

Conception et caractérisations d'un isolant innovant à base de coproduits d'usinage et de champignon : le myco-composite

FIGEL Laura¹, AYADI Melek¹, AGUILAR Kyle¹, SAKER Safwan², ROSE Christophe³, PERRIN Christelle¹, ANTOINE Marie-Laure¹, LALLEMAND Julien¹, REMOND Romain¹, MOUGEL Eric¹, LE COZ Gaël⁴, HASSAN Alaa⁵, BOUDAUD Hakim⁵, VAHABI Henri⁶, FRECHARD Victor⁷, MEYER Julien⁷, BESANCON Franck⁷, BROSSE Nicolas¹, BESSERER Arnaud¹

¹LERMAB, Université de Lorraine, USC INRAE 1445, Epinal

²CRITT Bois, Epinal

³INRAe, Centre Grand-Est, Champenoux

³LEM3, Université de Lorraine, UMR CNRS 7239, Metz

⁴ERPI, Université de Lorraine, Nancy

⁵LMOPS, Université de Lorraine, CentraleSupélec, Saint-Avold

⁶MAP-Crai, Université de Lorraine, UMR CNRS 3495, Nancy

laurafigel@univ-lorraine.fr

Mots clés : Myco-composite ; coproduits d'usinage ; hêtre ; *Trametes versicolor* ; isolant

Introduction

Dans un contexte où la durabilité et l'innovation sont essentielles, notre recherche se concentre sur le développement d'un isolant novateur : le myco-composite. Ce matériau est conçu à partir de biomasse et de champignons, offrant ainsi une solution écologique et performante pour l'isolation (Alaneme et al 2023). Actuellement, les polymères synthétiques tels que le polyuréthane et le polystyrène ont été largement utilisés comme matériaux d'isolation thermique en raison de leur faible conductivité thermique et de leur capacité thermique massique élevée. Cependant, ces matériaux présentent des inconvénients majeurs en termes de durabilité environnementale. Leur recyclage est coûteux en énergie, leur non-biodégradabilité pose des problèmes de gestion en fin de vie, et leur production ainsi que leur élimination sont associées à des risques environnementaux significatifs (Alemu et al 2022). Ces enjeux persistent et soulignent la nécessité de développer des alternatives plus écologiques et durables dans le domaine de l'isolation thermique. La conception de notre nouvel isolant, le myco-composite, repose sur une approche intégrée qui vise à valoriser les ressources lignocellulosiques tout en exploitant les propriétés uniques des champignons : le mycélium agit alors comme une colle naturelle pour le bois.

Notre étude a porté sur deux types de myco-composites : i) des myco-composites à base de hêtre massif sous forme de particules et ii) des myco-composites à base de coproduits d'usinage de hêtre. *Trametes versicolor*, un champignon présent localement, a été choisi pour cette étude. Des caractérisations de l'échelle macroscopique à microscopique ont permis d'évaluer les performances thermiques et mécaniques de ces myco-composites et de les comparer.

Notre étude vise à contribuer à l'avancement des connaissances sur les matériaux biosourcés et ouvre la voie à des applications innovantes dans le domaine de l'isolation. En alliant écologie et efficacité, le myco-composite représente une réponse prometteuse aux défis contemporains liés à la construction durable et à la gestion des ressources.

Matériels et méthodes

Matériels biologiques

Le hêtre commun (*Fagus sylvatica*) a été récolté dans le massif des Vosges (France). Le bois a été préalablement débité en éléments de petite taille avant d'être broyé en particules à l'aide d'un broyeur, équipé de tamis de 8 mm (Cross beater mill SK100, Retsch, Allemagne). Les coproduits d'usinage ont été obtenus à l'aide d'une fraise hélicoïdale de 25 mm de diamètre sur du hêtre massif.

