, seule une partie des rejets est utilisée pour la plantation de l'ananas. La gestion des rejets restants est une problématique importante pour les agriculteurs, ce déchet étant difficilement biodégradable par compostage. Une étape de broyage *in situ* peut être envisagée pour accélérer la décomposition mais reste compliquée. En effet, La Réunion est également caractérisée par un relief important et des cultures dispersées sur le territoire, rendant difficile l'accès aux exploitations. Valoriser les feuilles d'ananas et de choka à travers le développement de produits à valeur ajoutée pour le territoire pourrait permettre de répondre à ces enjeux. En effet, les feuilles d'ananas et de choka peuvent être valorisées de diverses manières à travers l'extraction de leurs fibres. Les fibres d'ananas peuvent par exemple entrer dans la formulation de mortiers et de bétons ou encore être utilisées pour la production de briquettes, d'aérogel et de textile [2], [3], [4]. Concernant le choka, des travaux ont porté sur la caractérisation des fibres pour une utilisation dans le textile [5], ou encore l'influence de prétraitement alcalin des fibres en tant que matériaux de renforcement dans les composites polymères [6]. Divers travaux ont porté sur l'étude des performances mécaniques des fibres, mais très peu sur les performances thermiques.

Dans le domaine de la construction, les isolants thermiques non biosourcés génèrent des impacts environnementaux importants, bien qu'ils soient essentiels pour la réduction des consommations énergétiques des bâtiments. Deux approches permettent de réduire leur impact environnemental, le recyclage et/ou l'utilisation de matières biosourcées. L'ajout de fibres d'ananas permet d'améliorer la durabilité et les performances de mortier et de béton [2]. Aucune étude n'a porté sur l'évaluation des performances thermiques d'isolants en vrac de fibres de feuilles d'ananas et de choka approche qui permet de simplifier le procédé de fabrication comparativement à un matériau composite. Asim et al. (2015) soulignent, à travers une revue de littérature sur les fibres de feuilles d'ananas, qu'il y a un manque de connaissances sur les propriétés thermiques de ces fibres notamment la conductivité thermique [7]. Nous nous intéressons dans cette étude au développement de matériaux isolants à partir des feuilles d'ananas et de fibres choka, qui sont actuellement des déchets non valorisés sur notre territoire. En première approche nous proposons une étude sur les isolants en vrac. En effet une étude similaire sur le chanvre a permis d'obtenir une conductivité thermique de $0,04 \text{ W/m.K}$ (masse volumique de 85 kg/m^3) [8].

Nous présentons dans ce papier les travaux sur la préparation et la caractérisation de matériaux élaborés à partir de broyats de feuilles d'ananas et de fibres de choka, avec la mesure de la conductivité apparente d'isolant en vrac en fonction de la densité.

2. Matériels et méthodes

2.1. Extraction et préparation des fibres de choka

Il existe plusieurs méthodes pour extraire les fibres de feuilles. Tout d'abord l'extraction par raclage manuel sur des feuilles fraîchement collectées en utilisant une table comme support et un couteau. Il faut racler, éplucher et gratter délicatement la feuille puis laver le faisceau de fibres [9]. Une deuxième approche consiste à immerger les feuilles dans un réservoir d'eau pendant 10 jours à température ambiante. Les faisceaux de fibres sont ensuite extraits de chaque feuille rouie comme pour la précédente méthode (extraction par rouissage) [9]. Enfin, il est également possible d'effectuer une extraction mécanique grâce à une décortiqueuse. Dans cette étude, nous utilisons la première méthode pour l'extraction des fibres de choka et aucun prétraitement n'est utilisé. Les feuilles sont raclées à l'aide d'une machette fixée sur une planche en bois jusqu'à l'obtention de fibres sans résidu non cellulosique à la surface des fibres (cf. Figure 1). Les feuilles de *Furcraea Foetida* sont récupérées à Saint-Pierre et directement défibrées. Le diamètre des fibres de choka (après séchage) est mesuré à l'aide d'un microscope équipé d'un

oculaire gradué étalonné avec une lame de calibration. Les fibres sont préalablement séchées et placées dans la salle deux jours avant la mesure (conditions identiques à celles de la mesure de la conductivité). Une dizaine de mesures du diamètre est effectuée sur trois fibres. Le diamètre moyen d'une fibre est obtenu en effectuant la moyenne des diamètres d'une même fibre. La teneur en eau massique des matériaux est obtenue à partir des pesées à température ambiante avant et après le séchage des fibres à 105 °C pendant 24 h.

