

## Isolation thermique à base de pulpe de betterave et d'amidon : du matériau à la paroi

Georges Costantine<sup>1\*</sup>, Elias Harb<sup>1</sup>, Christophe Bliard<sup>2</sup>, Chadi Maalouf<sup>1</sup>, Elias Kinab<sup>3</sup>, Guillaume Polidori<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut de Thermique, Mécanique et Matériaux (ITHEMM) - EA 7548, Université de Reims-Champagne-Ardenne URCA, Campus Moulin de la Housse, 51687 Reims

<sup>2</sup>Institut de Chimie Moléculaire de Reims (ICMR), Université de Reims-Champagne-Ardenne URCA, Campus Moulin de la Housse, 51687 Reims

<sup>3</sup>Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche II, Roumieh, Liban

\*[georges.costantine@univ-reims.fr](mailto:georges.costantine@univ-reims.fr), [elias.m.harb@gmail.com](mailto:elias.m.harb@gmail.com), [christophe.bliard@univ-reims.fr](mailto:christophe.bliard@univ-reims.fr), [chadi.maalouf@univ-reims.fr](mailto:chadi.maalouf@univ-reims.fr), [elias.kinab@ul.edu.lb](mailto:elias.kinab@ul.edu.lb), [guillaume.polidori@univ-reims.fr](mailto:guillaume.polidori@univ-reims.fr)

---

**RESUME.** Actuellement, les réglementations thermiques nationales et européennes sont devenues de plus en plus sévères. Ainsi, vu que le secteur du bâtiment est l'un des plus concernés par ces directives, il est temps de commencer à s'interroger sur les matériaux de construction de demain. A cet égard, la tendance actuelle vise à promouvoir des isolants thermiques innovants, à base végétale, grâce à leur faible impact environnemental. Parmi ces produits, un nouveau composé à base de pulpe de betterave et d'amidon est en cours d'investigation. Sa caractérisation mécanique, acoustique et hygrothermique montre des propriétés prometteuses pour un éventuel isolant thermique du bâtiment. Le but de ce papier c'est d'étudier deux types de briques de cet isolant : brique pleine et perforée dans le but de choisir le type le plus adéquat pour des investigations à l'échelle de la paroi. La procédure de fabrication des échantillons est détaillée. Les cinétiques de séchage ainsi que des tests de compression mécanique sont comparés entre les deux types. Les résultats sont plus avantageux pour les briques perforées qui serviront pour la construction d'une paroi faisant l'objet d'études expérimentales postérieures.

**MOTS-CLÉS :** briques de betterave-amidon, cinétique de séchage, compression mécanique

---

**ABSTRACT.** Currently, national and European thermal regulations have become more and more stringent. Therefore, and since the building sector is one of the most affected by these directives, it is time to start thinking about the future building materials. In this regard, the current trend aims to promote innovative thermal insulators, based on vegetal fibers, thanks to their low environmental impact. Among these products, a new composite based on beet pulp and starch is under investigation. Its mechanical, acoustic and hygrothermal characterization shows promising properties for an eventual building thermal insulator. The purpose of this paper is to study two types of bricks of this insulation type: full bricks and hollowed bricks in order to choose the most suitable type for investigations on the wall scale. The manufacturing of the samples is detailed. The drying kinetics as well as mechanical compressive tests are compared between the two types. The results are more advantageous for the hollowed bricks which will be used for the construction of a wall being the subject of later experimental studies.

**KEYWORDS :** beet-pulp-starch bricks, drying kinetics, compressive tests

---

### 1. INTRODUCTION

Actuellement, le secteur du bâtiment connaît une transition significative vers des matériaux respectueux de l'environnement. En effet, le secteur du bâtiment en Europe est responsable de 46 % de la consommation totale d'énergie et de 36 % des émissions de gaz à effet de serre, comme indiqué dans le rapport de la Commission européenne en 2013 (European Commission 2013). En France, il est classé comme le premier consommateur d'énergie (43 %) et le deuxième contributeur aux émissions de CO<sub>2</sub> (25%), juste derrière le secteur des transports (ADEME 2013). Par conséquent, des mesures d'efficacité

énergétique dans les logements neufs et rénovés sont adoptées et se traduisent concrètement par l'amélioration du confort intérieur en réduisant les pertes thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment. Dans ce contexte, le développement de matériaux innovants pour la construction est aujourd'hui l'une des solutions les plus intéressantes.

