

Projet MYCOBAT : Développement de myco-composites pour l'isolation biosourcée de bâtiments en bois

FIGEL Laura^{1,2}, AYADI Melek¹, BROSSE Nicolas¹, VAHABI Henri³, BESSERER Arnaud^{1*}

¹Université de Lorraine, INRAe, LERMAB, GP4W, Nancy, 54000, France

²Nouvelle adresse (à partir du 1^{er} octobre 2025) Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAe, UMR Silva, Champenoux, 54000, France

³Université de Lorraine, CentraleSupélec, LMOPS, F-57000, Metz, France

*arnaud.besserer@univ-lorraine.fr

Mots clefs : Myco-composite ; isolant ; ignifugation ; éco-matériaux

Introduction

Dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources, le secteur du bâtiment doit repenser ses pratiques en adoptant des matériaux plus durables, issus de l'économie circulaire. Les matériaux isolants conventionnels, tels que le polystyrène expansé ou les mousses polyuréthane, sont peu recyclables et émettent des gaz toxiques en cas d'incendie (Michalak et al 2020). Face à ces enjeux, les matériaux biosourcés apparaissent comme une alternative prometteuse, alliant performance thermique, réduction de l'impact environnemental et valorisation des déchets (Rabbat et al 2022).

Parmi eux, les myco-composites, élaborés à partir du mycélium de champignons cultivés sur des substrats lignocellulosiques (sciure, paille, chènevette...), suscitent un intérêt croissant (Jones et al 2020). Leur procédé de fabrication, à faible consommation énergétique, permet de transformer des coproduits agricoles ou industriels en matériaux légers, compostables, et potentiellement isolants (Elsacker et al 2020). Le mycélium agit comme une colle naturelle, formant une matrice solide dont les propriétés thermiques et mécaniques dépendent étroitement de paramètres tels que la granulométrie du substrat, la souche fongique ou les conditions de séchage (Appels et al 2019). Les performances thermiques restent très variables selon les conditions de production, certaines atteignant des conductivités proches de 0,05 W/(m·K) (Elsacker et al 2019), comparables à celles d'autres isolants biosourcés. La maîtrise des paramètres de production de ces matériaux reste toutefois un enjeu majeur pour garantir la reproductibilité et envisager une mise en œuvre à plus grande échelle.

Le projet MYCOBAT s'inscrit dans cette dynamique d'innovation en cherchant à développer des matériaux isolants à base de mycélium et de déchets lignocellulosiques. L'objectif est d'optimiser les performances thermiques des myco-composites via le contrôle de paramètres clés comme la granulométrie des particules et la porosité du matériau produit. Ce travail vise ainsi à proposer une alternative locale, renouvelable et recyclable aux isolants traditionnels, adaptée aux enjeux de la construction durable.

Matériel et méthodes

Développement des myco-composites : matériaux, inoculation et post-traitement

Du hêtre (*Fagus sylvatica*), provenant des Vosges (France), a été transformé selon trois procédés : i) par broyage équipé de tamis de 6 mm (Cross-beater mill SK100, Retsch, Allemagne) pour obtenir des particules standardisées : Std, ii) par usinage à l'aide d'une fraise hélicoïdale de 25 mm de diamètre : DU-F et iii) par usinage à l'aide d'un couteau à rabotage : DU-R. L'humidité de la biomasse a été ajustée à 60 % avant inoculation.

L'inoculum fongique de *Trametes versicolor* CTB 863 A a d'abord été cultivé sur gélose maltée (20 g/L d'extrait de malt, 2 % d'agar) pendant 7 jours. Cinq pastilles de 8 mm de diamètre ont ensuite été transférées dans des fioles Erlenmeyer bafflées contenant 50 mL de milieu malté 2%, incubées à 28 °C et 100 rpm pendant 2 jours. La culture obtenue a été utilisée pour inoculer un bioréacteur de 5 L contenant du malt 2% cultivé à 28 °C, 250 rpm, 80 % O₂, et pH 5. La croissance a été suivie par mesure du potentiel rédox et de la densité optique. Une fois les conditions optimales atteintes, la biomasse a été récupérée par centrifugation (4200 g, 10 min, 21 °C), puis utilisée pour la préparation d'une préculture de myco-composite. Cette préculture a été réalisée avec un ratio mycélium/substrat de 1:2 (m/v), mélangée dans des contenants stériles, puis incubée à 28 °C et 60 % d'humidité relative pendant 15 jours. Un mélange à 1:4 de préculture et de substrat a ensuite été préparé dans des contenants stériles, puis incubé à 28 °C et 60 % d'humidité relative pendant 30 jours. Le séchage a été réalisé à 75 °C, jusqu'à stabilisation de la masse. La teneur finale en humidité a été calculée à partir des masses avant et après séchage.

