



Le projet ORHI (EFA142/16) est cofinancé à hauteur de 65% par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER), dans le cadre du Programme Interreg V-A Espagne-France-Andorre (POCTEFA 2014-2020).

**Étude de nouveaux matériaux à haute valeur ajoutée
issus de la biomasse pour une application dans le
développement industriel.**

BiOcore

Novembre 2020

Index

1. Introduction
 - 1.1 La fin de l'économie linéaire
 - 1.2 Vers une économie circulaire
 - 1.3 Alternatives "vertes"
 - 1.3.1 Matériaux organiques : bois densifié
 - 1.3.2 Biocomposites et matériaux biosourcés : matériau mycélium
2. Bois densifié
 - 2.1 Transformation du bois naturel en un matériau structurel à haute performance
 - 2.2 Matériaux cellulosiques délignifiés et densifiés présentant d'excellentes propriétés de traction pour l'ingénierie durable
 - 2.3 Composites de bois délignifié infiltrés par des polymères qui dépassent la règle de mélange
 - 2.4 Fabrication et conception de composites à base de bois à haute performance
3. Le matériau du mycélium
 - 3.1 Formation du biocomposite
 - 3.2 Le processus de culture du matériau mycélium
 - 3.3 Analyse des matériaux et des propriétés du mycélium
 - 3.3.1 Matériau mycélien pour l'isolation thermique
 - 3.3.2 Le matériau mycélium comme isolation sonore
 - 3.3.3 Le matériau mycélium comme panneau sandwich
 - 3.3.4 Le matériau mycélium en tant que structure
 - 3.4 Résumé des propriétés matérielles du mycélium
 - 3.5 Conclusions
 - 3.6 Autres applications possibles : le matériau mycélium comme agent d'allègement dans les planchers unidirectionnels et bidirectionnels.
 - 3.6.1 Le polystyrène expansé (EPS)
 - 3.6.1.1 Introduction
 - 3.6.1.2 Avantages et inconvénients de l'utilisation du noyau creux en PSE
 - 3.6.1.3 Normes et caractéristiques des briques creuses en PSE
 - 3.6.2 La voûte du matériau mycélium
 - 3.6.2.1 Introduction
 - 3.6.2.2 Caractéristiques du matériau mycélium
 - 3.6.3 Avantages et inconvénients du mycélium par rapport aux voûtes en EPS
 - 3.6.4 Conclusions
4. Technologies de fabrication additive pour les produits polymères dérivés de l'étude.

5. Bibliographie

1. introduction

1.1. la fin de l'économie linéaire

L'un des défis de la société actuelle est la transformation de l'économie actuelle en une économie durable. D'une part, notre économie est basée sur les dérivés du pétrole, une économie linéaire qui utilise des flux qui conduisent à l'épuisement des ressources fossiles. D'autre part, il est bien connu que tous ces dérivés du pétrole génèrent du dioxyde de carbone tout au long de leur chaîne de valeur (Cerimi, Akkaya, Pohl, Schmidt, & Neubauer, 2019). Pour cette transformation, l'utilisation de ces sources non renouvelables doit être réduite à la fois pour la production de matériaux et de produits de consommation (Appels et al., 2019).

Au cours des siècles passés, l'industrie s'est développée en dépendant principalement des ressources issues de l'excavation et de l'extraction. Par exemple, aujourd'hui, le béton armé est le matériau de construction le plus produit dans le monde. L'excavation et l'extraction, contrairement à la culture, présentent un inconvénient de taille : les matériaux excavés et extraits ne sont pas régénérés. Les granulats utilisés pour les mélanges de béton, par exemple le sable et le gravier, sont transformés et perdus à jamais sans possibilité de les retrouver dans leur état d'origine. D'autres minéraux et métaux sont également concernés par ces normes centrées sur l'excavation et les pratiques industrielles actuelles. Le plomb, le zinc, l'étain, voire le cuivre et le fer, sont menacés d'épuisement si la mentalité actuelle de "prendre, fabriquer et jeter" se poursuit. Les entreprises récoltent et exploitent les matériaux, les utilisent pour fabriquer un produit, vendent ce produit au consommateur qui le jette finalement lorsqu'il ne sert plus à rien. Et ce processus se répète et, à chaque fois, à un rythme toujours plus élevé (Heiselet al., 2017) (Macarthur, 2020).

En raison de cet épuisement des ressources et de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, il est urgent de remplacer les matériaux issus de l'excavation et de l'extraction, matériaux dont la production implique des coûts énergétiques et environnementaux élevés, par des matériaux renouvelables (M. Frey, Schneider, Masania, Keplinger, & Burgert, 2019).

De nombreuses entreprises commencent à se rendre compte que ce système linéaire accroît leur exposition aux risques, notamment la hausse des prix des ressources et les ruptures d'approvisionnement. Dans ce contexte, une alternative consiste en un modèle industriel qui sépare les revenus de l'apport matériel : le concept d'économie circulaire (Macarthur, 2020).

Vers une économie circulaire

L'économie circulaire est un système industriel qui est restaurateur ou régénérateur par intention et par conception. Elle remplace le concept de "fin de vie" par celui de

renouvellement, s'oriente vers l'utilisation d'énergies renouvelables, l'élimination de l'utilisation de produits chimiques toxiques, qui altèrent sa réutilisabilité, et l'objectif d'élimination des déchets, grâce à une meilleure conception des matériaux, des produits, des systèmes et, avec tout cela, des modèles commerciaux (Macarthur, 2020).

En ce qui concerne l'industrie, l'exigence clé basée sur cette économie circulaire serait que les composants doivent être conçus, fabriqués et construits de manière à pouvoir être désassemblés, séparés et, de manière propre, renvoyés dans leurs cycles biologiques ou techniques respectifs afin de maximiser la récupération et la réutilisation des matériaux après leur cycle de vie. Il s'agira de revoir la conception de composants communs, de développer des systèmes d'assemblage et de jonction nouveaux et innovants, ou de mettre au rebut les liants et les composites non recyclables (Heisel et al., 2017).

1.3. les alternatives "vertes"

En raison de la demande croissante de matériaux et de processus de production "verts", des recherches approfondies ont été menées sur les matériaux organiques et les matériaux dits biocomposites et biosourcés.

1.3.1. matériaux organiques : bois densifié

Le bois peut être un matériau clé pour cette transition vers une société et une économie durables, car il est organique et capte également le CO₂ pendant sa croissance. De nos jours, le bois naturel est facile à obtenir en grandes quantités et à faible coût et combine de bonnes propriétés mécaniques et une conception légère. Cependant, il existe certaines limites pour les matériaux en bois lorsqu'on parle de haute performance structurelle (M. Frey et al., 2019).

Le bois est un produit de la croissance naturelle. Ainsi, la structure et la densité de ses tissus peuvent varier considérablement d'une espèce à l'autre et même au sein d'un même tronc d'arbre. En outre, les adaptations mécaniques au cours de la vie de l'arbre ou la présence d'éléments naturels tels que les nœuds entraînent une grande variabilité. Cela conduit à un manque de confiance dans la fiabilité du bois et son application dans les hautes performances. La densification du bois serait une procédure qui permettrait d'atteindre une plus grande homogénéité du bois en préservant la directionnalité structurelle. Cela est dû au fait que la densité est l'un des principaux facteurs intervenant dans les propriétés mécaniques des matériaux. En comprimant les échantillons de bois, on obtient des niveaux de densité élevés et homogènes, ce qui entraîne une amélioration significative des propriétés mécaniques. La délignification partielle ou totale du bois associée à l'humidité facilite le processus de densification (Marion Frey et al., 2018).

1.3.2. biocomposites et matériaux biosourcés : matériau mycélium

Les biocomposites sont des matériaux dans lesquels un biopolymère ou un polymère bio-dérivé est renforcé par des fibres naturelles. Les matériaux biosourcés sont définis comme des matériaux qui contiennent au moins un composant produit de manière durable et qui sont entièrement biodégradables (Lelivelt, Lindner, Teuffel et Lamers, 2015). Le principal attrait de ces matériaux réside dans la possibilité d'exploiter les déchets et résidus biologiques tels que la sciure, les cosses, les pailles résiduelles, etc. Ces résidus et déchets sont revalorisés au lieu d'être jetés, conformément à l'un des principes de l'économie circulaire (Girometta et al., 2019).

Les composites biosourcés sont constitués d'une matrice renforcée ductile, ce qui leur confère des performances élevées à faible coût et une grande polyvalence pour concevoir des matériaux destinés à des applications spécifiques. De nombreux composites actuels comportent un renforcement naturel, mais la matrice est souvent fabriquée à partir de produits pétrochimiques. L'un des biomatériaux qui pourrait avoir le potentiel de contribuer à cette nouvelle économie en remplaçant les produits dérivés du pétrole est le matériau à base de mycélium : sa matrice est entièrement biologique et est produite à faible coût (Lelivelt et al., 2015).

2. Bois densifié

Cette section présente différentes procédures publiées pour le traitement et la transformation du bois naturel qui permettent d'augmenter les propriétés des pièces mécaniques par des techniques de densification et de délignification.

Transformation du bois naturel en un matériau structural à haute performance (Song et al., 2018) 2.2.

Dans les travaux menés par Song et ses collaborateurs, une méthode est présentée pour transformer le bois naturel en un matériau à haute performance structurale dont la résistance, la dureté et la résistance aux balles sont plus que décuplées, et qui présente une plus grande stabilité dimensionnelle.

Elle est réalisée en deux étapes, éliminant partiellement la lignine et l'hémicellulose du bois naturel par un processus d'ébullition dans un mélange aqueux de NaOH et de Na₂SO₃, suivi d'un pressage à chaud qui conduit à l'effondrement des parois cellulaires et à la densification complète du bois naturel avec un alignement élevé de nanofibres de cellulose.

Ce processus peut être réalisé avec différentes espèces de bois, ce qui permet d'obtenir un matériau bon marché, léger, à haute performance et plus résistant que la plupart des métaux et alliages structurels.

La procédure détaillée est la suivante :

1. Des échantillons de tilleul, de chêne, de peuplier, de cèdre rouge et de pin blanc de dimensions 120x44x44 mm³ sont préparés.

2. Une solution aqueuse d'un mélange de 2,5 M NaOH et 0,4 M Na₂ SO₃ est préparée et portée à ébullition.
3. L'échantillon est immergé dans la solution bouillante pendant 7 h. En ajustant les temps d'ébullition, on obtient des échantillons de bois de différents degrés de délignification.
4. Après la délignification partielle, l'échantillon est rincé plusieurs fois dans de l'eau désionisée bouillante pour éliminer les produits chimiques.
5. Les échantillons sont placés dans une presse à 100°C sous une pression d'environ 5 MPa pendant 1 jour pour obtenir l'échantillon de bois densifié (115,6x46,5x9,5 mm³).

Le traitement chimique de délignification permet une réduction substantielle de la lignine et de l'hémicellulose contenues dans le bois naturel mais seulement une réduction modeste de la teneur en cellulose (Figure 1).

Figure 1 : Le traitement chimique entraîne une élimination substantielle de la lignine (avant la délignification 20,8 % ; après 11,3 %) et de l'hémicellulose (avant 19,5 % ; après 5,2 %) dans le bois naturel, mais seulement une dissolution modeste du contenu en cellulose (avant 44 % ; après 38,7 %).

Avec l'élimination partielle de la lignine et de l'hémicellulose des parois cellulaires, le bois devient plus poreux et moins rigide. Après l'application d'une pression à chaud à 100°C perpendiculairement à la direction de croissance du bois, les parois cellulaires poreuses s'effondrent complètement, ce qui donne un morceau de bois densifié qui réduit son épaisseur d'environ 20% et augmente sa densité de 3 fois (figure 2).