La littérature montre une large gamme de matériaux à base d'agrégats végétaux (Mnasri et al. 2020): béton de chanvre, composites à base de liège et de paille (Douzane et al. 2016), bois, matériaux à base de typha-Australis (Niang et al. 2018), fibres de palmier dattier et pulpes de betterave (Belakroum et al. 2017)... Des études récentes décrivent l'élaboration et la caractérisation d'un nouvel agro-composite à base de pulpe de betterave sucrière et d'amidon de pomme de terre comme liant biosourcé (Karaky 2018). Différentes compositions (rapports amidon / pulpe) de ce composite sont testées. Par conséquent, les propriétés mécaniques, acoustiques et hygrothermiques montrent que le rapport de 0,4 amidon / pulpe représente la composition optimale pour des applications d'isolant thermique.

A la lumière de ces résultats, l'objectif de cet article est de comparer deux types de composite à base d'amidon et de pulpes de betterave : brique pleine et brique creuse. Le ratio amidon / pulpe égale à 40% est prise en compte dans cette étude. Deux types de spécimens de briques sont fabriqués. La cinétique de séchage de chaque type est étudiée. Ensuite, leurs propriétés mécaniques ont été mesurées et comparées. Les résultats préliminaires montrent que le séchage des briques creuses est plus efficace uniforme. En addition, les tests mécaniques mettent en évidence des propriétés intéressantes des briques creuses en termes de résistance à la compression.

## 2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

### 2.1. FABRICATION DES MOULES

Deux types de moules en bois sont utilisés pour la fabrication de briques. Le premier (figure 1) conçu pour les briques pleines est de dimensions ( $L = 23,3$  cm,  $l = 11$  cm et  $h = 7,4$  cm) avec un piston en bois ajusté ou un couvercle de ( $L' = 23,3$  cm,  $l' = 11$  cm et  $h' = 1,8$  cm) ce qui rend le volume de contenu équivalent à  $V_1 = 1435,28 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>. Le deuxième type est représenté sur la figure 2 pour les briques creuses de mêmes dimensions mais avec des tubes en cuivre de diamètre  $\varnothing = 1,8$  cm conduisant à un volume de contenu interne de  $V_2 = 1193,02 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>. Le rôle du piston en bois est de compacter le mélange à l'intérieur du moule et de contribuer à avoir des surfaces planes des échantillons.



Figure 1 : Moule en bois utilisé pour les briques pleines



Figure 2 : Moule en bois utilisé pour les briques perforées

## 2.2. PREPARATION DU MELANGE

En se basant sur le travail de thèse de Karaky (Karaky et al. 2019) qui a étudié quatre compositions d'amidon/pulpes de betterave (10%, 20%, 30% et 40% d'amidon), le ratio de 40% d'amidon par rapport à la masse totale de pulpe est considéré comme la composition optimale du point de vue des propriétés mécaniques, acoustiques et hygrothermiques (conductivité thermique de  $0,0757 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , capacité thermique de l'ordre de  $1410 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  et MBV de l'ordre de 2,8). Par conséquent, seul le rapport amidon / pulpe de 0,4 est utilisé dans la fabrication des échantillons dans ce travail.

