

Les mycocomposites au service de l'allègement de structure béton Mycodalle

LANGLOIS Paul¹, ANTOINE Marie-Laure^{1,2}, PERRIN Christelle¹, LALLEMAND Julien¹, MECHLING Jean-Michel³, BESSERER Arnaud¹, BROSSE Nicolas¹

¹Université de Lorraine, LERMAB, Epinal, 88000, France

²ENSTIB, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Epinal, France

³IJL, Nancy, 54000 France

paul.langlois@univ-lorraine.fr

Mots clés : Mycocomposite ; Béton ; Noyau ; Bois de recyclage de classe 1 (BR1)

Contexte

Le changement climatique est une problématique mondiale qui est en partie due à de nombreux secteurs qui ont une activité à forte émission en carbone. Le secteur du bâtiment est le plus important (Calvin et al 2023) avec notamment la production de liant pour le ciment. Pour diminuer fortement l'émission de CO₂ dans ce secteur, l'utilisation du ciment et donc du béton doit être revue à la baisse. Pour cela, l'Europe incite fortement à l'utilisation de matériaux biosourcés qui permettent de diminuer l'utilisation du ciment et de piéger le carbone contenu dans les matériaux biosourcés au sein des bâtiments. C'est dans ce sens que l'entreprise Modulatio apporte une solution innovante. L'idée est de produire les dalles béton avec un noyau en polystyrène ayant pour avantage de diminuer grandement la quantité de béton utilisé et ainsi participer à l'allègement de la structure. L'inconvénient, ici, est que le béton est remplacé par un matériau d'origine pétrolière. Les mycocomposites constituent des matériaux innovants et durables avec de nombreuses applications potentielles. Ils sont constitués d'une matrice lignocellulosique qui sert de substrat à la croissance d'un champignon qui va jouer le rôle de liant. La substitution du polystyrène expansé par un mycocomposite réalisé à partir de bois recyclé ou de co-produits d'usinage apparaît comme une solution pour diminuer l'empreinte carbone des bâtiments dans une logique de bio économie circulaire.

Objectifs

Le but de ce projet de recherche en collaboration avec l'entreprise Modulatio est de proposer une solution de substitution au polystyrène expansé actuellement utilisé dans la production de dalles béton allégées en utilisant un composite bois/champignon (mycocomposite). Le projet comporte donc un volet fondamental qui consistera notamment à étudier la croissance et les réponses morphologiques et physiologiques du champignon à différentes biomasses bois afin d'optimiser les propriétés du matériau final à son usage. On cherchera notamment à produire les mycocomposites avec des bois de recyclage de classe 1 (BR1), ressource abondante qui trouve difficilement une voie de réemploi. Son réemploi se fera par un prétraitement à l'explosion à la vapeur afin d'éliminer la colle présente dans les particules et de stimuler la croissance du mycélium (Aguilar et al 2024; Troilo et al 2023).

Le volet appliqué sera réalisé en partenariat avec l'entreprise Modulatio et ses partenaires dans la construction pour évaluer la faisabilité des produits proposés sur chantier. La montée en échelle de la taille des mycocomposites est donc fortement liée à la capacité à maîtriser la croissance du champignon dans le volume sur un substrat variable.

Matériels et méthodes

Production des mycocomposites

Les mycocomposites seront produits en suivant la méthode utilisée dans le cadre du projet Profex (Aguilar et al 2024, Fig. 1)