Figure 2 : Comparaison des densités du bois naturel (0,43 g/cm³) et du bois densifié (1,3 g/cm³).

Le bois densifié présente une microstructure unique, les parois cellulaires entièrement effondrées sont étroitement imbriquées le long de la section perpendiculaire et densément emballées dans le sens longitudinal. Dans le bois densifié, les nanofibres de cellulose restent très alignées, comme dans le bois naturel, mais sont beaucoup plus denses.

Les propriétés mécaniques du bois densifié sont non seulement nettement supérieures à celles du bois naturel, mais dépassent également celles d'autres matériaux structurels tels que le plastique, l'acier et les alliages.

Le bois densifié présente une résistance à la traction de 587 MPa, soit 11,5 fois plus que celle du bois naturel non traité, et également beaucoup plus que celle des plastiques typiques, tels que le nylon, le polycarbonate, le polystyrène et l'époxy, et d'autres bois densifiés. Il a été constaté que l'élimination partielle de la lignine permet d'obtenir une densité plus élevée du bois résultant avec une meilleure résistance à la traction et à la rupture (tableau 1, figures 3 et 4).

La forte augmentation de la résistance à la traction du bois densifié ne s'accompagne pas d'une diminution de la ténacité. Le travail de rupture et la rigidité élastique du bois densifié sont plus de dix fois supérieurs à ceux du bois naturel (tableau 1, figure 5a).

Les essais de résilience Charpy du bois densifié donnent une résilience de $11,41 \pm 0,5$ J/cm², 8,3 fois plus élevée que celle du bois naturel ($1,38 \pm 0,3$ J/cm²) (figure 5c). La dureté à la rayure et le module de dureté du bois densifié sont respectivement 30 et 13 fois plus élevés que ceux du bois naturel (figure 5b, d).

La résistance à la flexion du bois densifié est environ 6 et 18 fois supérieure à celle du bois naturel, respectivement le long (figure 6) et perpendiculairement à la direction de croissance (figure 7).

La résistance à la compression du bois densifié est environ 5,5 fois et 33 à 55 fois plus élevée que celle du bois naturel le long et perpendiculairement à la direction de croissance, respectivement (Figures 9, 10 et 11).

On a également constaté que l'élimination partielle de la lignine permet d'obtenir une plus grande résistance à la compression axiale (figure 12). Sans élimination de la lignine, il est difficile de presser à chaud le bois naturel pour obtenir un bois entièrement compacté. Avec une délignification complète, le bois peut être facilement écrasé lors du pressage à chaud, probablement en raison de l'absence de lignine comme colle.

Le bois densifié est stable face aux attaques de l'humidité. Par exemple, soumis à une humidité relative de 95% pendant 128 heures, le bois densifié gonfle en ne produisant qu'une augmentation de 8,4% de l'épaisseur, avec une baisse modeste de la résistance à la traction ($493,1 \pm 20,3$ MPa, toujours 10,6 fois supérieure à celle du bois naturel dans un environnement naturel). En outre, lorsqu'un traitement de surface standard (peinture) est appliqué, le bois densifié est immunisé contre l'humidité (figures 13 et 14).

En ce qui concerne la fracture, le bois densifié est beaucoup plus dur que le bois naturel, l'énergie nécessaire pour fracturer le bois densifié est beaucoup plus élevée que celle nécessaire pour le bois naturel.

Une comparaison entre la surface de rupture en traction du bois naturel et du bois densifié fournit des informations sur les mécanismes de durcissement et de renforcement dans le bois densifié. La rupture par traction du bois naturel est initiée par un glissement relatif entre les travées ouvertes du bois, suivi d'un arrachement et d'une déchirure du bois le long de la surface de rupture, tandis que la rupture par traction du bois densifié résulte d'un glissement relatif entre les parois cellulaires du bois densément emballées, suivi d'un arrachement et d'une fracture des parois cellulaires le long de la surface de rupture.

Les parois cellulaires du bois densément emballées et entrelacées dans le bois densifié à l'échelle microscopique entraînent un degré élevé d'alignement des fibres de cellulose et augmentent donc considérablement la zone interfaciale entre les nanofibres. À l'échelle moléculaire, en raison de la présence de nombreux groupes hydroxyle dans les chaînes moléculaires de la cellulose, le glissement relatif entre les parois des cellules du bois densément emballées implique une quantité énorme d'événements répétés de formation, de rupture et de reformation de liaisons hydrogène à l'échelle moléculaire. Par conséquent, l'énergie totale requise pour fracturer le bois densifié est beaucoup plus importante que celle requise pour fracturer le bois naturel. En d'autres termes, le bois densifié est beaucoup plus résistant que le bois naturel.

La résistance à la traction du bois densifié dans la direction T est présentée (Figure 15). Ces bois densifiés, solides et résistants mais légers, sont prometteurs comme matériaux de blindage et d'absorption d'énergie balistique à faible coût. Des essais balistiques ont été réalisés sur du bois naturel, du bois densifié monocouche et du bois densifié stratifié en cinq couches avec des orientations de fibres alternant de 90° d'une couche à l'autre. L'absorption d'énergie balistique par unité d'épaisseur pour le bois densifié était de 4,3 +/- 0,08 kJ/m, soit sept fois plus que pour le bois naturel (figure 16). L'ouverture de la perforation par le projectile en acier est plus petite que dans le bois naturel et la surface du bois est fortement fissurée, ce qui indique une liaison beaucoup plus forte entre les parois cellulaires du bois fortement compactées. La résistance balistique du bois multicouche densifié est encore plus élevée, l'absorption d'énergie balistique était de 6,0 +/- 0,1 kJ/m, soit dix fois plus que celle du bois naturel.

2.2. matériaux de cellulose délignifiée densifiée présentant d'excellentes propriétés de traction pour l'ingénierie durable (Marion Frey et al., 2018).

Cette étude de Frey et al. présente un matériau obtenu par la combinaison de la délignification et de la densification totales du bois, ce qui donne un matériau à haute performance.

Un processus de délignification avec du peroxyde d'hydrogène et de l'acide acétique a été optimisé pour délignifier les blocs de bois et préserver la directionnalité structurelle hautement bénéfique du bois. Ces blocs ont ensuite été densifiés dans un processus combinant compression et cisaillement latéral pour obtenir un matériau cellulosique très compact avec des fibres enchevêtrées tout en préservant l'orientation unidirectionnelle des fibres.

Les propriétés des matériaux ainsi obtenus ont été analysées, ce qui a permis d'obtenir des propriétés de traction supérieures à celles du bois naturel d'origine.

2.3. les composites de bois délignifié infiltrés par des polymères qui dépassent la règle des mélanges (M. Frey et al., 2019).

La délignification et la densification subséquente du bois donnent lieu à un matériau présentant une résistance élevée à la traction en raison de la préservation de l'alignement des fibres, mais dont les propriétés mécaniques en flexion sont faibles et qui ne peut être utilisé dans des conditions humides en raison de sa propension à absorber l'eau.

Dans ce travail, Frey et ses collaborateurs développent un composite à base de bois qui est d'abord délignifié pour conserver sa structure, puis infiltré avec des polymères et densifié sous vide, ce qui donne un matériau d'une grande rigidité et d'une grande résistance. En raison de la compressibilité des fibres de cellulose délignifiées, il est possible d'obtenir des composites avec une teneur volumique en fibres très élevée (jusqu'à 80 %), ce qui entraîne une rigidité et une résistance à la traction très élevées, qui dépassent de loin la limite supérieure de la règle de mélange en raison du transfert de contraintes amélioré par les interfaces fibre-fibre mécaniquement verrouillées, combiné à la rigidité fournie par la phase matricielle qui facilite encore le transfert de contraintes entre les cellules de bois voisines à travers leurs vides.

La procédure détaillée utilisée par les chercheurs était la suivante :

1. Délignification

- 1.1 échantillons d'épicéa de Norvège de 100x20x10 mm³ et 100x20x5 mm³
- 1.2 Même procédure résumée dans la section précédente (Marion Frey et al., 2018).
- 1.3 Les échantillons sont conservés à 65% d'humidité relative et à 20^e C.

Infiltration

- 2.1 Les échantillons sont séchés dans un four à 65°C pendant la nuit.
- 2.2 Infiltration avec un système de résine époxy RIM235/RIMH238 (Hexion, USA) par injection de résine sous vide (VARI) pendant 90 min.

3. Densification

- 3.1 La densification est effectuée dans un moule de transfert de résine par compression (CRTM) à trois cavités pour densifier 3 échantillons en même temps sous une pression isostatique et pour obtenir une gamme de teneur volumique en fibres CVF de 25% à 80% en faisant varier l'épaisseur finale de l'échantillon.
- 3.2 Le moule est recouvert d'un revêtement antiadhésif (Loctite770-NC Frekote, Henkel, Allemagne). Les bords sont graissés avec de la graisse au lithium Motorex.
- 3.3 Une feuille de téflon de 0,05 mm d'épaisseur est placée entre les échantillons.
- 3.4 Les échantillons sont placés dans le moule et une quantité supplémentaire d'époxy est ajoutée jusqu'à ce que la quantité de 50 g d'époxy par moule soit atteinte.
- 3.5 Les échantillons sont densifiés à l'aide de la presse à chaud LabEcon pendant 5 heures à 60°C à une pression d'environ 3 bars.

L'élimination de la lignine dans les parois cellulaires entraîne une augmentation de la porosité des parois cellulaires à l'état humide. Lors du séchage, les parois cellulaires du bois délignifié se rétractent et les cellules voisines entrent en contact étroit les unes avec les autres, ce qui entraîne une déformation des cellules. Cette déformation génère des interfaces ridées qui peuvent agir comme des verrouillages mécaniques entre les cellules. Ces verrouillages offrent une intégrité structurelle remarquable et une grande stabilité mécanique. En outre, au cours de la délignification, des cavités dans les cellules du bois appelées loumines sont conservées. Cette voie peut être exploitée pour l'infiltration d'une matrice de résine dans le cadre de la cellulose, ce qui conduit à une phase de matrice infiltrée interconnectée en trois dimensions.

Le rapport entre la phase cellulosique et la phase matricielle augmente avec la densification. Dans l'étude, les chercheurs ont ajusté la teneur en volume des fibres CVF en faisant varier l'épaisseur finale du composite pour obtenir des valeurs CVF comprises entre 18 % sans densification et 70-80 % pour les échantillons fortement densifiés. Les pressions élevées exercées pendant le pressage dans le moule CRTM permettent d'éliminer les bulles d'air dans l'époxy et d'obtenir une infiltration complète.

Pour les essais de traction et de flexion, les échantillons ont été conditionnés à 65% d'humidité relative et 20°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Des échantillons de bois délignifié renforcé par des polymères (MDRP) avec des contenus volumiques de fibres (FVC) d'environ 25%, 50% et 70% ont été testés. Ces échantillons ont été comparés à des échantillons de bois naturel (MN), de bois délignifié (MD) et de composites en fibre de verre renforcés par des polymères (PVRP). Une teneur volumique élevée en fibres CVF de 70 % ou plus n'a été atteinte que dans les MDRP en raison de la capacité de densification du bois délignifié.

Les résultats obtenus montrent que les échantillons de bois délignifié renforcés par des polymères (MDRP) possèdent une rigidité et une résistance à la traction très élevées, de l'ordre de 70GPa et 600 MPa respectivement, en raison d'une combinaison d'engagement mécanique entre les cellules et d'une teneur volumique en fibres CVF très élevée, supérieure à 80%.