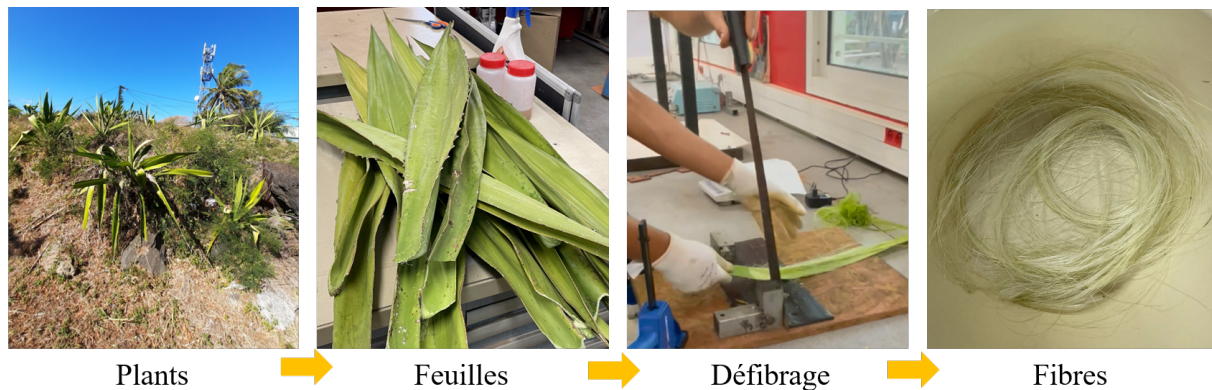


Figure 1 : Extraction manuelle des fibres de choka

2.2. Préparation du broyat de feuilles d'ananas

Les feuilles d'ananas sont arrachées sur les champs, puis stockées en chambre froide avant la préparation. Il est possible d'extraire leurs fibres selon les méthodes précédemment citées. Cependant, l'extraction manuelle des fibres d'ananas s'est avérée relativement compliquée, nous restons à ce jour dans l'attente d'une décortiqueuse pour extraire les fibres mécaniquement. Pour cette raison, nous avons choisi une autre approche qui consiste à broyer les feuilles d'ananas séchées [4]. Les feuilles sont préalablement coupées aux ciseaux en tronçons d'environ 5 cm puis séchées à l'étuve à 105 °C pendant 48 h. Les feuilles séchées sont ensuite broyées à 10 000 tr/min pendant 10 s. Cette méthode permet d'obtenir un matériau homogène simple à mettre en oeuvre dans le contenant utilisé pour la mesure de la conductivité thermique. Elle permet également d'obtenir un isolant en vrac avec une densité plus importante qu'avec les feuilles uniquement coupées et séchées. Cependant, il sera intéressant d'étudier la conductivité thermique des feuilles coupées et séchées dans une prochaine étude. La Figure 2 présente les différentes étapes de préparation des feuilles d'ananas et le résultat obtenu.

2.3. Evaluation du rendement

Le rendement du défibrage du choka est évalué à partir du ratio entre la masse des feuilles et la masse des fibres extraites. La longueur et la largeur des feuilles de choka sont également relevées. Le rendement de la préparation de l'isolant à partir des feuilles d'ananas est obtenu à partir de la variation entre la masse des feuilles d'ananas et la masse des feuilles broyées.