Caractérisation multi-échelle des myco-composites

La distribution granulométrique des particules a été analysée à l'aide d'un analyseur CAMSIZER P4 (Microtrac Retsch), basé sur l'analyse d'images dynamiques (ISO 13322-2). Les paramètres mesurés incluent : xc_min (corde minimale), xFe_max (tangente maximale) et xMa_min (diamètre de Martin minimal). Les particules >16 mm ont été exclues de l'analyse.

La microscopie électronique à balayage (MEB) a été réalisée à l'aide d'un microscope JEOL IT200. Les échantillons ont été métallisés avec un alliage or/palladium à l'aide d'un métalliseur SC7620 (Quorum, Angleterre) sous un vide de 6.10^{-2} mbar. L'analyse a été effectuée en mode vide poussé avec un détecteur SE, à une distance de travail de 10 mm, et une tension d'accélération comprise entre 5 et 15 kV.

La conductivité thermique a été mesurée à l'aide d'un appareil à fluxmètre conformément à la norme NF EN 12667. Les échantillons, de forme carrée (150 mm de côté), présentaient une épaisseur variant de 30 à 45 mm. Avant les mesures, ils ont été séchés pendant 24 heures à 70 °C puis stockés dans un dessiccateur jusqu'à l'analyse.

Résultats

Influence de la granulométrie sur la conductivité thermique

Les particules Std présentent une morphologie homogène et régulière (Fig. 1a). L'analyse granulométrique indique que seulement 19 % des particules sont fines, tandis que 60 % se situent entre 4 et 8 mm de diamètre (Fig. 1d). L'aspect des particules DU-F se caractérise par une forme irrégulière ainsi qu'une texture fibreuse en surface (Fig. 1b). Des pores sont également observables en MEB sur la surface des particules. La taille des particules est hétérogène, avec une distribution granulométrique bimodale (Fig. 1d) présentant deux pics à 1,25 mm et 3,15 mm. Il a été déterminé que 60 % des particules sont fines (i.e. < 2 mm). Les particules DU-R présentent une morphologie relativement homogène, avec des formes allongées et bien définies (Fig. 1c). Les observations en MEB révèlent des surfaces lisses et compactes, dénuées de porosité apparente, contrastant avec les particules DU-F. L'analyse granulométrique montre une distribution plus large que celle des particules Std, mais plus centrée que celle des DU-F, avec une majorité des particules comprises entre 3,15 et 8 mm (Fig. 1d). La fraction de particules fines (< 2 mm) reste modérée, significativement inférieure à celle des DU-F, indiquant un broyage plus contrôlé.