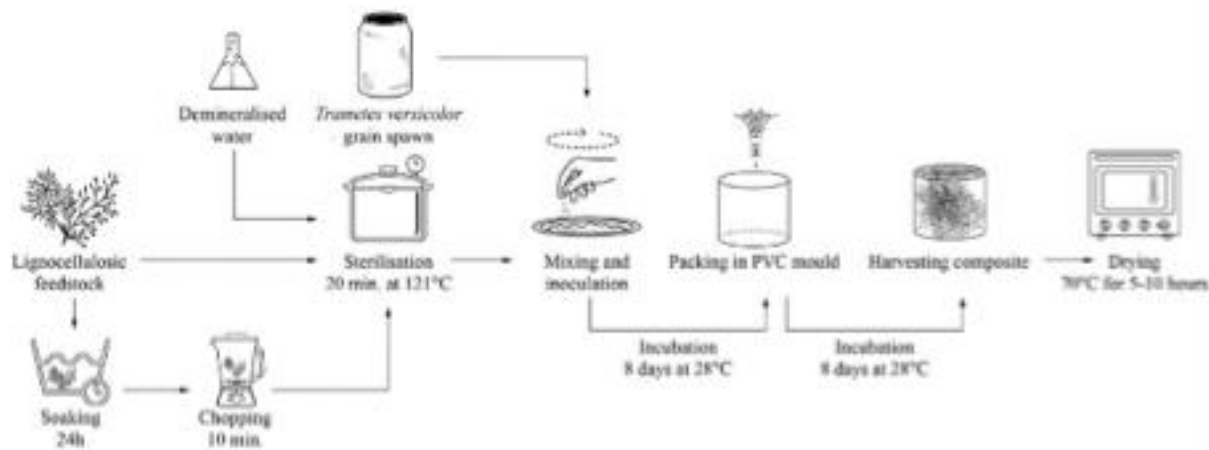


Fig 2 Procédé de fabrication de mycocomposites (Elsacker et al 2019)

Les deux principaux substrats utilisés sont du hêtre natif et du bois BR1. Le hêtre sera utilisé pour produire les mycocomposites qui serviront à l'étude de mycocomposite de grande taille. On sait que la souche de *Trametes versicolor* disponible dans l'équipe fonctionne très bien sur le hêtre et il est important lors de cette étude d'utiliser un substrat de développement qu'on maîtrise et que l'on maîtrise. Cela permettra de préparer et d'étudier les problématiques liées à la production d'un mycocomposite de grande taille avant d'être opérationnel pour des productions avec le BR1. La croissance sur BR1 reste une partie de l'étude du projet de recherche, il sera donc utilisé pour la production des grands éléments une fois la croissance de *Trametes versicolor* optimisée sur ce dernier.

Le BR1 est un substrat pollué par les colles, il est important d'étudier l'élimination de cette colle.

Dépollution du bois

L'élimination de la résine urée-formol présente dans les panneaux de particules a été réalisé par un traitement à l'explosion à la vapeur (EV) sous différentes conditions de température et de pression sur la base des travaux de Troilo et al 2023

L'analyse des particules traitées par EV se fera par coloration safranine et par observation au microscope à fluorescence. Ce colorant métachromatique émet une fluorescence verte en présence de résine UF et une fluorescence rouge liée à son interaction avec la lignine du bois (Roth et al 2015, Troilo et al 2023)

Résultats et Discussion

Premiers éléments dalles hybride

A partir des optimisations de développements en laboratoire (développement de mycocomposite en tubes de 50 mL), des premiers éléments de prototypes de grandes tailles ont été produits représentant une bielle de la dalle hybride en utilisant des particules de hêtre comme substrat modèle. L'objectif ici est d'investiguer les différents paramètres impactant la croissance et d'obtenir des prototypes représentatifs des potentiels défauts qui sont liés à la forme et à la taille des matériaux produits.