2.4. Caractérisation et préparation de l'isolant en vrac

2.4.1. Préparation des isolants en vrac

Les échantillons d'isolant en vrac sont conditionnés dans une boîte fournie avec le dispositif de mesure de dimensions 27x27x4 cm. Les faces latérales sont en plastique et les faces

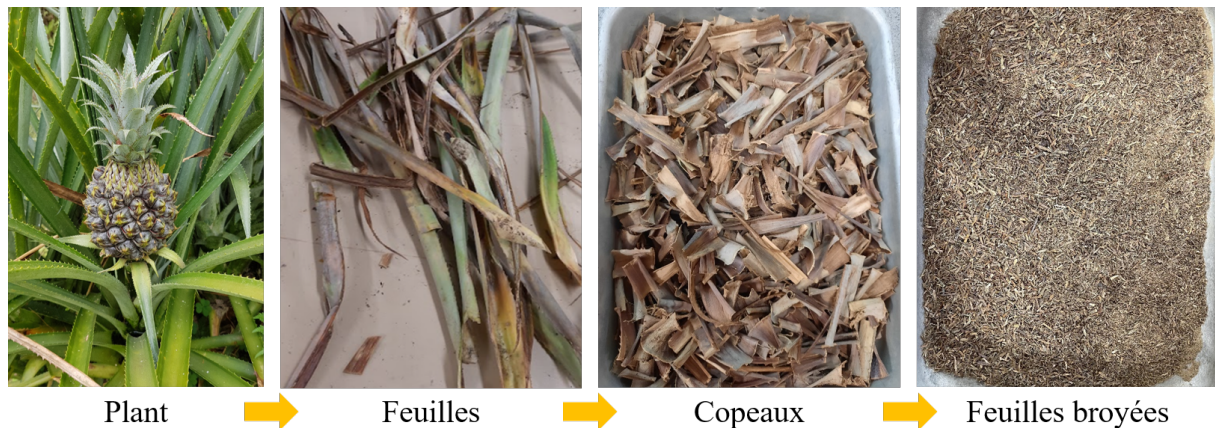


Figure 2 : Préparation du broyat de feuilles d'ananas

inférieure et supérieure en métal. Pour la préparation de l'isolant en vrac de choka, les fibres sont placées dans la boîte de manière aléatoire, en prenant soin de bien les séparer les unes des autres de sorte à ne pas avoir d'amas de fibres. Les isolants en vrac sont présentés sur la Figure 3. Nous testons deux densités (0,018 et 0,022) pour l'isolant à base de fibres de choka et trois densités (0,067, 0,096 et 0,159) pour l'isolant de broyat de feuilles d'ananas, afin d'évaluer l'impact de ce paramètre sur la conductivité thermique apparente de l'isolant.

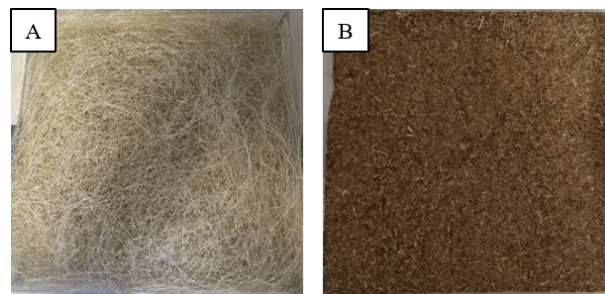


Figure 3 : Isolants en vrac à partir de fibres de choka (A) et de broyat de feuilles d'ananas (B)

2.4.2. Évaluation de la conductivité thermique apparente des isolants

La détermination expérimentale de la conductivité thermique apparente est réalisée à l'aide de la cellule de mesure présentée en Figure 4. Les échantillons, de dimensions 27x27x4 cm, sont mis en place à l'interface des sources chaude et froide de la cellule d'essai. Le cryostat K est un échangeur permettant de maintenir la température de la source froide. Un film chauffant permet d'émettre la chaleur au niveau de la source chaude (B1 et B2). Enfin le pupitre de commande permet de régler la puissance émise par la source chaude et de lire les températures mesurées.