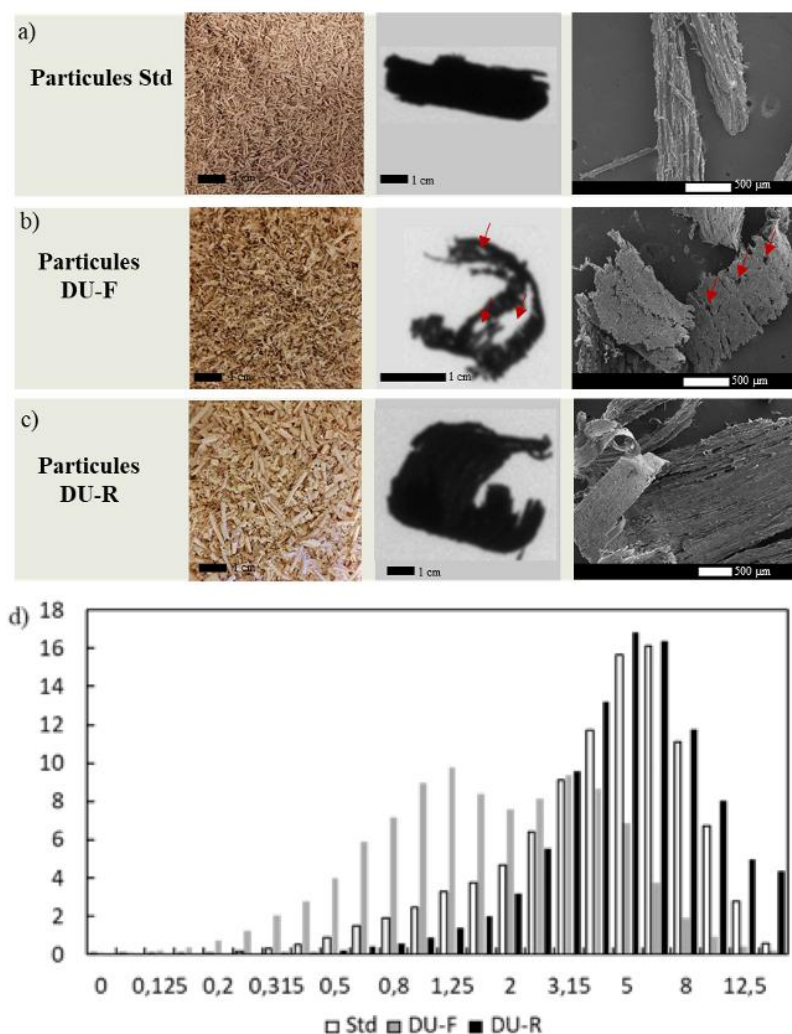


Fig. 1 : Aspect des biomasses utilisées comme substrat pour la production de myco-composites : a) particules de hêtre standardisées ; b) particules de hêtre issues de déchets d'usinage fraisage et c) particules de hêtre issues de déchets d'usinage rabotage ; les flèches indiquent les pores. d) Distribution des largeurs minimales (xMa_min) des particules.

Après un mois d'incubation, les myco-composites ont été séchés pour stabilisation (Fig. 2). Macroscopiquement, les myco-composites Std présentent une surface homogène, tandis que ceux à base de DU-F sont plus irréguliers, suggérant une colonisation incomplète. Le mélange Std-DU-R montre une texture granuleuse mais bien colonisée. En microscopie (MEB), les myco-composites Std et DU-F révèlent un réseau mycélien dense et interconnecté, tandis que DU-R présente des zones très fortement colonisées, apparaissant comme un tapis dense et des zones très peu colonisées.

Les conductivités thermiques au point sec (0 % HR) et humide (50 % HR) ont été mesurées à 10 °C et 20 °C à l'aide d'un fluxmètre. Les panneaux ont été préconditionnés à 70°C (sec) puis à 23 °C / 50 % HR (humide). Dans tous les cas, la conductivité est plus faible à 10 °C qu'à 20 °C, en raison de l'accroissement du transfert de chaleur (conduction et convection interparticulaires) à température plus élevée. La même tendance est observée en conditions humides avec des variations de 2,27 % (Std) à 6,98 % (Mix Std-DU-R).

La température apparaît ainsi comme un paramètre déterminant, une élévation réduisant la capacité isolante des myco-composites. Outre cet effet thermique, l'humidité relative joue également un rôle notable. L'analyse a montré que l'humidité (23 °C, 50% HR) augmente la

conductivité thermique des myco-composites par rapport aux échantillons séchés à 70 °C, avec une hausse de 2,70 à 7,29 % à 10 °C. Cette évolution résulte de l'absorption d'eau dans la structure poreuse, facilitant le transfert de chaleur. Toutefois, malgré cette augmentation, les valeurs mesurées (0,05651 à 0,06344 W/m.K) restent inférieures au seuil de 0,065 W/m.K, confirmant de bonnes performances isolantes.