En premier, les granulés de pulpe de betterave sont trempés pendant deux heures avec de l'eau distillée pour atteindre leur degré de saturation avec un rapport massique eau / pulpe égal à 2,5. Dans l'étape suivante, l'amidon de pomme de terre est ajouté aux pulpes humides saturées et mélangée manuellement pendant 10 minutes jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. Le mélange obtenu est ensuite placé dans un autoclave et chauffé pendant 30 minutes à  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  pour gélifier les granules d'amidon (Figure 3). La vapeur d'eau chaude produite dissout l'amidon, qui se transforme en une texture collante. Une fois que l'amidon se dissout complètement, le mélange peut enfin être versé dans les moules en bois (Figure 4). Le mélange pulpe de betterave-amidon est ensuite compacté sous une pression de  $0,044 \text{ MPa}$ . Des papiers ingraissables sont placés dans les moules pour faciliter le retrait de l'échantillon. Les figures 8 et 9 montrent respectivement une brique pleine et une brique creuse. Les échantillons ont été congelés à  $-78 \text{ }^\circ\text{C}$  avant séchage. Les méthodes de séchage et la cinétique sont discutées en détail dans la section suivante.



Figure 3 : Mélange chauffé dans l'autoclave



Figure 4 : Mélange coulé dans le moule



Figure 5 : Echantillon de brique pleine



Figure 6 : Echantillon de brique creuse

## 2.3. PROCESSUS DE SECHAGE

### 2.3.1. Méthodes de séchage

Physiquement, le séchage est un phénomène complexe entraîné par les transferts de chaleur et de masse à l'intérieur et à la surface du matériau. Le mécanisme de transport de masse est déclenché par la différence d'humidité entre la surface du matériau et son noyau humide. Les mécanismes de transport de masse sont liés à divers phénomènes: diffusion interne pure, diffusion superficielle, diffusion Knudsen, flux capillaire, évaporation, condensation et diffusion thermique (Chemkhi and Zagrouba 2008). Par conséquent, le processus de séchage décrit précédemment entraîne des changements dimensionnels de l'échantillon, appelés retrait. Dans ce travail, deux méthodes de séchage sont étudiées: séchage par tour de séchage à air chaud pulsé (*Figure 7*) et par lyophilisation (*Figure 8*). La solution optimale a été choisie en fonction du retrait de l'échantillon et sa qualité de surface (émergence de fissures). La procédure de séchage a consisté à surveiller les masses des échantillons à l'aide d'une balance électronique de  $\pm 0,01$  g de précision. Le séchage est arrêté lorsque les variations de quatre mesures successives des masses des briques sont inférieures à 0,1 g.



*Figure 7 : Tour de séchage*



*Figure 8 : Lyophilisateur*

Dans la méthode de tour de séchage, un four ventilé est utilisé comme indiqué sur la *Figure 7*. L'air ambiant entrant dans le four est chauffé à une température de  $40^{\circ}\text{C}$  avant de circuler autour des échantillons. Cette configuration permet de chauffer l'échantillon de bas en haut et de sécher la brique uniformément. Par ailleurs, le phénomène de lyophilisation (*Figure 8*) combine l'action du refroidissement et du vide pour réaliser la sublimation des cristaux de glace sans passer par la phase liquide (Dalgleish 1990). Les échantillons sont refroidis rapidement à des températures basses entre  $-10$  et  $-40^{\circ}\text{C}$  pour obtenir de petits cristaux de glace (la sublimation ultérieure est alors facilitée). La pression est ensuite abaissée pour permettre la sublimation des cristaux. Ainsi, la formation d'eau liquide intermédiaire est évitée. La sublimation continue de sécher le produit tant qu'une plage de pression de 200 à 300 Pa est maintenue. Les *Figure 9* et *Figure 10* montrent deux briques (pleine et creuse) suivant le séchage par l'étuve ventilée (tour à air chaud) et le lyophilisateur respectivement.



Figure 9 : Brique pleine après séchage par la tour à air chaud (étuve ventilée)