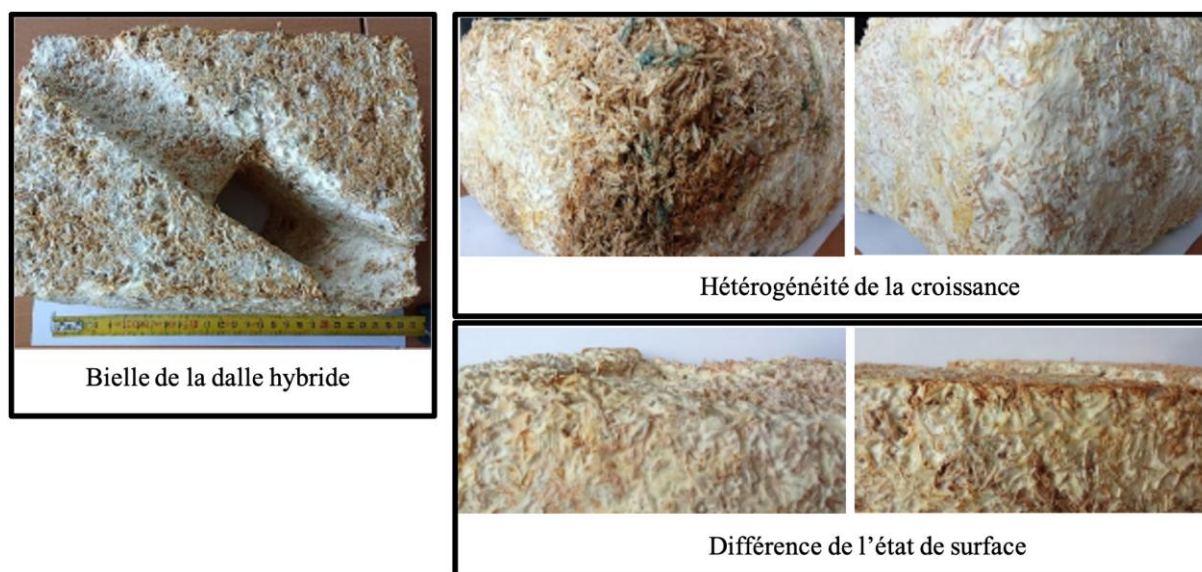


Fig. 2 Mycocomposite de grande taille reprenant une partie de la dalle hybride

La croissance a été effectuée sans contrôle du flux d'oxygène. Cependant le développement du champignon s'est produit dans tout le volume et la cohésion du composite était satisfaisante. Les observations de surface montrent toutefois que la croissance au sein du mycocomposite n'est pas homogène, on observe une différence de densité du mycélium dans différentes parties d'un même élément. Cela s'explique probablement par l'accumulation d'eau sur la paroi du moule en lien avec l'activité métabolique du champignon. L'état de surface du mycocomposite n'est pas homogène ce qui est probablement dû aux variations dimensionnelles liées au séchage. Il est important de maîtriser la forme que prend le mycocomposite car les caractéristiques mécaniques de la dalle hybride sont régies par la forme que va prendre le béton et donc par la forme du mycocomposite qui est utilisé comme coffrage pour le béton. Dans une démarche de bioéconomie circulaire, des tests d'élimination de la résine UF, connue pour être un puissant inhibiteur du développement fongique (Aysal Keskin and Şahin Kol 2022), ont été réalisés. Les matériaux obtenus ont été caractérisés par microscopie à fluorescence.

Dépollution du bois

Les observations de la Fig. 3 montrent que l'efficacité d'élimination de la résine UF des particules présentes dans les fragments de panneaux qui constituent le bois BR1 par EV nécessite des conditions de réaction spécifiques.