La rigidité à la traction et la résistance à la traction augmentent avec l'augmentation du CVF (tableau 1). Cette tendance s'est avérée similaire pour les composites sans matrice (MD25% et MD50%), ce qui implique que les interactions fibre-fibre à CVF élevé régissent le transfert des contraintes et permettent d'obtenir des performances mécaniques supérieures. Par conséquent, le bois délignifié constitue un excellent échafaudage de renforcement pour les composites à phase interpénétrée à haute performance.

En outre, la faible densité des fibres de cellulose se traduit par des propriétés de traction spécifiques élevées, et les MDRP à CVF élevé surpassent même les matériaux testés en ce qui concerne les propriétés de traction spécifiques. Les modules élastiques en traction, les résistances et les densités des MDRP et des échantillons de référence sont indiqués dans le tableau 1 et la figure 1.

Tableau 1. Rigidité à la traction, résistance à la traction et densité des spécimens mesurés et valeurs de référence dans d'autres études.

Figure 1 : Rigidité à la traction, résistance à la traction et densité des spécimens mesurés et valeurs de référence dans d'autres études.

Pour une étude plus approfondie du comportement mécanique des composites MDRP, des mesures de flexion ont été effectuées. En flexion, l'influence de la matrice est encore plus prononcée et le MDRP présente une rigidité et une résistance à la flexion bien plus élevées que le MD non infiltré, ce qui démontre l'importance de la phase polymère pénétrante interconnectée spécifiquement pour cette condition de chargement. On a constaté que le MDRP avait une rigidité à la flexion similaire à celle du FVRP, bien que la résistance à la flexion du FVRP soit environ deux fois supérieure à celle du MDRP (Tableau 2). Ceci peut être expliqué en analysant les courbes de contrainte-déformation (Figure 3). Le FVRP présente une rupture fragile dominée par la traction à 800-900 MPa, tandis que le MDRP présente une forte déformation plastique débutant dans la plage de 100-200 MPa avant une rupture finale à environ 300 MPa. Le MDRP se rompt dans un mélange de compression et de tension. Les spécimens MD non infiltrés ont échoué en compression et ont montré un plateau autour de 100 Mpa. Par conséquent, la matrice interpénétrante renforce l'échafaudage en MD en remplissant l'espace vide de l'alumine et aide à résister à la rupture par compression à de faibles niveaux de déformation. En raison de leur densité plus faible, le MDRP surpasse le FVRP en termes de rigidité spécifique à la flexion, mais le FVRP présente une résistance spécifique à la flexion plus élevée que le MDRP. Les modules de flexion, les résistances et les densités sont présentés dans le tableau 1 et la figure 1.

Tableau 2 : Rigidité à la flexion, résistance à la flexion et densité des spécimens mesurés et valeurs de référence dans d'autres études.

Figure 2 : Rigidité à la flexion et résistance à la flexion des spécimens mesurés et valeurs de référence dans d'autres études.

Courbes de tension-déformation du bois naturel (MN), du bois délignifié (MD), du bois délignifié renforcé par des polymères (MDRP) et du polymère renforcé par des fibres de verre (GRPF).

2.4. fabrication et conception de composites à base de bois à haute performance (Marion Frey et al., 2019).

Le bois délignifié densifié est un nouveau matériau prometteur et durable qui a le potentiel de remplacer les matériaux synthétiques, tels que les composites renforcés de fibres de verre, en raison de ses excellentes propriétés mécaniques.

Le bois délignifié est cependant assez fragile lorsqu'il est humide, ce qui le rend difficile à manipuler et à façonner. Le bois délignifié conserve sa structure, qui est transférée au nouveau matériau. La densification directe d'échantillons de bois délignifiés saturés en eau entraîne un degré limité de densification, de fissuration et de déformation en raison de la présence d'eau libre dans le matériau final. Pour éviter la perte d'intégrité structurelle après la densification, les solutions actuelles consistent à utiliser une délignification partielle suivie d'une densification à haute température ou à pré-sécher le bois délignifié avant la densification. Les deux méthodes améliorent la connectivité entre les cellules voisines, soit parce que la lignine restante agit comme une colle, soit par l'élimination de l'eau libre entre les cellules. Dans les deux cas, la conformabilité est réduite, ce qui limite les applications de conception. Il faut un procédé rapide et évolutif qui combine le moulage et la densification en une seule étape.

Frey et al. présentent dans cette étude deux procédés de fabrication, la densification en moule fermé et la densification sous vide, pour produire des composites celluloseux de haute performance à partir de bois délignifié. La densification en moule fermé présente l'avantage de ne nécessiter aucun équipement de laboratoire sophistiqué. De simples pinces à vis ou une presse peuvent être utilisées pour la densification. Ils recommandent cette méthode pour les petites pièces à géométrie simple et à grand rayon de courbure. La densification sous vide dans un processus de moule ouvert convient aux objets de plus grande taille et aux géométries plus complexes, y compris les petits rayons de courbure.

Un procédé de délignification et de densification combinant moulage, densification et séchage dans une méthode simple et évolutive est présenté :

1. la délignification

- 1.1 Les échantillons sont préparés à partir de placages d'épicéa de Norvège coupés radialement d'une épaisseur de 1,5 mm (les essences de bois, les types de coupe ou les épaisseurs peuvent varier).
- 1.2 Un porte-échantillon en acier inoxydable est monté dans un récipient en verre et un aimant à barre est placé en dessous.
- 1.3 Les échantillons en bois sont empilés sur le support et séparés par un grillage.
- 1.4 Un mélange en volume 1:1 de peroxyde d'hydrogène (30 % en poids) et d'acide acétique glacial est préparé et versé dans le récipient en verre jusqu'à ce que les

échantillons soient complètement recouverts. Les échantillons sont laissés à tremper à température ambiante pendant la nuit tandis que le mélange est agité à 150 rpm.

- 1.5 Le mélange est chauffé à 80°C pendant 6 h pour une délignification totale.
- 1.6 Après la délignification, le mélange est versé dans un flacon et laissé refroidir avant d'être éliminé.
- 1.7 Les échantillons sont rincés plusieurs fois dans de l'eau désionisée. Pour ce faire, le récipient est rempli plusieurs fois d'eau déminéralisée sans remuer. L'eau est changée deux fois par jour jusqu'à ce que le pH de l'eau de rinçage atteigne une valeur supérieure à 5.
- 1.8 Les feuilles de bois délignifiées humides sont manipulées sur le grillage pour préserver leurs structures cellulodiques car elles sont très fragiles.

2. Stockage

- 2.1 Pour stocker les feuilles, elles sont séchées entre des mailles métalliques dans le four.
- 2.2 Les feuilles sèches sont stockées à 65% d'humidité relative. Ils doivent être humidifiés dans l'eau avant d'être traités.

3. Densification dans les moules fermés

3.1 Des moules fermés en matériau poreux (céramique, moules poreux en polymère imprimé en 3D) sont utilisés pour permettre le passage de l'excès d'eau et le séchage. La taille des pores doit être inférieure à 2 mm, surtout vers la surface, pour obtenir un échantillon à surface lisse.

3.2 Pour les structures plates, on utilise des échantillons à 95% d'humidité relative à 20°C.

Pour les rayons de courbure plus petits, des échantillons complètement humides sont utilisés pour s'adapter à la forme du moule et sont pré-séchés dans un four à 65°C pendant 5 à 30 minutes, selon l'épaisseur de l'échantillon, pour éliminer l'excès d'eau.

3.3 Le moule est fermé et le matériau est densifié par pressage ou serrage avec de faibles pressions de quelques MPa. Le processus peut être accéléré en plaçant le moule dans le four à 65°C.

3.4 Une fois complètement séchée, la pièce densifiée est démoulée.

4. Densification dans les moules ouverts

4.1 Des moules poreux ouverts sont utilisés. On peut également utiliser des moules non poreux avec une couche poreuse (tissu, filet) sur le dessus du moule pour permettre le séchage.

4.2 Une couche de textile est placée pour protéger le moule de la contamination. L'échantillon complètement mouillé est placé sur la couche textile et recouvert d'une deuxième couche et d'un filet flexible.

4.3 Le moule est placé sur une plaque en acier inoxydable, un adhésif de scellement est placé sur les bords de la plaque, un tube à vide est placé et l'ensemble de l'échantillon est enveloppé dans un sac à vide.

4.4 Le vide est appliqué pour le séchage et, simultanément, la densification de l'échantillon. Pour accélérer le processus, l'ensemble est placé dans le four à une température élevée de 65°C. La gamme de pression est de 10(-2) bar. La gamme de pression est de 10(-2) bar.

4.5 Après le séchage, l'échantillon est retiré du moule.

5. Traitement des échantillons stratifiés

5.1 Une pièce multicouche plus épaisse composée de plusieurs feuilles avec des angles d'orientation de couche différents est produite.

5.2 Le temps de mise sous vide dépend de la taille et de l'épaisseur de la pièce : de 2 h pour une seule couche à 2 jours pour 8 couches.

5.3 Pour augmenter l'adhérence entre les couches de bois délignifié, un adhésif intercouche est appliqué pendant le processus de moulage. Un adhésif à base d'eau est utilisé pour permettre à l'adhésif de sécher.

5.4 La pièce est démoulée.

Le bois délignifié qui est densifié à environ un quart de son épaisseur initiale atteint des valeurs de module d'élasticité d'environ 25 GPa et des valeurs de résistance dans la gamme de 150-180 MPa. Avec le procédé sous vide, une densification d'un quart de l'épaisseur initiale de l'échantillon est obtenue, ce qui correspond à un CVF de 66% (Tableau 1 et Figure 1).

CVF	20%	33%	50%	66%	85%
Densité (g/cm ³)	0,3	0,5	0,72	1	1,3
Module d'élasticité en traction (Gpa)	5				
Résistance à la traction (Mpa)		90			

Tableau 1. Valeurs du module élastique et de la résistance à la traction du bois délignifié et densifié.

Valeurs du module élastique et de la résistance à la traction du bois délignifié et densifié.

Le procédé sous vide du bois délignifié a le potentiel de devenir une production à grande échelle, facile et rapide, d'un composite de fibres de cellulose densifié. Pour augmenter la durabilité du matériau, des revêtements appropriés, des adhésifs solubles dans l'eau ou des modifications chimiques peuvent être ajoutés pour permettre une application industrielle du matériau, comme les composants de l'industrie automobile (panneaux de porte, planchers, tableaux de bord). Ce matériau pourrait remplacer les métaux ou les composites renforcés de fibres pour réduire le poids. Et aussi en améliorant sa recyclabilité.

3. Le matériau du mycélium

3.1 La formation du biocomposite

Le mycélium est l'appareil végétatif des champignons qui sert à les nourrir et qui est souterrain. Le mycélium se développe grâce à une relation symbiotique avec les matériaux qui le nourrissent, formant des réseaux tridimensionnels de fibres ramifiées. Les filaments du mycélium sont appelés hyphes et sont constitués de cellules allongées. Ces cellules sont séparées les unes des autres par des jonctions internes poreuses appelées septa. La paroi de ces cellules joue plusieurs rôles physiologiques dans la morphogénèse du champignon : protection des hyphes et résistance mécanique de l'ensemble du mycélium. Cette paroi est composée de chitine, de glucanes et d'une enveloppe protéique (Haneef et al., 2017).

Le mycélium pénètre les substrats qui le nourrissent par pression physique et par sécrétion d'enzymes pour décomposer les polymères du substrat en nutriments plus facilement absorbés et transportés, comme les sucres (certaines des enzymes qu'ils excrètent sont capables de dégrader des composants végétaux plus difficiles à hydrolyser, comme la lignine) (Haneef et al., 2017). Au fil du temps, le substrat est partiellement remplacé par la biomasse fongique, le mycélium résultant est capable de consolider fortement le substrat par lui-même, ce qui donne un biocomposite (Girometta et al., 2019).