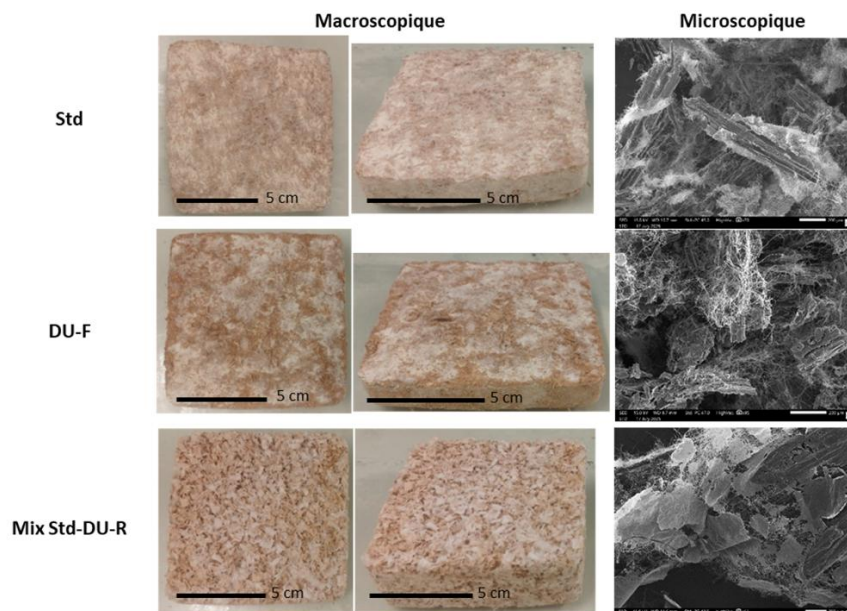


Fig. 2 : Observations des myco-composites a) macroscopiquement et b) microscopiquement (MEB).

La Fig. 3 illustre la conductivité thermique à sec des myco-composites de cette étude en fonction de leur masse volumique, comparée à des données de la littérature et à des isolants commerciaux. Les mesures, effectuées entre 0 °C et 20 °C, donnent des valeurs de 0,0514-0,0579 W/m.K pour des masses volumiques de 59,4-175,4 kg.m⁻³, comparables à celles rapportées par Nussbaumer et al 2023 pour des myco-composites non pressés (0,054–0,057 W/(m.K), pour ~193–200 kg/m³). Les myco-composites à base de DU-R présentent les conductivités thermiques les plus faibles, probablement en raison de leur morphologie homogène et de la compacité de leurs particules, favorisant une meilleure organisation interne et une répartition plus stable des vides d'air. Une caractérisation de la macroporosité serait toutefois nécessaire pour confirmer l'influence de cette structure sur les transferts thermiques.

Conclusion et perspectives

Le projet MYCOBAT met en lumière le potentiel des myco-composites comme isolants biosourcés, produits dans une logique d'économie circulaire et à faible impact environnemental. Les performances thermiques obtenues sont prometteuses et fortement influencées par la granulométrie du substrat, qui agit sur la microstructure et la porosité des myco-composites.

Ces avancées placent les myco-composites comme une alternative sérieuse aux isolants synthétiques. Les perspectives incluent une montée en échelle, l'étude du comportement à long terme en conditions réelles et leur intégration dans des parois à ossature bois conformes aux normes en vigueur.