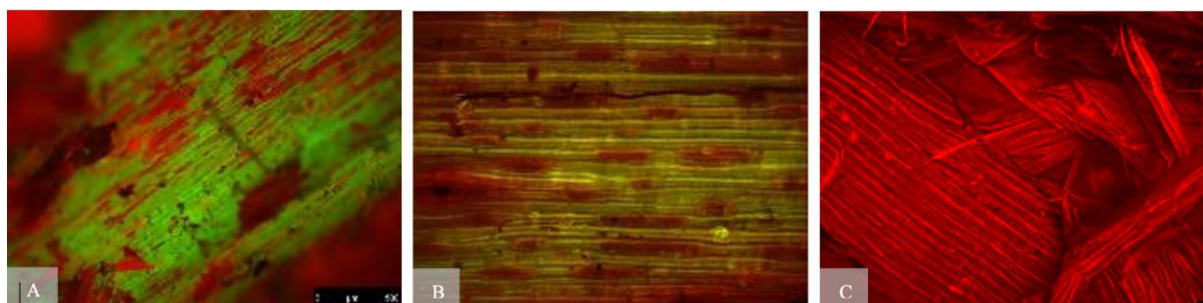


Fig.3 : Mise en évidence de la présence de colle dans des particules de bois BR1 (bois de recyclage classe 1) par coloration safranine et observation au microscope à fluorescence en fonction de la sévérité de traitement par explosion à la vapeur ; **A** : Particules non traitées ; **B** : Particules traitées par explosion à la vapeur à 8.5 bars ; **C** : Particules traitées par explosion à la vapeur à 12 bars

En effet une élimination optimale nécessite un traitement à 12 bars, la colle étant toujours présente en surface des particules après un traitement à 8.5 bars. Par ailleurs le défibrage des particules est plus important après un traitement effectué à 12 bars.

Croissance sur BR1

Afin d'évaluer les effets de la présence de résidus de colle et du défibrage sur la croissance de *T. versicolor*, les particules de bois BR1 traitées à 12 et 16 bars ont été utilisées comme substrat de croissance. On peut observer une différence de croissance significative sur le substrat traité à 12 bars (Fig. 4).

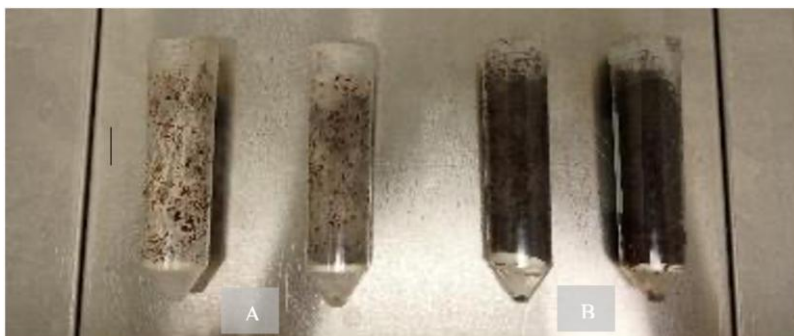


Fig.4 Mycocomposite miniature à partir de BR1 : **A** : explosé à la vapeur à 12 bars ;
B : explosé à la vapeur à 16 bars

On peut observer grâce aux mycocomposites miniatures, que les conditions de traitement de la biomasse impactent fortement la croissance du mycélium. En effet, on observe un développement du mycélium sur un substrat traité à 12 bars alors qu'à 16 bars, la croissance est inhibée.

Conclusion et perspective

La croissance du mycélium montre une forte dépendance au substrat qui se traduit ici par des hétérogénéités de croissance. Les croissances observées sont différentes entre le bois BR1 et le hêtre. Au sein d'un même matériau, des sous-domaines de croissance ont été observés probablement en lien avec des variations locales d'humidité. Le contrôle de l'homogénéité de l'humidité et de l'oxygénation lors de la croissance en moule ainsi que la virulence du champignon sont donc des paramètres déterminants. La géométrie du mycocomposite produit, et la croissance sur le BR1 une fois la colle éliminée, constituent également des facteurs essentiels.

De nombreuses pistes de recherche sont en cours comme la mise en place d'une méthode d'analyse de la viabilité du champignon qui permettrait d'éclaircir les raisons de l'obtention de certains résultats. Pour cela, l'analyse par zymographie (Bilyera and Kuzyakov 2024) ou par la mesure du taux de protéines membranaires sont en cours de développement.