Ce dispositif permet d'obtenir des mesures dont la précision est comparable aux méthodes conventionnelles telles que les méthodes du disque chaud et du fil chaud [10]. Il consiste à imposer un flux de chaleur unidirectionnel à travers l'échantillon à tester, puis à mesurer les températures de surface inférieure, supérieure ainsi que la température ambiante lorsque le régime permanent est atteint. Les pertes thermiques latérales de la source chaude sont estimées grâce à l'expression suivante :

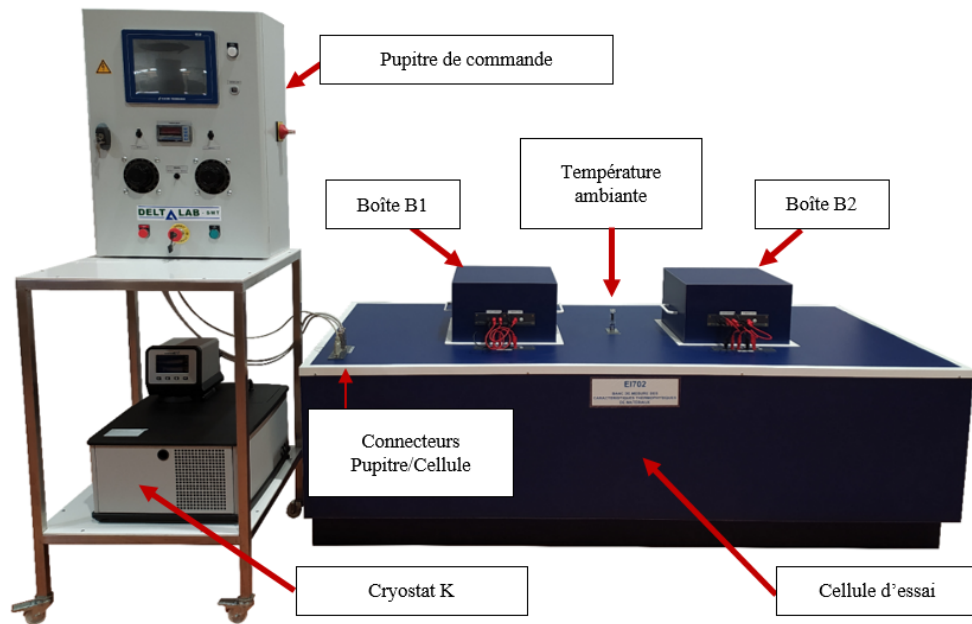


Figure 4 : Cellule de mesure de la conductivité

$$\dot{q}_1 = C(T_B - T_a) \quad (1)$$

Avec \dot{q}_1 les pertes latérales, C la constante de refroidissement de la boîte chaude permettant d'évaluer les pertes latérales, T_B la température à l'intérieur de la boîte et T_a la température de la salle d'expérimentation.

En régime permanent, on obtient :

$$\dot{q} = \frac{\lambda A}{e}(T_C - T_F) + \dot{q}_1 \quad (2)$$

Avec \dot{q} le flux de chaleur émis par effet joule par le film, λ la conductivité thermique de l'échantillon, A l'aire de l'échantillon, e l'épaisseur de l'échantillon, T_C la température de la face chaude et T_F la température de la face froide de l'échantillon.

Le flux de chaleur \dot{q} produit par la résistance chauffante s'exprime de la manière suivante :

$$\dot{q} = \frac{U^2}{R} \quad (3)$$

Avec U la tension et R la résistance.

Afin de déterminer les valeurs de la constante de refroidissement et de la conductivité thermique, nous réalisons des mesures pour une tension d'alimentation de 42 V ainsi que pour deux équilibres différents encadrant cette valeur (tensions de 37 V et de 47 V). La tension d'alimentation est définie en fonction de la masse volumique de l'échantillon. Les mesures réalisées pour une tension intermédiaire de 42 V permettent de vérifier la valeur de la conductivité thermique calculée à partir des tests réalisés à 37 et 47 V. Nous effectuons ensuite la moyenne entre ces deux valeurs de conductivité. Cette méthode est appliquée pour chaque essai. De plus, chaque échantillon est testé en triplicat. La conductivité retenue est la moyenne des triplicats.

