
Influence des bio-adjuvants sur les propriétés thermiques et mécaniques d'un composite chaux-paille

Brahim Ismail¹, Naima Belayachi¹, Dashnor Hoxha¹

¹ Université d'Orléans, Université de Tours, INSA Centre Val de Loire Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé Polytech Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans, France

brahim.ismail@etu.univ-orleans.fr ; naima.belayachi@univ-orleans.fr ; dashnor.hoxha@univ-orleans.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de ce travail est d'optimiser les performances thermiques et mécaniques d'un composite biosourcé à base de paille céréalière. Deux procédures ont été retenues, la première permet d'augmenter la porosité de la matrice en ajoutant un bioadjuvant entraîneur d'air aux constituants du matériau. La deuxième consiste d'une part à augmenter la porosité du matériau et d'autre part à améliorer l'adhérence entre la matrice et la surface lisse des fibres végétales en substituant en poudre un pourcentage de liant par une protéine qui lui donne des qualités adhésives. Une caractérisation thermique et mécanique a été effectuée ensuite sur les différents composites. La comparaison des propriétés des biocomposites avec et sans additifs montre une influence remarquable de ces adjuvants sur les propriétés physiques et mécaniques.

ABSTRACT. The objective of this work is to optimize the thermal and mechanical performances of a bio-composite based on the cereal straw. Two procedures were chosen, the first one increases the matrix porosity by adding bio-adjuvant to the constituents of the material. The second consists on one hand to increase the porosity of the material and on the other hand to improve adherence between lime matrix and the smooth surface of the vegetal fibers by substituting in powder a percentage of binder with an adhesive protein. Thermal and mechanical characterization was then performed on the various composites. The bio-composite properties comparison show a significant effect of these bio adjuvants on the physical and mechanical properties.

MOTS-CLÉS : Composite, chaux, paille, bio-additif, conductivité thermique, résistance mécanique.

KEY WORDS: Composite, lime, straw, bio-additive, thermal conductivity, mechanical resistance

1. Introduction

Les matériaux de construction sont conçus pour remplir une ou plusieurs fonctions et en même temps pour répondre aux exigences réglementaires de résistance, de sécurité et de durabilité de leurs propriétés. Néanmoins, au cours de ces dernières années, dans un contexte environnemental et de raréfaction des ressources naturelles, leur impact environnemental a été considéré également comme un critère du processus de conception. Par conséquent, différents acteurs scientifiques, industriels et pouvoirs politiques sont réunis autour du développement de nouveaux matériaux de construction à base de ressources renouvelables et à faible impact environnemental. Le plus souvent, ces matériaux sont obtenus par l'incorporation des fibres végétales de (chanvre [WIL 18], paille [BEL13] [BED 16], Tournesol [BRO 18] [MAT 14]) dans une matrice de (chaux, ciment, terre, ou encore polymère...) ce qui offre des composites avec des propriétés d'isolation thermique et acoustique intéressantes ainsi qu'une faible densité grâce à la structure alvéolaire des fibres [AMZ 13]. Cependant, pour obtenir des propriétés comparables aux matériaux synthétiques et gagner la confiance des occupants, il est nécessaire de continuer les recherches et d'augmenter les défis pour optimiser au maximum leurs propriétés (thermique, mécanique, sanitaires...) en contrôlant de manière efficace leur formulation, leur production et mise en œuvre.

Le présent travail s'intéresse à l'amélioration des performances thermiques et mécaniques d'un bio-composite à base de chaux et de paille céréalière développé dans le cadre des travaux précédents [BEL 13] et s'inscrit dans le cadre d'un projet région PEPITE (Procédés et Enduits de Protection des Isolants de paille céréalière pour la rénovation Thermique). L'objectif principal de ce projet est d'industrialiser et de mettre en œuvre des matériaux isolants performants développés à base de fibres végétales. La démarche consiste à modifier la formulation du matériau en s'appuyant sur deux procédures. La première a pour but d'ajouter un bioadjuvant entraîneur d'air aux constituants du matériau afin de créer une porosité dans la matrice, et ainsi augmenter la porosité du bio-composite pour diminuer la conductivité thermique. La deuxième consiste d'une part à augmenter la porosité du matériau et d'autre part à améliorer l'adhérence de la matrice sur la surface lisse de la paille en substituant en poudre un pourcentage de liant par une protéine fortement adhésive. Une caractérisation thermique et mécanique

a été effectuée ensuite sur des échantillons sans et avec additifs afin d'évaluer l'influence de ces derniers sur les performances du composite.