Préparation du milieu et culture fongique

Tous les milieux ont été stérilisés à 121°C pendant 20 minutes avant inoculation (autoclave Vapour Line 135-M, VWR, Allemagne). Pour obtenir un tapis fongique, une culture initiale de *T. versicolor* CTB 863 A a été cultivée sur milieu malt-agar contenant 20 g.L⁻¹ d'extrait de malt pendant 7 jours. Cinq plugs (diamètre 8 mm) provenant des boîtes de Petri de *T. versicolor* ont été inoculés dans des erlenmeyers bafflés de 250 mL contenant 50 mL de milieu malt (20 g.L⁻¹). Les erlenmeyers inoculés ont été placés dans un incubateur agitateur (Innova 44, New Brunswick Scientific, Allemagne) pendant 2 jours à 28°C et 100 rpm. Après 2 jours, la culture a été utilisée pour inoculer un bioréacteur stérile de 7 L rempli de milieu malt à 20 g.L⁻¹ pour un volume final de 5 L (Global Process Concept, PRO-LAB, France). Les conditions de culture ont été maintenues à 28°C, 80% O₂, 250 rpm et pH 5. Des sondes ont été utilisées pour surveiller les paramètres de croissance (pH, température, potentiel redox, oxygène et densité optique des pellets). La culture a été récupérée après 72h de croissance. Le mélange de milieu et de champignon a été séparé par centrifugation à 4200 rpm pendant 10 min à température ambiante (Multifuge X4R Pro, Thermo Scientific, USA). Le champignon a été utilisé pour produire la nurserie myco-composite.

Production du myco-composite

Le substrat était constitué soit de particules de hêtre natives, soit de coproduits d'usinage de hêtre. Les deux types de particules ont été stérilisés avec de l'eau à 121°C pendant 20 min, atteignant une humidité à saturation des fibres de 60% pour le bois natif et 70% pour les coproduits. Un rapport poids/volume de 1: 2 de champignon a été mélangé au substrat dans une boîte avec filtre (Greiner bio-one, France) pour créer une culture appelée nurserie. Celle-ci a été incubée à 28°C et 60% d'humidité relative pendant 14 jours. Les myco-composites ont ensuite été produits en mélangeant ¼ de nurserie avec ¾ de biomasse préalablement préparée et stérilisée aux mêmes taux d'humidité que précédemment. Ces myco-composites ont été laissés en incubation pendant 1 mois à 28°C et 65% d'humidité relative, puis démoulés et séchés dans une étuve à 65°C pendant une nuit. L'ensemble du processus de production est illustré dans la Fig. 1.

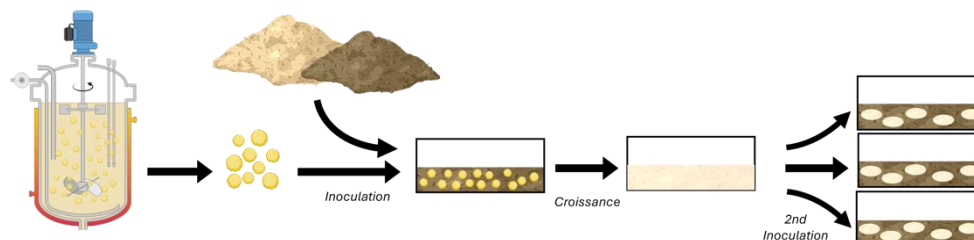


Fig. 1 : Schéma de production de myco-composites.

Caractérisations

Caractérisations morphologiques macroscopiques

Tous les échantillons ont été analysés par des inspections visuels. La masse volumique a été déterminée à partir de la masse après séchage et du volume de l'échantillon. Les mesures de masse ont été effectuées à l'aide d'une balance de précision, tandis que le volume a été déterminé par des mesures dimensionnelles. Chaque mesure a été répétée 10 fois pour assurer la reproductibilité des résultats.

Caractérisations morphologiques microscopiques

Le microscope électronique à balayage (MEB) Jeol IT200 a été utilisé pour analyser les échantillons à l'échelle microscopique. Les échantillons ont été métallisés avec un alliage or/palladium d'une épaisseur de 4,8 Å à l'aide d'un métalliseur ACE600 (LEICA, Allemagne). Les observations ont été réalisées en mode haut vide avec un détecteur d'électrons secondaires (SE). La distance de travail était de 10 mm. La tension d'accélération et le courant de sonde ont été fixés respectivement à 10 kV et 60 %.