2.5. Influence de la teneur en eau de l'isolant sur la conductivité thermique

Chaque échantillon est placé dans la salle deux jours avant le début des essais afin de s'assurer de son équilibre thermique et hydrique avec l'environnement de la salle d'expérimentation. Les échantillons sont pesés avant et après chaque essai afin de vérifier que la teneur en eau de l'échantillon reste constante au cours de l'essai. En effet, ce paramètre a un effet sur la conductivité thermique du matériau [10]. La teneur en eau est calculée à partir des masses à température ambiante (avant et après essai) et la masse sèche de chaque échantillon. Cette dernière est obtenue après le séchage de l'isolant à 105 °C pendant 24 h.

3. Résultats et discussions

3.1. Caractéristiques dimensionnelles et rendement pour la préparation des isolants

Le tableau 1 présente les moyennes des longueurs, largeurs et masses des feuilles de choka ainsi que la masse des fibres obtenues. Les feuilles de choka utilisées ont une longueur moyenne de 100 ± 11 cm. Leurs largeurs sont variables aux extrémités et au centre de la feuille avec des largeurs moyennes de 6,9 cm en bas de feuille, de 12,0 cm au milieu et de 3,9 cm en haut de feuille. La largeur moyenne des feuilles est de $7,6 \pm 1,1$ cm. Le tableau 2 présente les moyennes des mesures de diamètre des fibres de choka. Le diamètre moyen des fibres de choka est compris entre 142 et 181 μm avec un écart-type compris entre 44 et 46 μm . L'écart-type est dû au fait que le diamètre des extrémités des fibres est plus faible qu'en partie centrale. Les diamètres maximum et minimum observés sont respectivement de 275 et 100 μm . Ces différences peuvent être dues au défibrage manuel pouvant abîmer la fibre en réduisant son diamètre.

	Longueur feuille cm	Largeur haut feuille cm	Largeur bas feuille cm	Largeur milieu feuille cm	Largeur moyenne feuille cm	Masse feuille g	Masse fibres g	Rende- ment %
Moyenne	103,0	3,9	6,9	12,0	7,6	218,2	6,5	1,3
Ecart- type	11,3	0,9	2,0	2,0	1,1	64,0	2,8	-

Tableau 1 : *Caractéristiques dimensionnelles des feuilles de choka et rendement du défibrage*

	Fibre 1 μm	Fibre 2 μm	Fibre 3 μm
Diamètre moyen	159	142	181
Ecart-type	45	46	44

Tableau 2 : *Mesures du diamètre des fibres de choka*

En considérant la masse totale des 21 feuilles (4583,1 g) et la masse totale des fibres (60,32 g), nous obtenons un rendement de défibrage de 1,3 %. Ce rendement varie selon la personne qui défibre. Un rendement maximum de 3,5 % a ainsi été obtenu. Ces rendements sont similaires à ceux de la littérature (1 %) [5]. Concernant la préparation du broyat de feuilles d'ananas, le rendement est plus important car la perte de masse est due uniquement à la perte d'eau lors de la phase de séchage. La teneur en eau des feuilles d'ananas obtenue est de 34,84 %, et le ratio de la masse des feuilles par rapport à la masse des feuilles broyées et séchées est de 74,16 %.