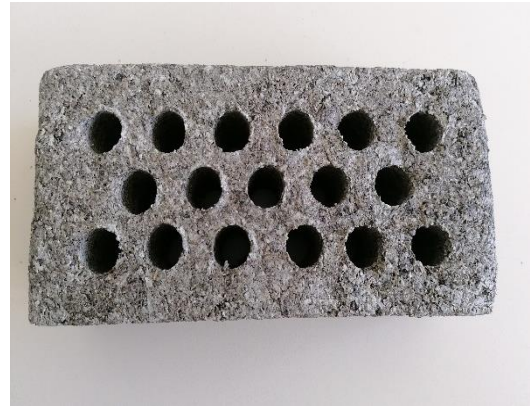


Figure 10 : Brique creuse après séchage par le lyophilisateur

Considérant la qualité de surface après le séchage, les résultats montrent que les briques séchées par lyophilisation (Figure 10) présentent des surfaces plus homogènes sur tous les côtés de la brique par rapport au séchage par étuve ventilée où des microfissures peuvent être observées avec des formes irrégulières des échantillons (Figure 9). Par ailleurs, si on calcule le pourcentage de retrait du spécimen (en calculant les volumes initiaux et finaux), un pourcentage de 28 % est observé avec le séchage par la tour à air chaud, tandis qu'un léger retrait (de l'ordre de 3 %) est constaté avec la brique séchée par lyophilisateur. Ce qui confirme que le séchage par lyophilisateur est plus approprié et sera adopté dans la suite.

### 3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### 3.1. CINETIQUES DE SECHAGE

Les cinétiques de séchage sont présentées sous forme de perte de masse des échantillons en fonction du temps. L'évolution du rapport massique de 3 briques pleines et 3 briques creuses est présentée dans les Figure 11 et Figure 12. Le taux d'humidité indiqué est calculé à l'aide de l'équation (1):

$$\text{Rapport Massique} = \frac{m(t) - m_f}{m_0 - m_f} \quad (1)$$

Où  $m(t)$  est la masse de l'échantillon à un instant  $t$ ,  $m_f$  représente sa masse finale à la fin du séchage (masse d'équilibre) et  $m_0$  la masse initiale à  $t = 0$ .

La comparaison des Figure 11 et Figure 12 montre que pour les briques creuses, la stabilisation de la masse est atteinte en 3500 min (environ 2 à 3 jours) tandis que les briques pleines ont besoin de près de 7500 min (environ 5 à 6 jours) pour atteindre leur masse sèche. Ce résultat est lié aux transferts de masse et de chaleur entre l'air et la surface de la brique. Les briques creuses présentent une surface d'interaction beaucoup plus importante avec l'air ambiant, ce qui conduit à un séchage plus rapide. De plus, les résultats présentés sur la Figure 11 sont très proches pour les trois briques perforées tandis que les trois courbes de la Figure 12 présentent un écart beaucoup plus important entre les deux. Cela est principalement dû à la géométrie des briques perforées, qui permet une meilleure circulation de l'air à la surface et à l'intérieur des échantillons, tandis que dans les briques entières, le séchage commence sur les surfaces et n'atteint pas uniformément le noyau de l'échantillon.