Caractérisations thermiques

La conductivité thermique des échantillons de myco-composite a été évaluée avec un appareil à fluxmètre, conformément à la norme NF EN 12667. Les échantillons ont été préparés sous forme de panneaux carrés de 150 mm de côté, avec une épaisseur de 30 mm. Avant les mesures, les échantillons ont été séchés pendant 72 heures à 70 °C jusqu'à masse constante puis conservés dans un dessiccateur jusqu'à l'analyse. La surface des échantillons a été moulée directement dans une forme appropriée. L'appareil à fluxmètre est un dispositif qui mesure la densité du flux thermique à travers une éprouvette par une différence de température générée par cette densité de flux thermique traversant l'éprouvette et le fluxmètre lui-même. L'échantillon étant placé dans l'enceinte, un gradient de température est établi entre les plaques chaude et froide maintenues respectivement à 20°C et 0°C, établissant ainsi un flux thermique de densité unidirectionnelle, constante et uniforme. Un moule en polyuréthane de dimensions 300 mm x 300 mm a été utilisé pour positionner précisément l'échantillon de 150 mm x 150 mm (Fig. 2). Avant chaque mesure, le système de refroidissement a été activé et stabilisé. La durée typique d'une mesure était comprise entre 1,5 et 2 heures, permettant d'atteindre l'équilibre thermique et d'obtenir des valeurs de conductivité thermique fiables.

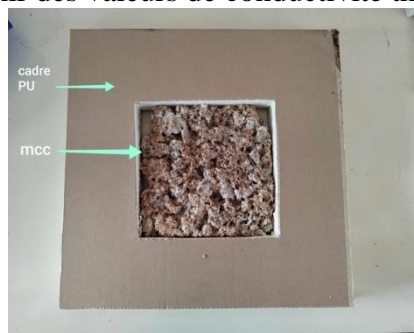


Fig. 2 : Montage utilisé pour les caractérisations thermiques

Caractérisations mécaniques

Les échantillons de myco-composites ont été découpés en éprouvettes rectangulaires de dimensions 10 cm x 5 cm à l'aide d'une micro-scie à ruban Proxxon MBS 240/E. Les propriétés mécaniques des échantillons ont été évaluées par des essais de compression uniaxiale non confinée, à l'aide d'une machine d'essai universelle Zwick Roell Z050.

Résultats et discussion

Les échantillons de myco-composites ont été soumis à une inspection visuelle approfondie (Fig. 3). L'observation a révélé une colonisation non uniforme du mycélium, tant pour les substrats

de hêtre brut que pour les coproduits d'usinage. La masse volumique des myco-composites varie selon le substrat utilisé : $177 \pm 13 \text{ kg/m}^3$ pour ceux à base de coproduits et $200 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ pour ceux à base de hêtre brut. La surface des myco-composites à base de hêtre bruts semble plus colonisée que celle à base de coproduits.



Fig. 3 : Observation visuelle des myco-composites fabriqués à partir de a) particules de hêtre et b) de coproduits d'usinage hêtre.

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a mis en évidence des différences morphologiques significatives au niveau des hyphes fongiques (Fig. 4). Dans les myco-composites à base de coproduits d'usinage, les hyphes apparaissent plus denses et plus épais (diamètre moyen de $1,21 \pm 0,24$, $n=10$, Fig. 4b) par rapport à ceux observés dans les myco-composites à base de hêtre brut (diamètre moyen de $0,93 \pm 0,12 \mu\text{m}$, $n=10$, Fig. 4a). Cette différence structurale pourrait influencer les propriétés mécaniques et thermiques du matériau final.