À un certain moment, les hyphes se développent hors du substrat dans l'air, créant une couche compacte qui recouvre le substrat. Cette couche est appelée la peau du champignon. On distingue deux types de matériaux : les matériaux purs et les matériaux composites. Le matériau pur est le résultat de la dégradation complète du substrat et est obtenu en extrayant la peau du champignon du substrat (Appels et al., 2019).

Les propriétés des matériaux mycéliens dépendent du substrat, du type de champignon, des conditions de croissance et du traitement ultérieur.

3.2 Le processus de culture du matériel de mycélium

En général, le processus de fabrication d'un matériau mycélien comprend essentiellement six étapes selon (Lelivelt et al., 2015).

La première étape consiste à créer l'habitat du champignon : le substrat. Le substrat peut être tout matériau riche en cellulose tel que la paille, le bois, la sciure ou le chanvre. Le substrat doit avoir une teneur élevée en cellulose pour deux raisons : le champignon peut décomposer la cellulose en glucose. Ainsi, dans les environnements riches en cellulose, le champignon peut se développer rapidement, alors que d'autres organismes n'en sont pas capables. La deuxième raison est que de nombreuses fibres naturelles et de nombreux bois sont un composite de cellulose rigide et résistante intégrée dans une matrice de lignine. Par conséquent, une teneur élevée en cellulose permet de prévoir une résistance élevée à la traction. Le substrat agissant comme un renforcement du matériau, une résistance à la traction élevée laisse présager un comportement mécanique élevé du matériau final.

Une fois sélectionné et mélangé, le substrat est stérilisé pour éviter toute infection par d'autres organismes pendant la croissance mycélienne. Ce processus peut être réalisé en faisant bouillir le substrat dans l'eau ou en le traitant au peroxyde d'hydrogène.

Après stérilisation, le substrat est inoculé avec les spores fongiques. Pour cela, le substrat est mélangé aux spores.

Après l'inoculation, le champignon colonise le substrat et se développe à travers celui-ci. Les conditions pour que cette croissance se fasse de manière aussi homogène que possible sont l'obscurité, un taux d'humidité très élevé (90-100% d'humidité relative) et l'air. L'obscurité est nécessaire car la présence de lumière signale au champignon qu'il est déjà à la surface, et il commence alors à produire des fruits (champignons). L'air frais est nécessaire car le mycélium a besoin d'oxygène pendant sa croissance. La température optimale dépend du type de champignon mais, en général, elle ne doit pas dépasser 40°C car le champignon produit de la chaleur pendant sa croissance.

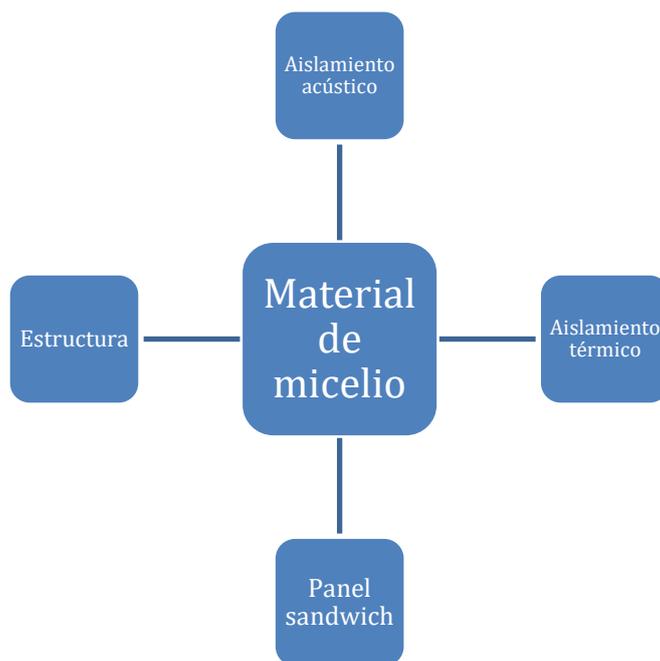
Après la phase de colonisation, la croissance est interrompue par le séchage et/ou le chauffage du matériau. En séchant, le champignon est maintenu dans un état d'hibernation qui lui permet de reprendre sa croissance lorsque les conditions d'humidité redeviennent favorables. Le chauffage, cependant, tue le champignon (Appels et al., 2019).

Après séchage ou chauffage, le matériau peut être démoulé et revêtu ou traité en surface pour améliorer certaines propriétés.



Le matériau mycélium obtenu est entièrement naturel et biodégradable, sa production consomme peu d'énergie et présente un fort potentiel de rentabilité. Ces caractéristiques s'alignent sur l'économie circulaire où la valeur des produits, des matériaux et des ressources est conservée dans l'économie le plus longtemps possible et où la production de déchets est réduite au minimum (Europa, 2015).

L'objectif des sous-sections suivantes est d'analyser l'éventuelle substitution des matériaux utilisés aujourd'hui par des matériaux à base de mycélium sur la base des différentes propriétés décrites par la recherche.



3.3.- Analyse des matériaux et des propriétés du mycélium

3.3.1.- Le matériau mycélium comme isolant thermique

L'isolation thermique des bâtiments joue un rôle important dans l'amélioration du confort thermique, de la santé et du bien-être des occupants, la réduction des consommations d'énergie pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments, ainsi que des émissions de carbone et de la pollution (Xing, Brewer, El-Gharabawy, Griffith, & Jones, 2018).

Les polystyrènes et les polyuréthanes sont généralement utilisés comme isolants thermiques et charges légères dans les infrastructures et la construction de bâtiments. Ces matériaux à base d'hydrocarbures sont légers, hydrophobes et résistants à la photolyse. Cependant, ces matériaux ne sont pas renouvelables et leur production et leur utilisation impliquent des processus de fabrication complexes, des apports énergétiques importants et des déchets associés. Ils libèrent également des toxines qui s'accumulent dans la faune et la flore marines, ce qui pose un problème de santé publique et d'environnement (Yang, Zhang, Still, White et Amstislavski, 2017).

Plusieurs études montrent que le matériau mycélium présente des propriétés similaires à celles du polystyrène expansé ou d'autres mousses, ce qui permet de l'utiliser comme matériau d'isolation.

(Yang et al., 2017) ont mené une étude analysant les propriétés d'une bio-mousse à base de mycélium. Ils ont obtenu des échantillons avec trois protocoles différents, avec différents matériaux de substrat et deux conditions de stockage.

Protocole I : le substrat et le champignon ont été mélangés et stockés dans des moules qui ont été placés à température et humidité contrôlées dans un incubateur.

Protocole II : Le substrat et le champignon ont été incubés dans des sacs filtrants en polypropylène pendant un certain temps, puis transférés dans les moules.

Protocole III : Protocole I mais ajout de fibres naturelles (50% du poids sec du substrat) pendant le mélange.

Le mode de stockage du mélange a été appliqué de deux manières : lâche et dense, dans le premier cas le mélange a été déposé naturellement sans compactage, dans le deuxième cas il a été compacté environ deux fois le volume du mélange stocké.

Le champignon inoculé appartenait aux Basidiomycètes saprotrophes : *I. Lacteus*, et les substrats étaient composés de pulpe de sciure de bouleau d'une taille inférieure ou égale à 5 mm, de grains de millet, de son de blé, de fibres naturelles et de sulfate de calcium. Ils ont été cultivés pendant 2 ou 6 semaines, selon l'échantillon, et certains ont été séchés dans un four à 60°C pendant 24 heures et d'autres ont été conservés vivants.

Les échantillons obtenus ont été testés pour caractériser leurs propriétés mécaniques : densité à sec, conductivité thermique, module d'élasticité incluant le module de Young et le module de cisaillement, le coefficient de Poisson et la résistance à la compression.

Sur la base des résultats obtenus, ils ont conclu que :

1. Le matériau du mycélium est plus léger que les autres matériaux utilisés dans le secteur de la construction.
2. Les échantillons compactés, placés dans les moules, ont montré les densités sèches, les modules élastiques et les résistances à la compression les plus élevés.
3. Le matériau sec a démontré une bonne conductivité thermique dans la gamme de 0,05-0,07 w/mK.
4. Les spécimens secs présentent un bon module d'élasticité, les spécimens vivants un module beaucoup plus faible.
5. Le matériau présente une forte anisotropie élastique, le module d'Young et le cisaillement dans la direction horizontale étant de 20 à 60 % supérieurs à ceux de la direction verticale.
6. Le matériau a montré une excellente résistance à la compression avec une moyenne de 350-570 kPa.
7. Le temps de croissance n'a aucune influence sur la densité sèche et la conductivité thermique, a un impact négatif sur le module élastique et un impact positif sur la résistance à la compression.
8. L'ajout de fibres naturelles permet d'améliorer le module d'élasticité et la résistance à la compression.
9. Ce matériau présente des caractéristiques identiques ou supérieures à celles des mousses polymères thermiques classiques, à l'exception de la densité à sec.

Afin de connaître d'autres caractéristiques de ce matériau comme le comportement à l'eau ou la résistance au feu, comme indiqué par (Yang et al., 2017) à la fin de leur étude, différentes études sont passées en revue.

(Haneef et al., 2017) dans leur étude visant à connaître les propriétés physiques des matériaux mycéliens conclut que tous les matériaux testés sont assez résistants à l'humidité, absorbant de faibles quantités d'eau :

50% d'humidité relative : absorption <4% quel que soit le substrat et la graine.

85% d'humidité relative : absorption 6% sans différence entre les substrats et les graines.

100% d'humidité relative : *P. Ostreatus* sur substrat cellulose-PDB présente une absorption supérieure de 20% contre 12-13% pour le reste des échantillons.

En ce qui concerne la caractérisation thermomécanique, elle conclut qu'il n'y a pas de différences significatives entre les différents échantillons avec une dégradation thermique unique commençant à 225°C et se terminant vers 300°C. Cette température de dégradation élevée prouve que ce sont des matériaux thermiquement stables, ce qui élargit leur champ d'application.

Dans ce cas, l'analyse a été réalisée avec des échantillons de *G. Lucidum* et de *P. Ostreatus* sur des substrats de cellulose pure et de mélange de cellulose avec du bouillon dextrose de pomme de terre. Les substrats ont été préparés en laboratoire selon la procédure suivante : les substrats sont dissous dans du TFA à 0,5 % en poids dans des tubes à essai en verre de 60mL. Les tubes à essai ont été fermés avec du parafilm et placés dans un agitateur de laboratoire pendant 3 jours pour former une solution visqueuse. Ensuite, les solutions obtenues sont réparties dans des boîtes de Pétri et conservées sous une hotte jusqu'à évaporation complète du solvant (3-4 jours). Ces deux types de substrats sont appelés cellulose pure et cellulose PDB.

La procédure de culture des échantillons utilisée était la suivante :

- 1.- Tous les matériaux et substrats sont stérilisés dans un autoclave à 120°C pendant 15 minutes.
- 2.- Les deux types de mycélium sont inoculés dans les différents substrats.
- 3.- Un volume de 5uL de PDB est versé dans le substrat lors de l'inoculation du mycélium pour faciliter la croissance initiale.
- 4.- Les échantillons sont incubés à 25-30°C et 70-80% HR pendant 20 jours dans une chambre.
- 5.- Le matériel obtenu est placé dans un four à 60°C pendant 2 heures pour inhiber la croissance.