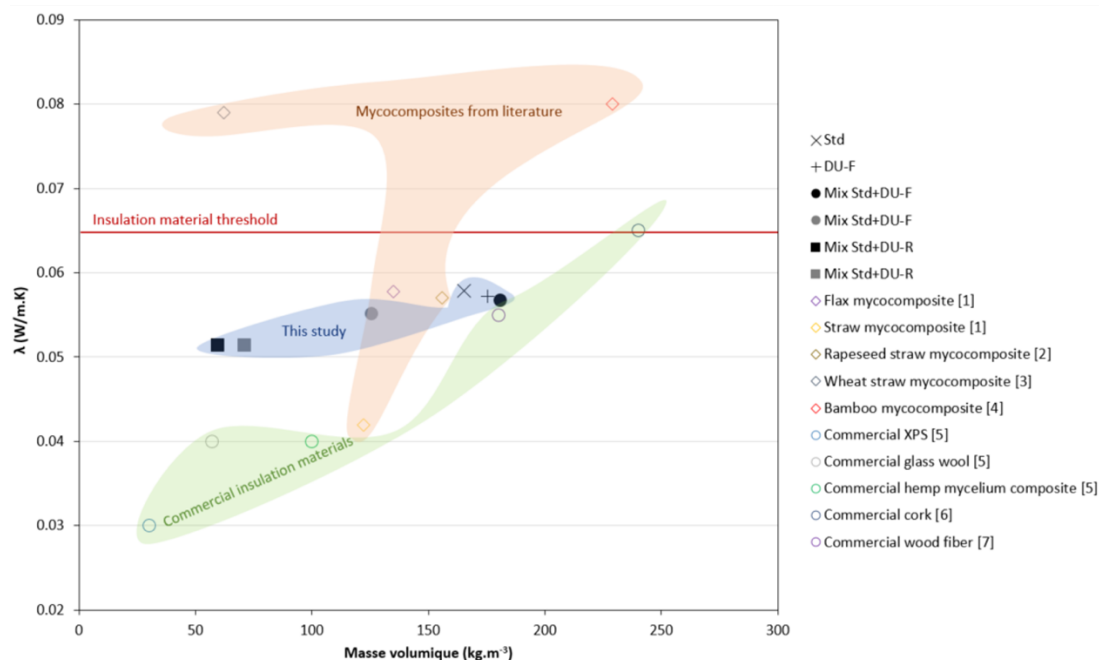


Fig. 3 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique des myco-composites selon la biomasse utilisée ainsi que des myco-composites de la littérature et des isolants commerciaux. Références : (1) Elsacker et al 2019, (2) Tsao, 2020, (3) Xing et al 2018, (4) Carcassi et al 2022, (5) Jones et al 2020, (6) Knapic et al 2016 et (7) Snow et al 2024.

Remerciements

Les auteurs remercient Lorraine Université d'Excellence (LUE) pour la subvention accordée. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet W2W Horizon Europe. W2W est financé par l'Union européenne (accord de subvention n° 101138789). Les points de vue et opinions exprimés sont toutefois ceux des auteurs uniquement et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union européenne ou de HADEA. Ni l'Union européenne ni l'autorité qui octroie la subvention ne peuvent en être tenues responsables.

Références

Appels FVW, Camere S, Montalti M, Karana E, Jansen KMB, Dijksterhuis J, Krijgsheld P, Wösten HAB (2019) Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials Design*,

Carcassi O B, Minotti P, Habert G, Paoletti I, Claude S, Pittau F (2022) Carbon Footprint Assessment of a Novel Bio-Based Composite for Building Insulation. *Sustainability*, 14(3), 1384.

Elsacker E, Vandeloock S, Brancart J, Peeters E, Laet LD (2019) Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLOS ONE*, 14(7), e0213954.

Elsacker E, Vandeloock S, Van Wylick A, Ruytinx J, De Laet L, Peeters E (2020) A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. *Science of The Total Environment*, 725, 138431.

Jones M, Mautner A, Luenco S, Bismarck A, John S (2020) Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials Design*, 187, 108397.

Knapic S, Oliveira V, Machado JS, Pereira H. (2016) Cork as a building material : A review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(6), 775-791.

Nussbaumer M, Van Opdenbosch D, Engelhardt M, Briesen H, Benz JP, Karl, T (2023) Material characterization of pressed and unpressed wood–mycelium composites derived from two *Trametes* species. *Environmental Technology Innovation*, 30, 103063.

Rabbat C, Awad S, Villot A, Rollet D, Andrès Y (2022) Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings : Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111962.

Snow J, Herzog B, O'Brien L, Li L (2024) Characterization of wood fiber insulation for the development of wood fiber-insulated panels (WIPs) for use in building envelope. 6142-6159.

Tsao Y (2020) Characterization of mycelium-based composites as foam-like wall insulation material. *Journal of renewable materials*, 12(11), 1-10.

Xing Y, Brewer M, El-Gharabawy H, Griffith G, Jones P (2018) Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121(2), 022032.