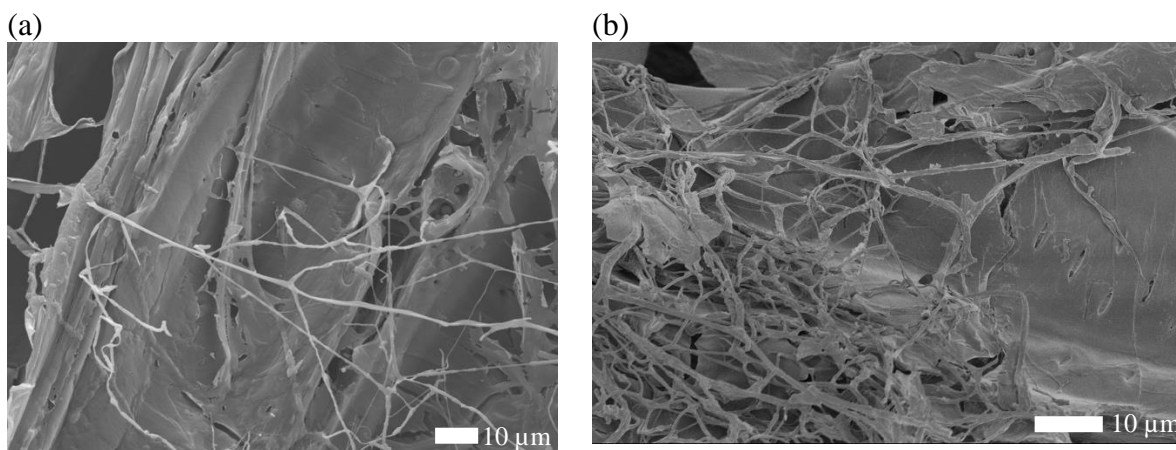


Fig. 4 : Observation au MEB des myco-composites:
(a) à base de particules de hêtre ; (b) à base de coproduits d'usinage.

Des caractérisations thermiques ont été effectuées pour évaluer le potentiel d'utilisation de ces myco-composites comme matériaux isolants. Les essais ont révélé une conductivité thermique (λ) de $0,06451 \text{ W/m.K}$ pour les myco-composites à base de hêtre et de $0,05673 \text{ W/m.K}$ pour ceux à base de coproduits d'usinage. Ces valeurs sont comparables à celles rapportées dans la littérature pour d'autres matériaux biosourcés. Par exemple, Jones et al (2020) ont rapporté des valeurs de conductivité thermique allant de $0,04$ à $0,08 \text{ W/m.K}$. La différence notable entre nos deux myco-composites peut s'expliquer par la porosité plus importante des myco-composites à base de coproduits, dont la granulométrie est inférieure à 6 mm , contribuant ainsi à réduire la composante de conduction thermique du transfert thermique résultant en une meilleure isolation thermique de ces derniers.

Les propriétés mécaniques ont été évaluées par des essais de compression. La force de compression à 10% est presque deux fois plus importante pour les myco-composites à base de coproduits d'usinage (environ 0,090 MPa) que pour ceux formés à partir de particules de hêtre (environ 0,050 MPa) (Fig. 5). Elsacker et al (2019) ont observé des résistances à la compression allant de 0,04 à 0,35 MPa pour différents substrats lignocellulosiques. Nos résultats se situent dans cette gamme, avec une performance supérieure pour les myco-composites à base de coproduits d'usinage. Ces résultats suggèrent que la structure et la qualité de l'interaction entre les hyphes fongiques et le substrat sont plus déterminantes pour la résistance à la compression que la simple quantité de mycélium.

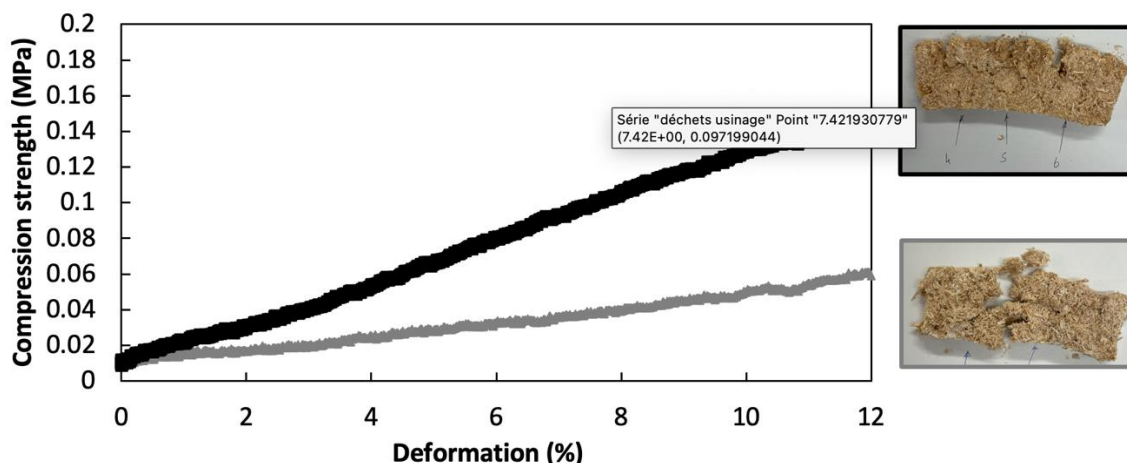


Fig. 5 : Force de compression en fonction de la déformation pour les myco-composites à base de particules de hêtre (gris) et de coproduits d'usinage (noir). Insert : photo des myco-composites après les essais de compression.