(Appels et al., 2019) dans leur étude visant à vérifier si les facteurs de fabrication influençaient les propriétés mécaniques et celles liées à l'humidité et à la résistance à l'eau des matériaux mycéliens, conclut que l'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de gain de poids global, sauf pour deux échantillons spécifiques à 80% d'humidité relative. Cependant, la tendance observée est que tous les matériaux mycéliens gagnent la plupart de leur poids dans les 2 premières heures d'exposition à l'humidité pour atteindre la saturation en 12 heures environ. Le temps de saturation et l'augmentation globale du poids du matériau mycélien étaient plus importants dans les échantillons exposés à 80 % d'humidité relative que dans ceux exposés à 60 % d'humidité relative. L'augmentation du poids final à 40°C des échantillons exposés à 60% d'humidité relative

varie de 3,15 à 8,22% et de 7,57 à 11,83% pour ceux exposés à 80% d'humidité relative. En général, les échantillons avec un substrat de coton montrent une augmentation du poids final plus faible que les substrats de paille de colza et de sciure de hêtre.

En ce qui concerne l'absorption d'eau lorsque les échantillons sont placés sur de l'eau, il a été conclu que le fait de placer les matériaux sur de l'eau a entraîné une augmentation du poids pour tous les échantillons. Aucune relation n'a été trouvée entre l'absorption d'eau et le type de champignon, le substrat ou les conditions de pression utilisées.

Ce travail a été réalisé avec *Trametes multicolor* et *P. Ostreatus* sur trois substrats différents : sciure de hêtre complétée par du son, 65-70% d'humidité finale, paille de colza complétée par du son, 65-70% d'humidité finale et fibre de coton non tissée de basse qualité, 55% d'humidité finale. Après la croissance mycélienne, certains échantillons ont été pressés à chaud (150°C), d'autres à froid (20°C), tous deux pendant 20 min et $F < 30$ kN, et d'autres n'ont pas été pressés et laissés à sécher dans des conditions ambiantes pendant 24-48 h. Tous les échantillons ont été séchés à 80°C pendant 20 min. Tous les échantillons ont été séchés à 80°C pendant 24 h avant les tests.

Une autre étude qui analyse le comportement au feu du matériau mycélium est celle de (Jones et al., 2018). Selon cette étude, le matériau mycélium a montré un temps d'allumage similaire à celui du polystyrène extrudé, mais nettement plus court que celui des agglomérés. La température d'allumage se situait entre 200 et 400°C, bien que le mycélium n'ait pas montré de propriétés ignifuges intrinsèques mais ait seulement agi comme un ciment. Cela est dû à la passivation qui se produit dans le mycélium lorsque ses couches superficielles brûlent. Ces couches brûlées empêchent le contact de l'oxygène avec le matériau, ce qui limite la combustion du mycélium.

Le taux de dégagement de chaleur (HRR) est particulièrement important pour modéliser la croissance et la propagation du feu. Tant (Holt et al., 2012) que (Jones et al., 2018) ont rapporté des valeurs similaires pour les matériaux à base de mycélium, avec des valeurs moyennes de HRR de 55-75 et 33-107 kW/m² respectivement et des valeurs de HRR de pointe de 66-116 et 79-185 kW/m² respectivement. Cela signifie que le pic s'est produit dans la première minute après l'allumage. (Jones et al., 2018) ont également signalé que des valeurs de HRR plus élevées se produisent lorsque la fraction de grains dans le substrat a été augmentée en raison de sa valeur calorifique.

L'étude de (Jones et al., 2018) a été réalisée avec des substrats de balle de riz et de grains de blé trempés 48 h dans de l'eau ultrapure et stérilisés à 121°C et 103,4 kPa pendant 40 min avant utilisation. Les substrats et les additifs ont été combinés dans différents rapports avec *Trametes versicolor*. Le substrat inoculé a été placé dans des moules en plastique scellés et incubé dans des conditions ambiantes de 25°C et 50% HR pendant 12 jours. Après cette période, les échantillons ont été séchés à 50°C pendant 48 heures pour éliminer complètement l'humidité absorbée et dénaturer la matière mycélienne.

En résumé et en corrélation avec les études examinées, les matériaux à base de mycélium auraient le plus faible HRR moyen et une durée de combustion éclair plus

longue que les matériaux de construction synthétiques. Ils dégageraient également moins de fumée et de CO₂.

Au vu des résultats des travaux ci-dessus, on peut conclure que le matériau mycélium a un bon potentiel en tant qu'isolant thermique par rapport à la grande variété de matériaux commerciaux couramment utilisés en ingénierie. Il possède des propriétés mécaniques appropriées, se comporte bien contre l'humidité et le feu et a une faible conductivité thermique.

Certaines entreprises commercialisent des panneaux d'isolation acoustique fabriqués à partir de mycélium. C'est le cas d'Ecovative (USA) avec son panneau MycoFoam certifié par le label Cradle to Cradle dont les caractéristiques techniques sont les suivantes :

	Standard	Laboratoire d'essais	MycoFoam
Densité (lbs/ft ³)	ASTM C303	Ecotative	7,6
Résistance à la compression (psi)	ASTM C165	Ecotative	
Module d'élasticité en compression (psi)	ASTM C165	Ecotative	
Résistance à la flexion (psi)	ASTM C203	Ecotative	
Compostabilité (jours)	ASTM D6400	NSF International	
Propagation du feu	ASTM E84	QAI	
Émissions de fumées	ASTM E84	QAI	50
Conductivité thermique à 10°C (W/mK)	ASTM C518	Laboratoire national d'Oak Ridge	0,039
Imprégnation à la vapeur d'eau	ASTM E96	Laboratoire national d'Oak Ridge	
Rétention d'humidité à 53,5% HR (%)	ASTM C1498	Laboratoire national d'Oak Ridge	
Rétention d'humidité à 75% HR (%)	ASTM C1498	Laboratoire national d'Oak Ridge	

En Europe, la société néerlandaise Grown.bio commercialise ces panneaux sous licence d'Ecovative.

Au Portugal, Critical Concrete a fabriqué des panneaux d'isolation thermique en utilisant du carton comme substrat. Le carton est léger, gratuit et recyclable. En plus de ses propriétés isolantes, c'est un mauvais conducteur thermique, ce qui en fait un matériau approprié pour l'isolation thermique. C'est également un bon substrat pour la croissance du mycélium en raison de sa composition très élevée en cellulose (90%).

Pour la fabrication des panneaux, *P. Ostreatus* a été utilisé comme graine et du carton comme substrat. Le processus de culture est habituel : on place le substrat (carton haché) et l'additif (farine de maïs) stérilisés avec la graine dans des moules à couvercle perforé pour permettre l'aération. Elle est cultivée pendant 1 à 2 semaines dans l'obscurité, à 65% d'humidité relative et 25°C et, enfin, elle est séchée dans un four à 80°C pendant 1 heure.

Le matériau obtenu a des propriétés similaires à celles des matériaux étudiés précédemment. Une étude du coût de fabrication du matériau mycélium avec un substrat en carton par rapport aux autres matériaux conventionnels montre que, à l'exception de la laine de verre, la production de ce matériau a un coût inférieur, ce qui ajoute de la valeur au reste des avantages environnementaux.

Pour chaque panneau de 0,5 m² :

11 kg de carton : gratuit

800 grs de farine de maïs : 1,98€.

1,1 kg de P. Ostratus : 5,83€.

Total : 7,81€ ce qui représente 15,62€/m².

Par rapport aux autres types d'isolation :

Type d'isolation	€/m ²
Laine de verre	11,16
Polystyrène expansé	19,58
Polystyrène extrudé	24,81
Polyuréthane	34,95

3.3.2. matériau mycélien pour l'isolation acoustique

En plus de l'isolation thermique, le matériau mycélium a également été testé pour l'isolation acoustique.

L'étude de (Pelletier, Holt, Wanjura, Bayer, & McIntyre, 2013), qui a testé des panneaux fabriqués avec différents substrats, suggère qu'il existe une grande flexibilité avec ces matériaux lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre des panneaux d'absorption acoustique. Cette conclusion a été confirmée par l'observation que même les matériaux les moins performants, tels que ceux produits avec un substrat en fibre de coton à 100 %, présentent une absorption acoustique supérieure à 70-75 % à la fréquence de pointe de 1000 Hz. En comparant les spectres audio, l'absorption la plus élevée a été produite avec des panneaux composés d'un substrat à 50-50% de switchgrass et de sorgho.

Dans une étude ultérieure (Pelletier et al., 2017), ils ont ajouté une étape supplémentaire au processus d'obtention du matériau mycélien qui consistait en une compression à haute température des échantillons pour générer une nouvelle variante beaucoup plus dense et qui pourrait être plus adaptée à d'autres applications.

Des panneaux de matériaux fabriqués à partir de substrats typiques ont été examinés sur une gamme de densités obtenues par compression afin d'accroître les connaissances sur l'influence de la densité sur les propriétés de protection contre le bruit.

Le processus de culture a été le processus habituel jusqu'à l'obtention des panneaux. Ce procédé a permis d'obtenir un panneau de faible densité adapté à diverses applications

telles que les absorbeurs acoustiques de faible poids, les flotteurs de pêche et les matériaux d'emballage.

Pour transformer ces panneaux à faible densité en un nouveau panneau à haute densité, une étape supplémentaire du processus était nécessaire. Le processus de densification a commencé par un traitement thermique des panneaux pendant 10 minutes à 100°C à différentes pressions élevées. Afin d'obtenir une gamme de densités à évaluer dans cette étude, les panneaux ont été compressés aux pressions suivantes : 0, "aucune compression", 2644, 3051, 3661, 4678 N/m² pour atteindre 5 niveaux de densités : 0,042 (aucune compression), 0,057, 0,086, 0,120, 0,169 g/cc. Aucun liant supplémentaire n'a été ajouté pour obtenir ces nouveaux panneaux. Le seul liant provient du mycélium naturel et du polymère chitineux qui est déposé par la croissance naturelle du champignon. Ainsi, la seule étape pour créer ces panneaux à haute densité a été de soumettre les panneaux de mycélium à faible densité à une pression élevée et à un traitement thermique.

Les résultats des tests ont montré que l'absorption acoustique diminue à mesure que la densité augmente.

Par conséquent, les panneaux de mycélium à faible densité offrent une absorption supérieure ou équivalente à celle des pièces acoustiques commerciales actuelles, mais en utilisant moins de matériau. Ainsi, pour les applications où l'absorption est intéressante, les panneaux de mycélium à faible densité peuvent représenter une alternative compétitive.

Nom de l'échantillon	Densité (gm/cc)	Atténuation (dBa)
Pièce acoustique commerciale	0,71	7,6
MBD	0,42	7,1
Traitement MAD 1	0,57	4,6
Traitement MAD 2	0,86	1,3
Traitement MAD 3	1,12	0,8
Traitement MAD 4	1,70	0,1

Résultats de l'absorption sonore contre un réflecteur élevé. Abréviations pour les échantillons : MBD panneau de mycélium à faible densité, MAD panneau de mycélium à haute densité.

En revanche, la transmission acoustique à travers le panneau est tout le contraire. Plus la densité augmente, plus l'atténuation augmente. Pour la protection acoustique par transmission, les pièces acoustiques commerciales ont une forte corrélation avec les panneaux de mycélium à haute densité. L'augmentation de la densité a un effet sur les propriétés acoustiques des panneaux de mycélium. L'un des points clés qui ressort de cette étude est l'amélioration du blindage contre les sons de basse fréquence par des panneaux de mycélium à haute densité.