2. Matériaux et méthodes :

2.1 Matériaux

Le liant utilisé dans ce travail est un mélange préformulé (Tradical PF70) : de chaux aérienne (75%), de chaux hydraulique (15%) et de pouzzolane (10%). Ce liant est largement utilisé dans la littérature [AMZ 13] avec les granulats végétaux pour sa facilité de malaxage.

La paille utilisée est une paille de blé de la région Centre-Val de Loire récoltée en 2016. La paille a été préparée par l'agriculteur pour les constructions en bottes de paille. Pour la confection des biocomposites, la paille a été broyée manuellement au laboratoire en respectant des longueurs variant entre 2 et 5 cm.

Les deux additifs (désignés par A1 et A2) utilisés sont des produits en poudre, issus de ressources naturelles et renouvelables. Le premier (A1) joue le rôle d'un entraîneur d'air. Le deuxième produit confère à la chaux des qualités adhésives pour améliorer l'adhérence liant-fibre.

2.2 Optimisation de la formulation et préparation des échantillons.

La fabrication des composites a été réalisée en se basant sur une formulation optimale des travaux précédents [BEL13]. Nous rappelons que les rapports massiques adoptés sont les suivants : Eau/Liant = 1,1 et Granulat/Liant = 0,2. Dans un objectif de comparaison, des échantillons sans additifs ont été élaborés dans un premier temps en adoptant les rapports massiques précédents (Figure 1-a). Ensuite, et pour la première procédure, les composites ont été préparés en gardant la même formulation et en substituant une proportion de 5 % en masse de la chaux par le bio-adjuvant. Le composite obtenu a montré un aspect très différent par rapport à celui de base (sans additif) avec une porosité importante (Figure 1-b). Les granulats ne sont plus enrobés par le liant mais sont devenus totalement noyés dans une matrice très poreuse. Cette structure cellulaire de la matrice est principalement due aux propriétés tensioactives de l'additif qui favorisent la formation d'une mousse stable lorsque de son mélange avec la chaux et l'eau. L'aspect observé qui se caractérise par un excès de liant nous a permis d'augmenter le rapport Granulat/Liant à : $G/L=0,3$ et $0,4$ (Figure 1-c et 1-d). Concernant la deuxième procédure, nous avons substitué 10 % en masse de la chaux par 5 % de chaque additif. Le rapport Granulat/Liant a été conservé à 0.2 tandis que le rapport Eau/Liant a été réduit à 1 pour éviter un phénomène de ségrégation dans le composite qui a été observé pour le rapport 1,1. Le deuxième additif est aussi un superplastifiant. La figure 1-e montre l'aspect du composite obtenu. La porosité inter-granulaire a disparue et le composite est devenu plus dense et plus compacte ce qui va influencer de manière importante ses propriétés. Cela peut s'expliquer par le fait que le deuxième additif empêche les molécules de l'entraîneur d'air à former une mousse lorsqu'il est utilisé en même pourcentage que ce dernier. Par conséquent, nous avons conservé le pourcentage du premier additif (entraîneur d'air) à 5% et nous avons diminué le pourcentage du deuxième à 2.5%. En suivant le même raisonnement de la première procédure nous avons augmenté le rapport Granulat/Liant à 0.3 et 0.4 et nous avons fabriqué des blocs pour chaque cas Figure 1-f et 1-g. Les échantillons ont été conservés pendant 28 jours de cure dans une salle à une température de 20°C et une humidité relative de 75%. Des temps de cure plus importants ont été utilisés mais ne sont pas présentés ici.