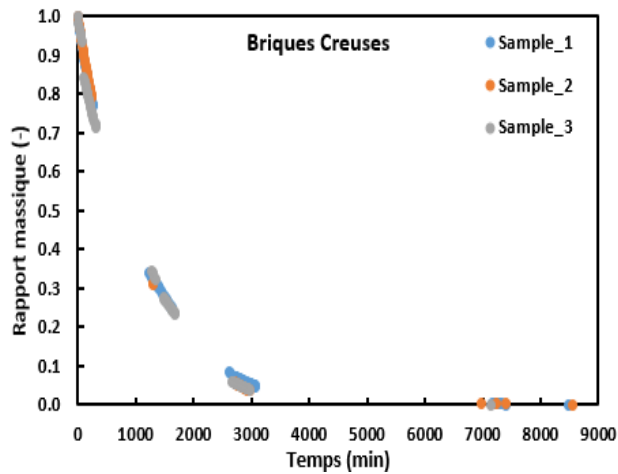


Figure 11 : Evolution du rapport massique pour 3 briques creuses

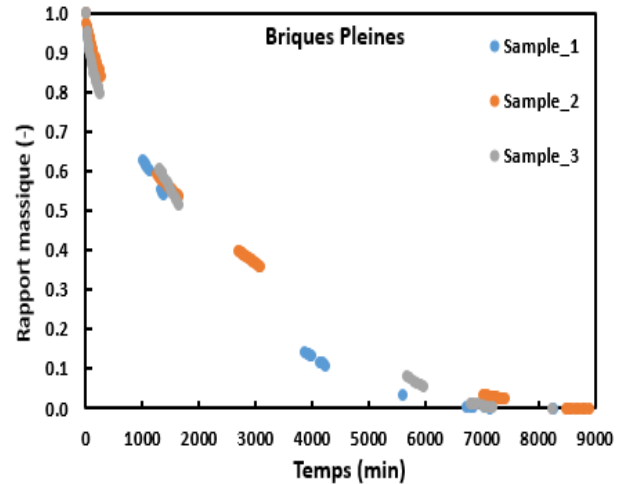


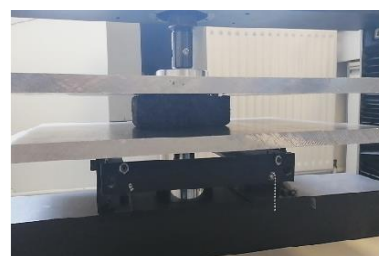
Figure 12 : Evolution du rapport massique pour 3 briques pleines

### 3.2. ESSAIS DE COMPRESSION MECANIQUE

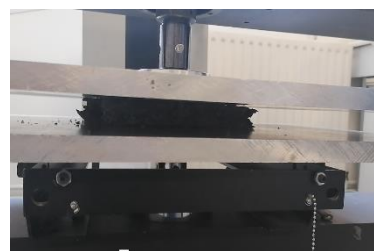
Des tests de compression sont effectués sur deux échantillons de chaque type de brique. Ces tests respectent la norme ISO 527-4 (ISO527-4 1997) avec des conditions intérieures de 23 ° C de température ambiante et 50 % d'humidité relative et une vitesse de 10 mm / min [29]. Un outil de mesure DIC (Digital Image Correlation) est installé avec une machine d'essai Instron 33R 4204 équipée d'une cellule de chargement de 50 kN. Deux caméras CCD (Charge-Coupled Device) permettent de prendre des images enregistrant la déformation lors des tests. Le capteur ARAMIS est un système de caméra stéréo fournissant des coordonnées 3D (Figure 13 (a))(Khalfallah et al. 2014). Des images numériques de la surface sont prises toutes les secondes pendant le test de compression. Ces images sont utilisées comme entrée pour calculer le champ de déplacement en utilisant la méthode DIC. Les tests de compression sont effectués dans le sens de la pression de compactage, comme le montrent les Figure 13 (b) et (c).



(a)



(b)



(c)

Figure 13 : Dispositif expérimental du test de compression: (a) Capteur ARAMIS, (b) Brique avant compression, (c) Brique après compression.