Nom de l'échantillon	Densité (gm/cc)	Atténuation (dBa)
Pièce acoustique commerciale	0,70	5,2
MBD	0,50	3,0
Traitement MAD 1	0,68	4,5

Traitement MAD 2	0,87	10,0
Traitement MAD 3	1,27	15,2
Traitement MAD 4	1,75	13,7

Résultats de l'absorption du son par la transmission (protection acoustique). Abréviations pour les échantillons : MBD panneau de mycélium à faible densité, MAD panneau de mycélium à haute densité.

Les résultats de ces deux études indiquent que les panneaux de mycélium non compressé constituent une alternative claire aux dalles acoustiques commerciales de mur ou de plafond pour les applications d'absorption acoustique. Pour la protection acoustique, dans les applications de transmission traversante, telles que le traitement des murs intérieurs ou les sous-planchers, les panneaux de mycélium densifié constituent une alternative aux panneaux MDF et OSB (panneaux à lamelles orientées) traditionnels.

Par conséquent, par rapport aux matériaux traditionnels à base de pétrole, les matériaux à base de mycélium qui absorbent ou protègent les sons pourraient constituer une alternative peu coûteuse et très performante, avec l'avantage supplémentaire d'être biodégradable lorsque le produit atteint la fin de sa vie utile.

Plusieurs entreprises commercialisent des panneaux acoustiques en matériau mycélien à placer de manière visible sur les murs. Ecovative (États-Unis) et Grown.bio (Pays-Bas) ont utilisé les propriétés acoustiques de leur matériau MycoFoam pour créer le panneau *Sinewave*. Mogu (Italie) présente une collection de panneaux acoustiques aux formes 3D, finition velours pour maximiser l'absorption sonore : *Wave*, *Kite*, *Fields* et *Plain*. MycoTech (Indonésie) propose un panneau appelé *Biobo* pour les bâtiments résidentiels et les espaces publics.

3.3.3. le matériau mycélium comme panneau sandwich

Bien qu'il n'y ait pas beaucoup d'informations dans la littérature, les matériaux à base de mycélium pourraient être utilisés comme matériau de remplissage pour les panneaux sandwichs métalliques.

Dans le travail de thèse réalisé par (Promoteur, 2019), on compare un panneau sandwich composé de mousse de polyisocyanurate entre deux tôles d'acier galvanisé (Promisol S) et un autre panneau préfabriqué composé de deux tôles d'acier avec âme en laine de verre (Promistyl) avec un panneau sandwich dont le remplissage est composé de matériau mycélien.

Les caractéristiques mécaniques des panneaux en Promisol S, Promistyl et matériau mycélium atteignent des valeurs similaires à celles montrées dans les études précédentes, cependant, la densité et la conductivité thermique sont plus élevées dans le matériau mycélium. Cela signifie que pour que les trois panneaux sandwichs aient la même résistance thermique, le panneau sandwich au mycélium devrait avoir une épaisseur beaucoup plus importante, de l'ordre d'une augmentation de 292% par rapport au panneau Promisol S et de 146% par rapport au panneau Promistyl. Cela pourrait entraîner un besoin accru d'espace à l'endroit où ces panneaux seraient placés.

Un autre inconvénient possible est lié à la densité du matériau du mycélium (380-400 kg/m³ avec *P. Ostreatus*). Cette densité est de l'ordre de 975 % supérieure à celle du panneau Promisol S (35-45 kg/m³) et de 380 % supérieure à celle du panneau Promistyl (90-115 kg/m³), de sorte que le poids des panneaux sandwichs en matériau mycélium serait sensiblement plus élevé. Même en considérant des densités de matériau mycélien plus faibles, de l'ordre de 50-60 kg/m³, comme indiqué par (Xing et al., 2018) dans leur étude utilisant des graines d'*Oxyporus latermarginatus*, de *Megasporoporia minor* et de *Ganoderma resinaceum*, le poids des panneaux serait encore élevé par rapport aux panneaux Promisol S ou Promistyl. Cela aurait probablement un impact sur la structure de support de ces panneaux, qui seraient plus lourds et plus volumineux.

Comme avantages des panneaux sandwichs réalisés en matériau mycélien par rapport à ceux produits avec des mousses dérivées du pétrole, on peut souligner que le matériau mycélien, lorsqu'il brûle, libère du CO₂ et du H₂O alors que les autres panneaux libèrent des isocyanates, de l'oxyde nitrique, du chlorure d'hydrogène et du cyanure d'hydrogène, des substances toxiques dangereuses. Un autre avantage important serait que les panneaux sandwichs fabriqués à partir du matériau mycélium seraient complètement biodégradables alors que les autres panneaux sont généralement mis en décharge à la fin de leur vie utile.

3.3.4. le matériau du mycélium en tant que structure

Un défi pour le matériau mycélium est son utilisation comme élément structurel. Le matériau du mycélium est considéré comme un matériau "mou", mais si, grâce à la géométrie, le matériau est amené à travailler en compression, ce matériau "mou" sera capable de fonctionner structurellement. C'est le travail qu'ils ont présenté (Heisel et al., 2017) à travers un prototype appelé MycoTree pour la Biennale de Séoul 2017.

MycoTree est une structure prototype composée de composants organiques provenant de déchets agricoles, stabilisés exclusivement par une matrice de mycélium cultivé. Sa géométrie a été conçue à l'aide de graphiques 3D en utilisant des formes qui ne fonctionnent qu'en compression afin de permettre à un matériau faible d'être utilisé en structure.

Le type de semence de mycélium utilisé dans ce travail était le *Ganoderma Lucidum* (*G. lucidum*) avec deux substrats différents : (1) mélange de copeaux et de sciure d'*Albizia Chinensis* et (2) déchets de canne à sucre et racines de *Manihot esculenta* (casava, manioc), un substrat spécifiquement développé pour les parties de MycoTree. Le processus de culture indiqué dans l'étude était le suivant :

- 1.- Les substrats sont coupés en petits morceaux.
- 2.- Ils sont mélangés à des suppléments nutritifs.
- 3.- Une teneur en eau de 60-65% est fixée dans le mélange de substrat.
- 4.- Ils sont stérilisés en autoclave à 121°C pendant 30 minutes pour éviter toute contamination par d'autres micro-organismes.

- 5.- Le substrat stérilisé est inoculé avec les graines de *G. lucidum*.
- 6.- Les substrats inoculés sont incubés à 28°C et 80% d'humidité relative pendant 8-12 jours pour une colonisation initiale dans des sacs cylindriques avec filtre.
- 7.- Les substrats colonisés sont émiettés et le mélange est placé dans des moules pour poursuivre l'incubation dans les mêmes conditions pendant encore 6-9 jours.
- 8.- Les moules sont retirés et le matériel mycélien est exposé à l'air pour développer une peau chitineuse.
- 9.- Les pièces sont placées dans un four ventilé à une température de 80°C pendant 24-48 heures pour réduire le taux d'humidité à moins de 10% et empêcher la croissance.

L'étude a comparé la densité, la résistance à la compression à une déformation de 5 %, la limite d'élasticité admissible des composants MycoTree et le module d'élasticité d'échantillons ayant des compositions de substrat différentes. Les échantillons provenant du second substrat ont atteint des propriétés matérielles supérieures.

Composition du substrat	Densité (kg/m ³)	Module d'élasticité moyen (MPa)	Résistance moyenne à la compression pour une déformation de 5% (MPa)
Sciure de bois+drocytes	420	3,97	0,17
Racines de canne à sucre+casava	440	22,70	0,61

Tableau 1. Propriétés physiques et mécaniques du matériau mycélium avec différentes compositions de substrat.

Selon les auteurs, une bonne géométrie était essentielle pour garantir l'équilibre statique de la structure par compression, lorsqu'elle est construite avec des matériaux qui ont peu de capacité en tension et en flexion. À cette fin, ils ont utilisé des formes polyédriques et des diagrammes de force pour concevoir une structure spatialement efficace fonctionnant uniquement en compression. La géométrie était guidée par plusieurs contraintes : tous les nœuds étaient limités à une valence maximale de 4 et l'angle entre deux éléments linéaires du mycélium devait être supérieur à 30°. La distance centre à centre de toute paire de nœuds devait être d'au moins 40 cm et la longueur maximale de tout morceau linéaire de mycélium était limitée à 60 cm.

La structure était composée de 36 pièces linéaires d'une longueur maximale de 60 cm et de 15 éléments nodaux de matériau mycélien d'un poids total de 182 kg. Cette structure supportait une grille en bambou de 134 kg comme toit ou dalle. Les composants du mycélium ont été conçus pour supporter leur propre poids plus le poids de la grille de bambou travaillant en compression ; la grille fonctionnait principalement en tension.

La section transversale triangulaire des parties du mycélium a été dimensionnée pour une force limite de 0,1 MPa avec un coefficient de sécurité de 1,35. La structure a pu résister à une charge ponctuelle horizontale accidentelle de 0,7 kN à une hauteur de 1,27 m du sol jusqu'à un nœud unique. Cependant, la structure ayant été conçue à l'origine pour une charge de compression, toute charge horizontale devait être évitée.

Cette étude, la seule publiée à ce jour, utilisant le matériau mycélium comme structure porteuse représente un aperçu provocateur de la façon dont on peut dépasser les matériaux de construction habituels issus de l'excavation pour aller vers des matériaux cultivés, comment la stabilité peut être obtenue par la géométrie plutôt que par la force, ouvrant la possibilité d'utiliser des matériaux plus faibles en toute sécurité et, enfin, comment les ressources régénératives en combinaison avec les conceptions structurelles ont le potentiel de proposer une alternative aux matériaux établis en allant vers une industrie de la construction plus durable (Heisel et al., 2017).

3.4. résumé des propriétés du matériau mycélium

Pour conclure l'examen des différentes applications du matériau mycélium dans l'industrie, un résumé des valeurs physiques, mécaniques et thermiques disponibles dans les études mentionnées tout au long de ce rapport est présenté.

Densité (g/cm ³)	Conductivité thermique (W/mK)	Module d'Young (MPa)	Force de compression (kPa)	Force de flexion (kPa)	Résistance à la traction (kPa)	Atténuation (dBa)	Étude
0,05-0,06	0,078-0,081	-	-	-	-	-	(Xing et al., 2018)
0,07-0,22	0,10-0,18	123-675	1-72	7-26			(Holt et al., 2012)
0,10-0,39	-	2-97	-	50-870	10-240		(Appels et al., 2019)
0,3-0,55	-	-	-	-	-	44-64	(Pelletier et al., 2013).
0,42-0,75	-	-	-	-	.	0,1-7,1/3,0-13,7	(Pelletier et al., 2017)
0,19-0,59	-	-	-	-	-	-	(Jones et al., 2018)
0,16-0,28	0,05-0,40	5-50	10-600	-	-	-	(Yang et al., 2017)
0,42-0,44	-	4-23	170-610	-	-	-	(Heisel et al., 2017)
-	-	2-28	-	-	-	-	(Haneef et al., 2017)

Comme on peut le constater, toutes les valeurs n'ont pas été calculées dans chaque étude sur le matériel mycélien. De plus, ces valeurs sont, dans certains cas, assez divergentes, probablement en raison des différents types de champignons et de compositions de substrat utilisés, des périodes d'incubation et des traitements pré ou post-séchage.

3.5. Conclusions

L'objectif de cette section était d'analyser l'éventuelle substitution des matériaux utilisés aujourd'hui par des matériaux à base de mycélium en fonction des différentes propriétés trouvées par la recherche.

En accord avec les résultats analysés par les différentes études, on peut affirmer que le matériau mycélium a des propriétés similaires à certains des matériaux actuellement utilisés.