Les performances de nos myco-composites ont été comparées à deux isolants commerciaux : un panneau isolant biosourcé à base de fibre de bois et un panneau en polyuréthane (PU) (Tab. 1). Bien que les myco-composites présentent des capacités isolantes inférieures à ces matériaux conventionnels, ceux à base de coproduits d'usinage montrent des caractéristiques prometteuses, notamment en raison de la granulométrie fine des particules qui favorise une meilleure isolation thermique.

Tab. 1 : Récapitulatif des principales caractéristiques des myco-composites fabriqués dans cette étude, de l'isolant en fibre de bois et en polyuréthane.

	Masse volumique (kg/m ³)	λ (W/m.K)	Résistance thermique (m ² .K/W)*	Force de compression n (%)**	Réf
Myco-composite hêtre	200 ± 10	0.06451	(30)0,46	CS(10\Y)50 ± 10	Cette étude
Myco-composite coproduits hêtre	177 ± 13	0.05673	(30)0,53	CS(10\Y)92 ± 33	Cette étude
Fibre de bois	55 ± 5	0,036 à 0,046	(50) 1,35	NPD	Pavatex® (Soprema)
Polyuréthane	33 ± 3	0,022 à 0,025	(30) 1,30	CS(10\Y)17 5	Soprema

NPD signifie non défini.

*(X) représente l'épaisseur du mycocomposite en mm.

** CS(10\Y)X ± X : CS signifie *compression strength*, 10\Y signifie à 10 % de déformation.

L'utilisation de coproduits d'usinage dans nos myco-composites s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, en accord avec les tendances actuelles de la recherche. Comme le soulignent Attias et al (2020), l'utilisation de déchets lignocellulosiques comme substrat pour les myco-matériaux offre une solution durable pour la valorisation des résidus industriels.

Conclusion

Les premiers essais révèlent une différence significative de comportement en fonction du type de biomasse utilisée. En particulier, les myco-composites à base de coproduits d'usinage semblent être plus adaptés à une application d'isolation, ce qui souligne l'importance de la granulométrie sur les propriétés isolantes du matériau final.

Il serait intéressant d'explorer la possibilité de varier la souche de champignon utilisée ou de réaliser des mélanges de biomasses, car cela pourrait permettre d'obtenir un isolant dont les propriétés se rapprochent de celles des fibres de bois.

En conclusion, nos myco-composites, en particulier ceux à base de coproduits d'usinage, présentent des propriétés comparables ou même supérieures à celles rapportées dans la littérature pour des matériaux similaires. Leur potentiel en tant qu'alternative durable aux isolants conventionnels est prometteur, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour optimiser leurs performances et explorer leur applicabilité à grande échelle. Ces études futures pourraient inclure l'optimisation des formulations, l'évaluation de la durabilité à long terme dans diverses conditions environnementales et l'analyse du cycle de vie complet pour quantifier les bénéfices environnementaux.

Remerciements

Ce projet est financé par Lorraine Université d'Excellence (LUE) Mycobat.

Références

Alemu D, Tafesse M, Mondal AK (2022) Mycelium-based composite: The future sustainable biomaterial. *International journal of biomaterials*, 2022(1), 8401528.

Attias N, Danai O, Abitbol T, Tarazi E, Ezov N, Pereman I, Grobman YJ (2020) Mycelium biocomposites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119037.

Elsacker E, Vandelook S, Brancart J, Peeters E, De Laet L (2019) Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS One*, 14(7), e0213954.

Girometta C, Picco AM, Baiguera RM, Dondi D, Babbini S, Cartabia M, ... Savino E (2019) Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: a review. *Sustainability*, 11(1), 281.

Haneef M, Ceseracciu L, Canale C, Bayer IS, Heredia-Guerrero JA, Athanassiou A (2017) Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties. *Scientific reports*, 7(1), 41292.

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.