3.2. Conductivité thermique apparente et teneur en eau des isolants en vrac

Nous avons également évalué la conductivité thermique apparente des isolants en vrac en fonction de leur densité (cf. tableau 3). Les matériaux biosourcés sont anisotropes par définition, en effet leurs propriétés varient en fonction de leur direction, notamment la résistance en traction. Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéressons uniquement à la conductivité thermique qui dépend principalement de la densité du matériau. De plus, l'étude est réalisée à l'échelle macroscopique et les fibres et broyats sont disposés de manière aléatoire dans toutes les directions. Ainsi, nous considérons le matériau homogène à l'échelle macroscopique et négligeons l'anisotropie du matériau pour l'évaluation de la conductivité thermique apparente des isolants. Pour les fibres de choka, les conductivités thermiques moyennes sont de 0,066 et 0,079 W/m.K, pour des densités de 0,022 et 0,018 respectivement. Ainsi, la conductivité diminue avec l'augmentation de la densité. Une observation similaire est faite pour l'isolant à base de broyat de feuilles d'ananas. Nous obtenons des valeurs de 0,087, 0,071 et 0,058 W/m.K pour des densités respectives de 0,067, 0,096 et 0,159. Les conductivités les plus faibles étant obtenues pour les densités les plus importantes, il sera intéressant d'effectuer des tests supplémentaires pour des densités supérieures ainsi que d'autres conditionnements. Une étude similaire sur le chanvre a permis d'obtenir une conductivité thermique de 0,076 W/m.K pour une densité de 0,018 et de 0,040 W/m.K pour une densité de 0,085 [8]. On constate également une diminution de conductivité thermique avec l'augmentation de la densité [8]. Comparativement à des isolants classiques telle que la laine de roche (0,040 W/m.K), les conductivités obtenues dans cette étude sont plus importantes. Ces travaux permettront d'obtenir les conductivités thermiques optimales en fonction de la densité de l'isolant. Dans le cas de l'intégration des fibres dans la formulation d'un matériau composite tel qu'un mortier, l'amélioration de la conductivité thermique sera antagoniste à celle de la résistance mécanique, il sera donc nécessaire d'évaluer l'impact de l'ajout de fibres/broyat sur ces deux propriétés afin de trouver le bon compromis entre performances thermiques et mécaniques en fonction de l'utilisation future du matériau.

Matériau	Densité	λ_{essai1} W/m.K	λ_{essai2} W/m.K	λ_{essai3} W/m.K	$\lambda_{moyenne}$ W/m.K	C W/°C	W_{av} %	W_{ap} %
Choka	0,018	0,083	0,076	0,078	0,079	0,236	8,49	8,77
Choka	0,022	0,066	0,065	0,067	0,066	0,263	8,37	9,68
Ananas	0,067	0,089	0,080	0,093	0,087	0,220	10,56	10,68
Ananas	0,096	0,070	0,065	0,079	0,071	0,254	8,41	8,41
Ananas	0,159	0,060	0,057	0,057	0,058	0,240	6,78	6,85
Chanvre	0,018				0,076			
Chanvre	0,085				0,040			

Tableau 3 : Conductivité thermique apparente des isolants en vrac ("essai1", "essai2" et "essai3" sont les mesures des triplicats), constante de refroidissement, teneurs en eau des échantillons avant et après essai et comparaison avec la littérature (isolant en vrac à base de chanvre [8])

La teneur en eau dans l'échantillon est évaluée avant et après les mesures de conductivité. Elle est inférieure à 11 % pour l'ensemble des essais. Des travaux ont porté sur l'étude de l'impact de la teneur en humidité sur la conductivité thermique de composite bois-béton [10], de panneaux de fibres de bois [11], ou encore de béton avec des grignons d'olive [12]. Dans le cas de panneaux de fibres, une teneur en humidité de 14,29 % comparativement à un échantillon sec, a pour effet une augmentation de la conductivité thermique de 0,049 à 0,060 W/m.K à 20 °C, et

de 0,052 à 0,067 W/m.K à 30 °C [11]. De plus, la conductivité thermique augmente en fonction de la température, et cet effet est amplifié pour des teneurs en humidité plus importantes [11].

4. Conclusion

Des mesures de conductivités thermiques apparentes ont été réalisées sur des isolants en vrac de fibres de choka et de broyat de feuilles d'ananas. Les conductivités thermiques minimales sont de 0,066 W/m.K pour l'isolant de fibres de choka (densité de 0,022) et de 0,058 W/m.K pour l'isolant de broyat de feuilles d'ananas (densité de 0,159). L'augmentation de la densité permet de réduire la conductivité thermique du matériau. Ces premiers résultats ont montré l'intérêt d'utiliser ces matériaux pour l'élaboration d'isolants thermiques. La teneur en humidité a un impact non négligeable sur les performances thermiques des isolants. Ainsi, de futurs travaux porteront sur l'étude de la conductivité thermique en fonction de l'humidité relative et sur la caractérisation des propriétés hygroscopiques des fibres (isothermes de sorption à l'humidité). L'intégration de ces fibres dans la formulation de mortier et l'élaboration de composites seront étudiées.