L'utilisation d'un tomographe à rayon X est aussi en cours de développement pour réussir à dégager la porosité de ce qu'on produit ainsi que pouvoir dégager un taux de colonisation du champignon. La difficulté est de réussir à différencier le vide qui a une densité très proche de celle du champignon.

L'objectif à terme est de pousser au maximum la compréhension de la croissance du champignon dans le substrat pour pouvoir produire de façon standardisée un mycocomposite à plus grande échelle qui est celle de la dalle hybride complète.

Référence

Aguilar K, Figel L, Saker S, Soufflet L, Brosse N, Besserer A (2024) Steam Explosion: A Booster for Fungal Growth in a Myco-composite. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 12, 11650–11659. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c03099>

Aysal Keskin S., Şahin Kol H (2022) Effects of manufacturing conditions on the properties of boric acid/melamine-urea-formaldehyde microcapsules prepared by in situ polymerization: Its inhibition behavior on wood destroying fungi. *BioRes* 17, 6789–6803. <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6789-6803>

Bilyera N, Kuzyakov Y (2024) Soil zymography: A decade of rapid development in microbial hotspot imaging. *Soil Biology and Biochemistry* 189 109264. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109264>

Calvin K, Dasgupta D, Krinner G, Mukherji A, Thorne P.W, Trisos C, Romero J, Aldunce P, Barrett K, Blanco G, Cheung W.W.L, Connors S, Denton F, Diongue-Niang A, Dodman D, Garschagen M, Geden O, Hayward B, Jones C, Jotzo F, Krug T, Lasco R, Lee Y.-Y, Masson-Delmotte V, Meinshausen M, Mintenbeck K, Mokssit A, Otto F.E.L, Pathak M, Pirani A, Poloczanska E, Pörtner H.-O, Revi A, Roberts D.C, Roy J, Ruane A.C, Skea J, Shukla P.R, Slade R, Slangen A, Sokona Y, Sörensson A.A, Tignor M, Van Vuuren D, Wei Y.-M, Winkler H, Zhai P, Zommers Z, Hourcade J.-C, Johnson F.X, Pachauri S, Simpson N.P, Singh C, Thomas A, Totin E, Arias P, Bustamante M, Elgizouli I, Flato G, Howden M, Méndez-Vallejo C, Pereira J.J, Pichs-Madruga R, Rose S.K, Saheb Y, Sánchez Rodríguez R, Ürge-Vorsatz D, Xiao C, Yassaa N, Alegría A, Armour K, Bednar-Fiedl B, Blok K, Cissé G, Dentener F, Eriksen S, Fischer E, Garner G, Guivarch C, Haasnoot M, Hansen G, Hauser M, Hawkins E, Hermans T, Kopp R, Leprince-Ringuet N, Lewis J, Ley D, Ludden C, Niamir L, Nicholls Z, Some S, Szopa S, Trewin B, Van Der Wijst K.-I, Winter G, Witting M, Birt A, Ha M, Romero J, Kim J, Haites E.F, Jung Y, Stavins R, Birt A, Ha M, Orendain D.J.A, Ignon L, Park S, Park Y, Reisinger A, Cammaramo D, Fischlin A, Fuglestvedt J.S, Hansen G, Ludden C, Masson-Delmotte V, Matthews J.B.R, Mintenbeck K, Pirani A, Poloczanska E, Leprince-Ringuet N, Péan C (2023) IPCC 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Elsacker E, Vandeloock 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, e0213954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>

Roth A, Li H, Anorma C, Chan J (2015) A Reaction-Based Fluorescent Probe for Imaging of Formaldehyde in Living Cells. *J. Am. Chem. Soc.* 137, 10890–10893. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b05339>

Troilo S, Besserer A, Rose C, Saker S, Soufflet L, Brosse N (2023) Urea-Formaldehyde Resin Removal in Medium-Density Fiberboards by Steam Explosion: Developing Nondestructive Analytical Tools. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 11, 3603–3610. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05686>