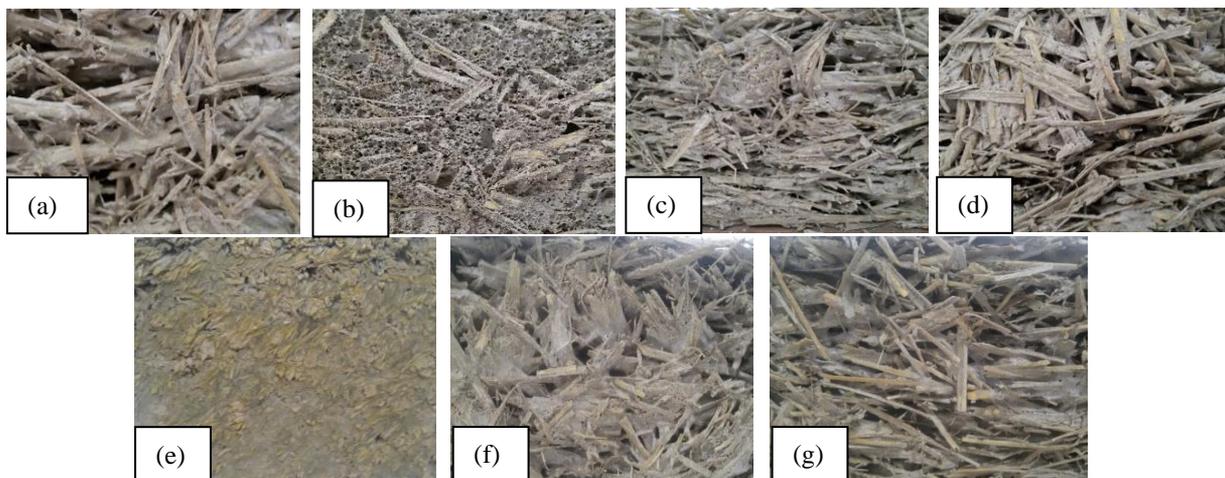


Figure 1 : Aspect des composites élaborés : a) Référence (sans additif) b) +5% A1_G/L=0,2 c) +5% A1_G/L=0,3 d) +5% A1_G/L=0,4 e) +5% A1+5%A2_G/L=0,2 f) +5% A1+2,5%A2_G/L=0,3 g) +5% A1+2,5%A2_G/L=0,4

2.3 Caractérisation thermique et mécanique

La conductivité thermique a été mesurée en utilisant le conductivimètre NeoTIM basé sur la technique du fil chaud. Les mesures ont été effectuées dans les trois directions et sur des échantillons de 15×15×10cm (Figure 2a). La sonde a été placée dans quatre positions différentes (Figure 2b) et le test a été répété trois à cinq fois dans chacune. Dans le but d'évaluer le comportement mécanique, des essais de compression uni-axiale ont été effectués sur les différents composites en utilisant une presse de type IGM d'une capacité de 250 KN avec une vitesse de déplacement de 0,5 mm/min. Les essais ont été effectués dans le sens privilégié par les fibres pendant le coulage sur des échantillons 20×20×10cm (Figure 3a) ainsi que le sens perpendiculaire sur des échantillons de 15×15×10cm (Figure 3b) (qui est le sens de coulage).

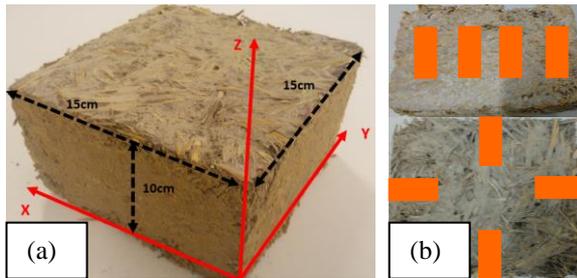


Figure 2 : Test thermique (a) les directions de mesure (b) les positions de la sonde

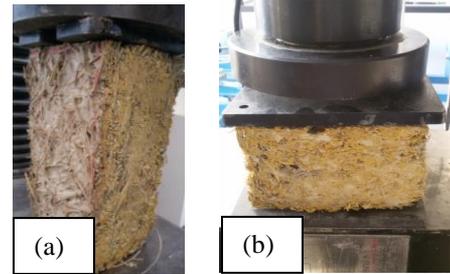


Figure 3 : Test mécanique (a) dans le sens privilégié par les fibres (b) dans le sens perpendiculaire