C'est le cas des mousses de polystyrène, de polyuréthane et de laine minérale, qui sont toutes synthétiques et proviennent du pétrole, et sont principalement utilisées comme isolant thermique et acoustique. Pour cette utilisation, le matériau mycélium pourrait être une excellente alternative durable car, en plus de sa faible consommation d'énergie et de son coût de production, il est entièrement biodégradable après sa vie utile.

En ce qui concerne l'utilisation du matériau mycélium comme élément structurel, il convient de noter qu'il s'agit d'un matériau "mou" aux propriétés mécaniques faibles. Toutefois, si la géométrie permet de faire travailler le matériau en compression, ce matériau "mou" pourrait avoir une fonction structurelle. Il y a beaucoup de possibilités de recherche dans cette direction.

Avec l'utilisation de matériaux à base de mycélium pour remplacer au moins une partie des matériaux de construction actuels, le bâtiment pourrait être l'une des industries qui s'adapterait à l'économie circulaire : un bâtiment construit avec des matériaux organiques et pouvant être composté après son utilisation initiale et devenir une source pour un nouveau cycle de culture et de construction. En outre, comme le matériau du mycélium peut être produit localement, la nécessité d'importer et de transporter des matériaux de construction serait considérablement réduite, et les travailleurs des communautés pourraient être formés à la fabrication et à l'installation, ce qui améliorerait l'économie locale.

3.6. d'autres applications possibles non explorées : le matériau mycélium comme agent d'allègement dans les planchers unidirectionnels et bidirectionnels.

L'objectif de cette section est l'analyse de la substitution éventuelle de la voûte en polystyrène expansé (EPS) par une voûte en matériau mycélien dans les dalles unidirectionnelles et bidirectionnelles.

3.6.1. La voûte en polystyrène expansé (EPS)

3.6.1.1. introduction

La mousse de polystyrène (EPS) est un matériau plastique rigide fabriqué à partir du moulage de billes de polystyrène expansible pré-expansé. Ces billes sont soumises à des conditions de chaleur et de pression qui provoquent l'expansion du gaz qu'elles contiennent pour former une mousse dont la structure présente une teneur en matériau de 2 à 10 % par unité de volume, le reste étant de l'air.

Le PSE est très léger, possède une résistance thermique élevée, une insensibilité à l'humidité, une excellente absorption d'énergie en cas d'impact et une résistance à la compression. Dans la construction, il est appliqué en fonction de ces caractéristiques,

principalement comme isolant thermique et acoustique (Capilla-González, Plascencia-Mora, Torres-Cisneros, Aguilera-Cortés, & Diosdado-De la Peña, 2013).

Une autre des utilisations de ce matériau dans la construction est l'allègement des dalles de béton des dalles au moyen du système de solives et de voûtes. La voûte en EPS est utilisée dans les dalles unidirectionnelles ou comme bloc perdu dans les dalles bidirectionnelles, contribuant à modeler la section résistante de la dalle mais de manière plus légère que les voûtes en céramique ou les cassettes en béton. Cela a ses avantages mais aussi ses inconvénients.

<http://preglaco.com/>

3.6.1.2. avantages et inconvénients de l'utilisation du noyau creux en PSE

Le principal avantage de l'utilisation du PSE dans les dalles de plancher des structures est la réduction du poids propre de la structure. En général, le poids propre d'un bâtiment représente environ 50 % de sa charge totale. Afin de réduire ce poids propre, la structure peut être allégée ou allégée en supprimant du poids ou de la charge. L'endroit où cet allègement est le plus nécessaire est dans la partie horizontale de la structure : les planchers et les toits.

Le poids dépend essentiellement de la densité des matériaux utilisés. La plus lourde des pièces utilisées dans les dalles de plancher est la dalle de béton, dont la densité approximative est de 2 200 kg/m³. La pièce en céramique est plus légère que la pièce en béton, avec une densité approximative de 1 600 kg/m³. Et la pièce la plus légère est celle en EPS avec une densité qui varie entre 10-15 kg/m³ des voûtes pleines ou mécanisées et 20 kg/m³ des voûtes moulées ou alvéolaires.

<https://comunidad.leroymerlin.es/>

Le poids inférieur des voûtes permet un meilleur fonctionnement des contraintes et des déformations, un dimensionnement moindre des piliers, des poutres et des fondations et une réduction de l'acier nécessaire pour les renforcer, avec une réduction conséquente de l'énergie et des émissions de CO₂, tant dans la fabrication des voûtes que dans la construction.

En outre, comme elles sont plus légères, les performances de montage sont plus grandes, ce qui permet d'économiser du temps et de la main-d'œuvre, moins d'éléments auxiliaires sont nécessaires (grues et élévateurs) et le stockage des voûtes peut se faire sur la dalle même, car les palettes ne dépassent pas 30 kg.

<https://prefabricados-lecrin.com/bovedillas-de-poliestireno-expandido/>

Un autre avantage de l'utilisation de voûtes en EPS est l'isolation thermique. Le PSE est un matériau qui est utilisé comme isolant thermique sous forme de panneaux dans la construction. Par conséquent, une dalle avec ce matériau isolera mieux le bâtiment sur le plan thermique, à condition qu'il n'y ait pas de ponts thermiques dans l'installation.

L'un des inconvénients de l'utilisation de briques creuses en PSE dans les dalles de plancher est qu'elles offrent une moins bonne isolation acoustique. La masse est la meilleure propriété qu'un matériau puisse avoir pour l'isolation acoustique. Pour cette raison, toutes les dalles allégées ont un comportement acoustique plus mauvais qu'une dalle en béton massif et parmi celles-ci, celle qui a la masse la plus faible est celle allégée avec des dalles à noyau creux EPS, ce qui en fait les dalles ayant le plus mauvais comportement acoustique. C'est pourquoi ces structures allégées au PSE nécessitent des solutions supplémentaires qui minimisent la transmission acoustique entre les étages, comme des faux plafonds ou des planchers flottants.

Ce type de voûte étant inflammable, il faut ajouter un autre système pour protéger la structure contre le feu. Il n'est pas non plus possible de loger des sources de chaleur importantes à l'intérieur des voûtes, telles que l'éclairage électrique, les tuyaux de chauffage ou les luminaires qui atteignent des températures élevées, car le polystyrène expansé dissipe mal la chaleur.

Le polystyrène expansé est un matériau à très faible porosité. Il n'y a pas d'adhérence avec d'autres revêtements, de sorte que le mortier ou le plâtre n'y adhère pas. Cette circonstance peut être surmontée en utilisant des enduits spéciaux auxquels sont ajoutés des additifs qui améliorent l'adhérence chimique, ce qui rend cet enduit plus coûteux, ou en réalisant des rainures ou des saillies sur la face de la voûte qui doit être enduite afin que la pâte ait une plus grande adhérence mécanique.

Un autre inconvénient est que les dalles en EPS peuvent absorber des charges suspendues, mais plus difficilement que leurs concurrents. C'est un aspect à prendre en compte pour suspendre des éléments tels qu'une lampe. Pour les petites charges de moins de 5 kg, il peut être suspendu à l'aide de vis spéciales. Pour des charges plus élevées, il serait nécessaire d'utiliser des moyens auxiliaires tels que les profils des faux plafonds ou de rechercher les éléments les plus résistants tels que les solives.

Le polystyrène expansé étant un dérivé du pétrole, sa production et son prix sont liés à l'évolution de ce pétrole brut, avec une tendance à la hausse due à la diminution de sa production. Il s'agit d'un matériau non renouvelable dont la production implique des processus de fabrication complexes, des apports énergétiques importants et des déchets associés.

Informations obtenues à partir de : <https://jordimarrot.blogspot.com/2012/06/el-poliestireno-expandido-al-que.html?m=1> et <https://comunidad.leroymerlin.es/t5/Blog-de-la-Comunidad/Ventajas-e-inconvenientes-del-poliestireno-expandido-en/ba-p/233609>

3.6.1.3. normes et caractéristiques des briques creuses en PSE

Les normes actuelles applicables aux voûtes en PSE sont les suivantes :

UNE 53976.- Plastiques. Briques creuses en polystyrène expansé pour les dalles à sens unique bétonnées sur place. Avril 1998.

UNE 53981.- Plastiques. Briques creuses en polystyrène expansé pour dalles unidirectionnelles avec poutrelles préfabriquées. Avril 1998.

EFHE - Instruction pour la conception et l'exécution de dalles structurelles en béton unidirectionnelles réalisées avec des éléments préfabriqués (Madrid, 2004). Cette norme exige :

La charge de rupture en flexion de n'importe quelle pièce de la poutre doit être supérieure à 1,0 kN (selon la norme UNE 53981:98 pour les pièces en EPS et selon la norme UNE 67037:99 pour les pièces fabriquées dans d'autres matériaux).

Dans les poutres en céramique, la valeur moyenne de l'expansion de l'humidité selon la norme UNE 67036:99 ne doit pas dépasser 0,55 mm/m, et la valeur de 0,65 mm/m ne doit être dépassée dans aucune des mesures individuelles.

Le comportement de réaction au feu des pièces atteindra au moins la classification M1 selon la norme UNE 23727:90. Les coffres-forts en matériaux inflammables doivent être protégés de l'exposition au feu par des couches de protection efficaces.

Les poutres légères peuvent être fabriquées en céramique, en béton, en polystyrène expansé ou en d'autres matériaux suffisamment rigides.

Le code technique du bâtiment CTE doit également être pris en compte dans sa DB-SE (sécurité structurale) qui n'impose pas d'exigences spécifiques pour ce type d'élément, ainsi que dans sa DB-SI (sécurité incendie) qui, en fonction de l'emplacement de l'élément, exige certaines performances en matière d'incendie. Dans ce cas, la dalle doit

être stable suffisamment longtemps pour permettre une évacuation en toute sécurité. Actuellement, la CTE fonde ses exigences sur la classification par Euroclasses au moyen de l'essai UNE EN 13501-1, qui divise les produits en A, B, C, D, E ou F avec des sous-classes s (pour l'émission de fumée) et d (pour les gouttelettes ou les particules enflammées).

Les exigences de réaction au feu concernent les éléments de construction dans leur ensemble, pour lesquels les classifications des dalles de sol avec leurs revêtements doivent être évaluées. Par conséquent, pour les produits qui forment une couche contenue dans l'élément de construction, une définition est requise *dans les conditions finales d'utilisation*.

Selon cette exigence, bien que les voûtes en EPS aient une classification Euroclasse E, ces voûtes avec une couche de mortier ou de plâtre de 9,5 mm répondraient à l'exigence de classification B-s1-d0 selon la norme UNE EN 13501-1 pour les dalles de sol, et dépasseraient celle des revêtements, murs, plafonds, isolations et conduits pour lesquels un B-s3-d0 est demandé (Palma, 2014).

Vous trouverez ci-dessous un tableau présentant les caractéristiques techniques des voûtes en PSE commercialisées par certains fournisseurs en Espagne, à titre d'exemple :

	Groupe Valero	San Juan	CP5 S.A.
Densité	Jusqu'à 30 kg/m ³	9-20 kg/m ³	-
Conductivité thermique	< 0,046 W/mK	0,036-0,047 W/mK	0,030 kcal/mh°C
Réaction au feu	M1 (UNE-FR 23727) E (UNE-EN ISO 11925-2)	E (EN 13501 - 1)	M1 (UNE 23727-90)
Résistance à la flexion	> 50 kPa	> 1,3-1,5 kN	1,97 kN

Tableau 1. Spécifications techniques des voûtes en PSE de (Paneles & Casetones, n.d.), (Modelo, Juan, & Vigueta, 2014), (S.A., n.d.).