Références

- [1] C. Barbosa, J. M. Otorola, E. L. Giehl, F. Villalobos, R. Loyola G. Tessarolo, N. Machado, T. T. Castellani, Changes in the realized niche of the invasive succulent CAM plant *Furcraea foetida*, *Austral Ecol.*, 42-6 (2017) 643-654.
- [2] A. R. G. De Azevedo, M. T. Marvila, M. L. P. Antunes, E. C. Rangel, R. Fediuk, Technological Perspective for Use the Natural Pineapple Fiber in Mortar to Repair Structures, *Waste Biomass Valorization*, 12-9 (2021) 5131–5145.
- [3] N. H. N. Do, T. P. Luu, Q. B. Thai, D. K. Le, N. D. Q. Chau, S. T. Nguyen, P. K. Le N. Phan-Thien, H. M. Duong, Heat and sound insulation applications of pineapple aerogels from pineapple waste, *Mater. Chem. Phys.*, 242 (2020) 122267.
- [4] M. T. Marvila, A. R. G. Azevedo, J. Alexandre, E. B. Zanelato, S. N. Monteiro, D. Cecchin, L. F. Amaral, Mortars with Pineapple Fibers for Use in Structural Reinforcement, *J. Met. Mater. Miner.*, (2019) 721-728.
- [5] T. Totong, W. Wardiningsih, M. Al-Ayyuby, R. Wanti, R. Rudy, Extraction and Characterization of Natural Fiber from *Furcraea Foetida* Leaves as an Alternative Material for Textile Applications, *J. Nat. Fibers.*, 19-13 (2021) 6044-6055.
- [6] T. S. M. Shahril, M. J. M. Ridzuan, M. S. Abdul Majid, A. M. N. Bariah, M. T. A. Rahman, P. Narayanasamy, Alkali treatment influence on cellulosic fiber from *Furcraea foetida* leaves as potential reinforcement of polymeric composites, *J. Mater. Res. Technol.*, (2022)
- [7] M. Asim, K. Abdan, M. Jawaid, M. Nasir, Z. Dashtizadeh, M. R. Ishak, M. E. Hoque, A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites, *Int. J. Polym. Sci.*, 2015 (2015) 1–16.
- [8] P. Kosiński, P. Brzyski, A. Szewczyk, W. Motacki, Thermal properties of raw hemp fiber as a loose-fill insulation material, *J. Nat. Fibers.*, 15-5 (2018) 717-730.
- [9] A. D. O. Betené, F. E. Betené, F. E. Ngali, P. M. A. Noah, B. Ndiwé, A. G. Soppie, A. Atangana, R. Moukené, Influence of sampling area and extraction method on the thermal physical and mechanical properties of Cameroonian *Ananas comosus* leaf fibers, *Heliyon*, 8-8 (2022) 10127.
- [10] D. Taoukil, A. El bouardi, F. Sick A. Mimet, H. Ezbakhe, and T. Ajzoul, Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite physical and mechanical properties of Cameroonian *Ananas comosus* leaf fibers, *Constr. Build. Mater.*, 48 (2013) 104-115.
- [11] E. Troppová, M. Švehlík, J. Tippner, R. Wimmer, Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards, *Mater. Struct.*, 48-12 (2015) 4077-4083.
- [12] D. Belkharouché, A. Chaker, Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material, *Int. J. Hydrog. Energy*, 41-17 (2016) 7119-7125.

Remerciements

Les auteurs remercient l'IUT de Saint-Pierre (La Réunion) pour le financement du matériel et les étudiants Eric Cazeau, Loick Payet et Damien Siconine pour leur participation à ce projet.