3. Résultats et discussion

3.1 Conductivité thermique

La figure 4 montre la conductivité thermique des différents composites dans les trois directions (celle qui nous intéresse pour la mise en place de la brique dans le cas d'une paroi est dans la direction z). Elle a été mesurée sur des échantillons séchés dans une étuve à 60°C jusqu'à la stabilisation de leur masse. Il est clair que la substitution de liant par 5% de l'additif entraîneur d'air a engendré une diminution significative de la conductivité thermique. Elle a été réduite de 0.075 W/m.K (référence) à 0.054 W/m.°C (+5%A1_G/L=0.2) grâce à la porosité créée dans la matrice respectivement pour une masse volumique de 473 Kg/m³ et 288 Kg/m³. Nous pouvons remarquer également que malgré l'augmentation de la fraction de la paille G/L de 0.2 à 0.3 et à 0.4, la conductivité thermique reste la même. Cela peut s'expliquer par le fait que la matrice poreuse a une conductivité équivalente à celle de la paille. Dans le cas de la deuxième procédure, comme attendu pour la première formulation (+5%A1+5%A2_G/L=0.2) où nous avons remplacé 10% de la chaux par 5% d'additif entraîneur d'air et 5% de protéine, la conductivité thermique a augmenté et a dépassé celle de la formulation de référence. Elle a atteint 0.091 W/m.°C contre 0.075W/m.°C de la formulation sans additif. Cela est justifié par la disparition de la porosité de la matrice ainsi que la porosité inter-granulaire comme il a été indiqué précédemment. La réduction de pourcentage du deuxième additif à 2.5% et l'augmentation du rapport G/L à 0.3 et 0.4 ont permis de retrouver des valeurs raisonnables au voisinage de celles obtenues dans le cas de la première procédure. La différence de la conductivité thermique dans les trois directions n'est pas significative pour les différents composites sauf dans le cas de la formulation de référence.

La masse volumique apparente a été diminuée de manière significative (Tableau 1). La création de la porosité dans la matrice a permis de diminuer la masse volumique de 1,75 fois par exemple.

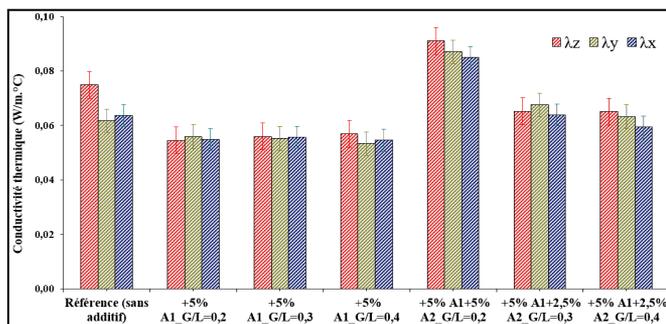


Figure 4 : Conductivité thermique des composites dans les trois directions

Formulation	ρ (Kg/m ³)
Référence (sans additif)	473
+5% A1_G/L=0,2	288
+5% A1_G/L=0,3	281
+5% A1_G/L=0,4	270
+5% A1+5% A2_G/L=0,2	547
+5% A1+2,5% A2_G/L=0,3	308
+5% A1+2,5% A2_G/L=0,4	283

Tableau 1 : Masse volumique apparente

3.2 Comportement mécanique à la compression

La figure 5 présente les courbes contrainte-déformation des essais de compression uniaxiale des composites étudiés dans le sens privilégié par les fibres (horizontal) pendant le coulage ainsi que dans le sens perpendiculaire (vertical). Le comportement mécanique obtenu dans la première configuration (horizontal) est intégralement différent par rapport à celui du deuxième cas (vertical).

Dans le sens horizontal, la courbe obtenue (Figure 5-a) présente trois zones, une première, où la variation de contrainte-déformation est linéaire, puis une zone pré-pic non linéaire qui se caractérise par une inflexion progressive des courbes à cause d'une fissuration progressive du liant jusqu'à la rupture. Enfin, une zone post-pic où le liant est totalement détérioré et l'effort est reporté par les granulats [AMZ 13]. Contrairement au sens horizontal, la réponse des composites dans le sens vertical montre un comportement en grande déformation qui se caractérise par l'absence d'un pic de rupture. En effet, le composite continu à se déformer jusqu'à la fin de l'essai, fixé à 45 % de déformation.