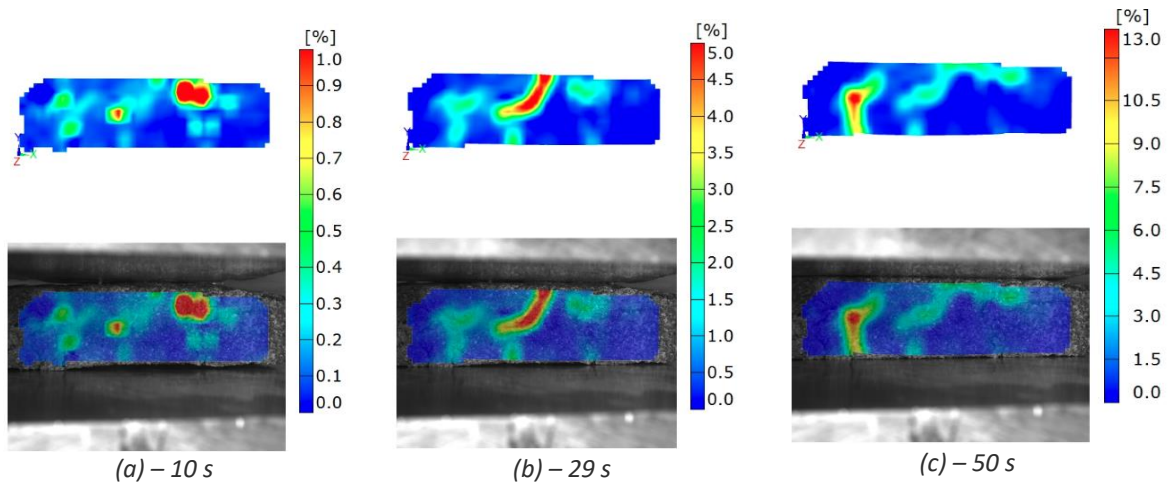


Figure 14 : Cartographies des déformations (in %) sous les contraintes de compression obtenues par ARAMIS pour les briques pleines à 10 s, 29 s and 50 s

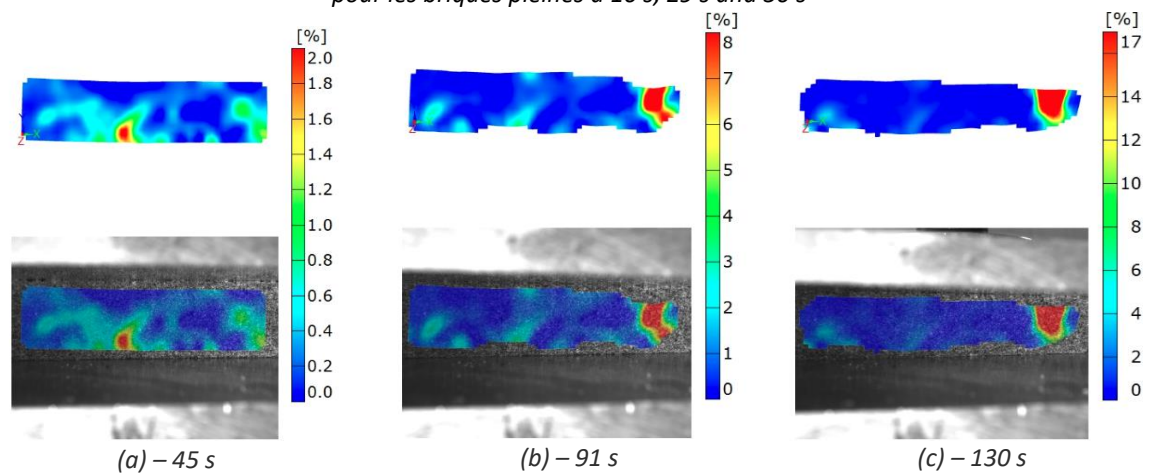


Figure 15 : Cartographies des déformations (in %) sous les contraintes de compression obtenues par ARAMIS pour les briques creuses à 10 s, 29 s and 50 s

Les cartographies de déformation des échantillons soumises à un essai de compression sont présentées dans les *Figure 14* et *Figure 15* pour les briques pleines et creuses, respectivement. Dans le cas des briques entières, la première fissure est observée à la surface supérieure de la brique après 10 secondes seulement. Cette fissure se propage à travers la brique et avec une charge croissante, une autre fissure apparaît et se propage à la surface inférieure de la brique. Lorsque la déformation atteint 13% à environ 50 s, la brique est totalement endommagée (*Figure 14 (c)*). D'un autre côté, la brique creuse présente une résistance à la compression plus élevée : effectivement, les premières fissures ne sont observées sur la surface inférieure et le coin inférieur droit qu'après 45 s (*Figure 15 (a)*). La *Figure 15* montre que la fissure dans le coin inférieur se propage et atteint la surface supérieure lorsque la brique est totalement endommagée, atteignant une déformation de 17 % après 130 s de test (*Figure 15 (c)*).

#### 4. CONCLUSION

Le travail dans cet article porte sur la caractérisation expérimentale d'un nouveau matériau bio-sourcé à base d'amidon et de pulpe de betterave destiné à usage d'isolant thermique dans le bâtiment. Deux types de briques sont fabriqués et testés : les briques pleines et les briques creuses afin de choisir le type de briques à utiliser pour les études postérieures à l'échelle de la paroi. Les investigations sont

menées sur la cinétique de séchage de chaque type et leur comportement mécanique concernant la comparaison des tests de compression.