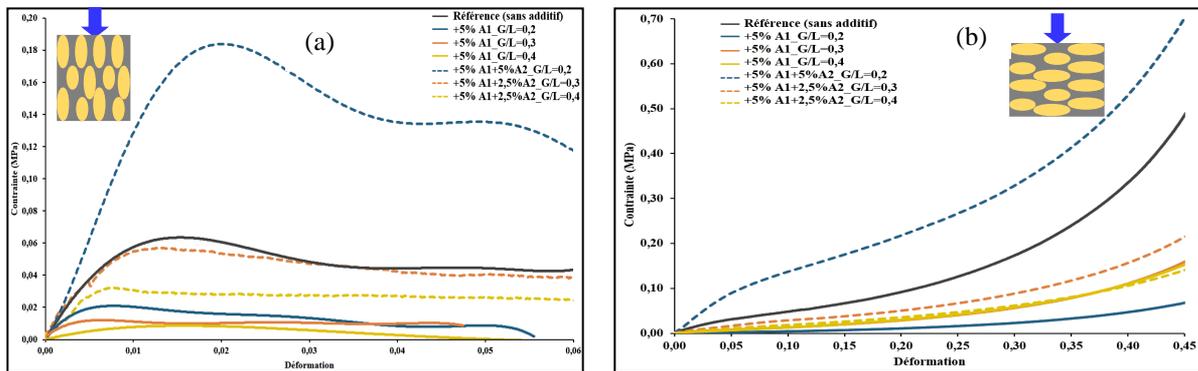


Figure 5 : Courbes contrainte-déformation : a) sens privilégié par les fibres b) sens perpendiculaire.

La résistance à la rupture (représentant le pic de la courbe) de chaque bio-composite a été déterminée à partir des courbes contrainte déformation dans le sens horizontal. Nous avons pu constater que la résistance à la rupture a été fortement diminuée pour les différents composites hormis la formulation +5%A1+5%A2_G/L=0,2 ou la valeur dépasse trois fois celle de la formulation de référence. Une légère diminution a été observé également pour la formulation de +5%A1+2.5%A2_G/L=0.3 par rapport à la formulation de référence. Une évolution identique a été enregistrée pour le comportement des bio-composites dans le sens perpendiculaire.

4. Conclusion

L'objectif de la présente étude est d'améliorer le caractère isolant d'un bio-composite à base de paille céréalière tout en gardant une résistance équivalente à la tenue mécanique au poids propre des matériaux. La substitution de 5% de la chaux par un bio-additif entraîneur d'air a permis de réduire la conductivité thermique avec une diminution drastique de la résistance mécanique. Par ailleurs, l'ajout de 5% de cet additif entraîneur d'air avec 5% d'une protéine aux constituants du matériau a conduit à un composite plus dense avec une résistance mécanique trois fois plus grande que celle de la formulation de référence avec une conductivité très élevée. Enfin, un compromis a été obtenu entre la conductivité thermique et la résistance mécanique en utilisant 5% d'additif entraîneur d'air avec 2.5% de protéine. Le matériau développé présente une performance thermique intéressante qui lui confère une bonne qualité d'isolation.

5. Bibliographie

- [AMZ13] Sofiane.A, Laurent.A, *Les bétons de granulats d'origine végétales : application au béton de chanvre*. Edition Lavoisier. 2013
- [BED16] Bederina, M., Belhadj, B., Ammari, M. S., Gouilleux, A., Makhoulouf, Z., Montrelay, N., & Quéneudéc, M. « Improvement of the properties of a sand concrete containing barley straws—Treatment of the barley straws ». *Construction and Building Materials*, vol.115, 2016, p 464-477.
- [BEL13] Belayachi, N., Bouasker, M., Hoxha, D., & Al-Mukhtar, M. « Thermo-mechanical behaviour of an innovant straw lime composite for thermal insulation applications », *Appl. Mech. Mater.*, vol 390, 2013, p. 542–546
- [BRO18] Brouard, Y., Belayachi, N., Hoxha, D., Ranganathan, N., & Méo, S. « Mechanical and hygrothermal behavior of clay–Sunflower (Helianthus annuus) and rape straw (Brassica napus) plaster bio-composites for building insulation». *Construction and Building Materials*, vol.161, 2018, p. 196-207.
- [MAT 14] Mati-Baouche, N., De Baynast, H., Lebert, A., Sun, S., Lopez-Mingo, C. J. S., Leclair, P., & Michaud, P. « Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan ». *Industrial Crops and Products*, vol. 58, 2014, p. 244-250.
- [WIL 18] Williams, J., Lawrence, M., & Walker, P. «The influence of constituents on the properties of the bio-aggregate composite hemp-lime». *Construction and Building Materials*, vol.159, 2018, p. 9-17