Les résultats montrent que le processus de séchage utilisant un lyophilisateur fournit un séchage plus efficace en ce qui concerne le pourcentage de retrait et la qualité de la surface de l'échantillon après le séchage. De plus, il est prouvé que le séchage des briques creuses est plus rapide et plus homogène grâce aux cavités au cœur du spécimen. D'ailleurs, les résultats des essais de compression mécanique montrent que les briques creuses présentent une meilleure résistance à la compression. Par la suite, des études expérimentales et numériques sont en cours à l'échelle d'une paroi de 1 m<sup>2</sup> construite à partir de briques creuses afin d'étudier le comportement hygrothermique du matériau à cette échelle.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2013. “Les Chiffres Clés Du Bâtiment Énergie - Environnement.” <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-batiment-edition-2013-8123.pdf>.
- Belakroum, R., A. Gherfi, K. Bouchema, A. Gharbi, Y. Kerboua, M. Kadja, C. Maalouf, T. H. Mai, N. El Wakil, and M. Lachi. 2017. “Hygric Buffer and Acoustic Absorption of New Building Insulation Materials Based on Date Palm Fibers.” *Journal of Building Engineering* 12 (July): 132–39.
- Chemkhi, S., and F. Zagrouba. 2008. “Development of a Darcy-Flow Model Applied to Simulate the Drying of Shrinking Media.” *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 25 (3): 503–14.
- Dalgleish, J. McN. (J. McNair). 1990. *Freeze-Drying for the Food Industries*. Elsevier Applied Science, New York.
- Douzane, Omar, Geoffrey Promis, Jean Marc Roucoult, Anh Dung Tran Le, and Thierry Langlet. 2016. “Hygrothermal Performance of a Straw Bale Building: In Situ and Laboratory Investigations.” *Journal of Building Engineering* 8 (December): 91–98.
- European Commission. 2013. “EU ENERGY, TRANSPORT AND GHG EMISSIONS, TRENDS TO 2050, REFERENCE SCENARIO 2013.” Luxembourg. <https://doi.org/10.2833/17897>.
- ISO527-4. 1997. “ISO 527-4, Plastics — Determination of Tensile Properties — Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre-Reinforced Plastic Composites.” <https://www.iso.org/standard/4595.html>.
- Karaky, Hamzé. 2018. “Élaboration et Caractérisation Physique et Hygrothermique d'un Agro-Matériau à Base de Pulpe de Betterave et d'amidon.” Université de Reims-Champagne-Ardenne.
- Karaky, Hamzé, Chadi Maalouf, Christophe Bliard, Alexandre Gacoin, Nadim El Wakil, and Guillaume Polidori. 2019. “Characterization of Beet-Pulp Fiber Reinforced Potato Starch Biopolymer Composites for Building Applications.” *Construction and Building Materials* 203 (April): 711–21.
- Khalfallah, M., B. Abbès, F. Abbès, Y. Q. Guo, V. Marcel, A. Duval, F. Vanfleteren, and F. Rousseau. 2014. “Innovative Flax Tapes Reinforced Acrodur Biocomposites: A New Alternative for Automotive Applications.” *Materials and Design* 64 (December): 116–26.
- Mnasri, Faiza, Sofiane Bahria, Mohamed El-Amine Slimani, Ouhsaine Lahoucine, and Mohammed El Ganaoui. 2020. “Building Incorporated Bio-Based Materials: Experimental and Numerical Study.” *Journal of Building Engineering* 28: 101088.
- Niang, Ibrahim, Chadi Maalouf, Tala Moussa, Christophe Bliard, Etienne Samin, Céline Thomachot-Schneider, Mohamed Lachi, Hervé Pron, Ton Hoang Mai, and Salif Gaye. 2018. “Hygrothermal Performance of Various Typha–Clay Composite.” *Journal of Building Physics* 42 (3): 316–35.