3.6.2. La voûte du matériel de mycélium

3.6.2.1 Introduction

Le matériau mycélium est un biocomposite qui est obtenu par la croissance rapide d'une matrice à partir de l'appareil végétatif d'un champignon qui digère le substrat qui l'alimente et agit comme un ciment naturel donnant lieu à un matériau structurellement adéquat.

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, plusieurs études ont montré que le matériau mycélium présente des propriétés similaires à celles du polystyrène expansé ou d'autres mousses, ce qui permet de l'utiliser comme matériau d'isolation.

Dans les sous-sections suivantes, nous essayons d'examiner et de comparer, en fonction des caractéristiques des deux matériaux, si le matériau mycélium pourrait être un substitut plus durable aux voûtes en EPS.

3.6.2.2. Caractéristiques du matériau mycélium

Pour que le matériau mycélium puisse être utilisé comme matériau d'allègement pour les dalles unidirectionnelles, il doit répondre aux exigences fixées pour ces matériaux par les normes EFHE et CTE, qui ont été indiquées ci-dessus et sont résumées comme suit : il doit s'agir d'un matériau suffisamment rigide, la charge de rupture en flexion doit être supérieure à 1,0 kN, et le comportement de réaction au feu des pièces atteindra au moins la classification M1 (selon la norme UNE 23727:90) et B-s1-d0 de l'élément de construction de la dalle (selon la norme UNE EN 13501-1).

Nous allons d'abord analyser si le mycélium répond à ces caractéristiques en passant en revue les travaux existants dans la littérature, puis nous examinerons les avantages et les inconvénients par rapport aux voûtes en PSE.

La première des exigences de la norme est que le matériau doit être suffisamment rigide. Le mycélium répondrait à cette exigence puisque sa densité est supérieure à celle du polystyrène expansé mais bien inférieure à celle des pièces de béton ou de céramique, de sorte qu'il pourrait être considéré comme un matériau léger.

La densité du matériel mycélien dépend du type de champignon utilisé, du substrat sur lequel la croissance a lieu, des périodes et conditions d'incubation, ainsi que des traitements pré et post-séchage.

L'étude de (Appels et al., 2019) a été menée avec des graines de *Trametes multicolor* et de *P. Ostreatus* sur trois substrats différents : sciure de hêtre complétée par du son, 65-70% d'humidité finale, paille de colza complétée par du son, 65-70% d'humidité finale et fibre de coton non tissée de faible qualité, 55% d'humidité finale. Après la croissance mycélienne, certains échantillons ont été pressés à chaud (150°C), d'autres à froid (20°C), tous deux pendant 20 min et $F < 30$ kN, et d'autres n'ont pas été pressés et laissés à sécher dans des conditions ambiantes pendant 24-48 h. Tous les échantillons ont été séchés à 80°C pendant 20 min. Tous les échantillons ont été séchés à 80°C pendant 24 h avant les tests. Le tableau 2 montre les densités obtenues dans les différents échantillons analysés dans l'étude.

Type de matériau	Champignons	Substrat	Pression	Densité (kg/m ³)
TPN	T. multicolore	Paille de colza	Pas de pression	
TSN	T. multicolore	Sciure de hêtre	Pas de pression	170
PTC	T. multicolore	Paille de colza	Pression chaude	
PPN	P. Ostreatus	Paille de colza	Pas de pression	130
PPF	P. Ostreatus	Paille de colza	Pression froide	240
PPC	P. Ostreatus	Paille de colza	Pression chaude	390
PAN	P. Ostreatus	Coton	Pas de pression	130
PAF	P. Ostreatus	Coton	Pression froide	240
PAC	P. Ostreatus	Coton	Pression chaude	

Tableau 2. Densités (kg/m³) des différents échantillons analysés dans l'étude.

Dans l'étude de (Yang et al., 2017), le champignon inoculé était *I. Lacteus* et les matériaux du substrat : pulpe de sciure de bouleau de 5 mm ou moins, grain de millet,

son de blé, fibre naturelle et sulfate de calcium. Trois protocoles différents ont été utilisés avec différents matériaux de substrat et deux conditions de stockage : le matériau lâche déposant le mélange naturellement sans compactage et, le matériau dense dans lequel le mélange a été compacté en le déposant dans les moules d'environ deux fois le volume du mélange. Ils ont été cultivés pendant 2 ou 6 semaines, selon l'échantillon, et certains ont été séchés dans un four à 60°C pendant 24 heures et d'autres ont été conservés vivants.

Les densités obtenues pour les échantillons les plus denses étaient de l'ordre de 230-280 kg/m³ selon le protocole. La densité moyenne des échantillons en vrac était comprise entre 160 et 280 kg/m³ selon le protocole utilisé.

Dans l'étude de (Xing et al., 2018), les densités les plus faibles pour le matériel mycélien sont trouvées. Cette étude a utilisé des graines d'Oxyporus latermarginatus, Megasporoporia minor et Ganoderma resinaceum sur des substrats de 20 grammes de paille de blé de 3-4 cm de long avec 40 ml d'eau. Ils ont été incubés à 28°C pendant 8 semaines et, après démoulage, ont été séchés à 70°C. Le tableau 3 montre les densités obtenues dans les différents échantillons analysés dans l'étude.

Espèces de champignons	Densité (kg/m ³)
Oxyporus	51
Megasporoporia	
Ganoderma resinaceum	

Tableau 3 : Densités (kg/m³) des différents échantillons analysés dans l'étude.

Comme on peut le voir dans les études susmentionnées, la densité du matériau mycélium varie fortement en se déplaçant en général dans une gamme de 50 kg/m³ à 400 kg/m³ ou même des densités plus élevées jusqu'à 750 kg/m³ si le matériau est densifié en le soumettant à des pressions élevées et à un traitement thermique comme indiqué dans l'étude de (Pelletier et al., 2017).

Malgré cette large gamme de valeurs de densité, le matériau mycélium peut être considéré comme suffisamment rigide pour être utilisé comme allègement de dalles ; en gardant l'avantage du polystyrène expansé d'être un matériau beaucoup plus léger par rapport au béton (2.200 kg/m³) et au matériau céramique (1.600 kg/m³).

La deuxième exigence pour les matériaux destinés à être utilisés comme poutres dans les dalles de plancher est que la charge de rupture en flexion doit être supérieure à 1,0 kN.

L'étude de (Appels et al., 2019) mentionnée ci-dessus a réalisé des essais de comportement en flexion trois points sur les échantillons de matériaux de mycélium avec la machine universelle Zwick/Roell Z010 en utilisant une vitesse de 2 mm/min et des distances d'appui de 8 mm. Les résultats qu'ils ont obtenus sont présentés dans le tableau 4.

Type de matériau	Champignons	Substrat	Pression	Résistance à la flexion (MPa)
TPN	T. multicolore	Paille de colza	Pas de pression	0,22
TSN	T. multicolore	Sciure de hêtre	Pas de pression	0,29
PTC	T. multicolore	Paille de colza	Pression chaude	0,86
PPN	P. Ostreatus	Paille de colza	Pas de pression	0,06
PPF	P. Ostreatus	Paille de colza	Pression froide	0,21
PPC	P. Ostreatus	Paille de colza	Pression chaude	0,87
PAN	P. Ostreatus	Coton	Pas de pression	0,05
PAF	P. Ostreatus	Coton	Pression froide	0,24
PAC	P. Ostreatus	Coton	Pression chaude	0,62

Tableau 4 : Résistance à la flexion (MPa) obtenue à partir des différents échantillons analysés dans l'étude.

Les résultats montrent que la résistance à la flexion augmente entre les spécimens non pressés, les spécimens pressés à froid et les spécimens pressés à chaud. Les spécimens qui atteignent les valeurs les plus basses sont les spécimens non pressurisés avec des résistances à la flexion allant de 0,05 à 0,29 MPa.

Les voûtes commercialisées par le groupe Valero présentent, selon leur fiche technique (voir tableau 1), une résistance à la flexion supérieure à 50 kPa, des valeurs qui sont en ligne avec celles atteintes par les échantillons de matériau mycélium dans l'étude précédente, même dans le cas le plus défavorable des échantillons sans pression.

Dans les spécifications techniques du matériau mycélium MycoFoam commercialisé par Ecovative comme matériau d'isolation, il est présenté :

Résistance à la flexion (psi)	ASTM C203	Ecovative	
-------------------------------	-----------	-----------	--

Cela équivaut à une résistance à la flexion de 234,42 kPa, répondant ainsi aux exigences de la norme EFHE.

Les spécifications techniques du matériau mycélium de la collection acoustique commercialisée par Mogu sont présentées dans le document :

Résistance à la flexion (MPa)	Mogu	0,05
-------------------------------	------	------

La troisième exigence de la norme est que la valeur moyenne de la dilatation due à l'humidité ne doit pas dépasser 0,55 mm/m dans les poutres en **céramique**. Même si les autres types d'éléments de poutre n'ont pas d'exigence quant à leur performance contre l'humidité dans l'EFHE, les résultats trouvés par les différentes études sur la performance du matériau mycélium contre l'humidité sont présentés ci-dessous, au cas où ils pourraient être pertinents.

Toujours dans l'étude de (Appels et al., 2019), 5 échantillons ont été testés pour l'absorption d'eau à 40°C et à une humidité relative de 60% et 80%.

Les échantillons ont été placés dans la chambre humide dans les conditions choisies et le poids des échantillons a été mesuré toutes les 10 minutes pendant la première heure et après 2, 4, 24, 48, 96 et 192 h. L'épaisseur des échantillons a été mesurée au début de l'expérience et après 4 et 192 h pour enregistrer l'expansion du volume. L'épaisseur des échantillons a été mesurée au début de l'expérience et après 4 et 192 h pour enregistrer l'expansion du volume.

L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de gain de poids global sauf pour le PPF et le PPC à 80% d'humidité relative. Cependant, la tendance observée est que tous les matériaux de mycélium gagnent la plupart de leur poids dans les 2 premières heures d'exposition à l'humidité pour atteindre la saturation en 12 heures environ. Le temps de saturation et l'augmentation globale du poids du matériau mycélien étaient plus importants dans les échantillons exposés à 80 % d'humidité relative que dans ceux exposés à 60 % d'humidité relative. L'augmentation du poids final à 40°C des échantillons exposés à 60% d'humidité relative varie de 3,15 à 8,22% et de 7,57 à 11,83% pour ceux exposés à 80% d'humidité relative. En général, les échantillons avec un substrat de coton montrent une augmentation du poids final plus faible que les substrats de paille de colza et de sciure de hêtre.

En ce qui concerne l'augmentation de l'épaisseur, le PTC et le PPC ont montré une augmentation de l'épaisseur à 80% d'humidité relative mais pas à 60% d'humidité relative. Au contraire, l'épaisseur du PPN, du PAF et du PPF a augmenté à 60% d'humidité relative mais pas à 80%. Cette dernière peut être due à l'effondrement du matériau en raison de la forte teneur en eau. L'analyse de l'expansion est particulièrement pertinente pour l'alternative d'utiliser des matériaux à base de mycélium pour des applications où les matériaux sont placés entre d'autres matériaux, comme dans le cas des dalles de plancher.

L'absorption d'eau a été mesurée lorsque l'échantillon a été placé sur de l'eau. Ils ont été placés dans des récipients remplis d'eau distillée à 23°C et ont été pesés après 1, 2, 4, 24, 48, 96 et 192 heures. Pour chaque pesée, les échantillons ont été retirés de la surface de l'eau et ont été manuellement retirés de l'eau de surface avec un papier filtre et pesés 1 min après avoir retiré l'eau.

Le fait de placer les matériaux sur de l'eau a entraîné une augmentation du poids de tous les échantillons. TSN a montré la plus faible absorption d'eau, ceci est probablement expliqué par le fait que la peau du champignon *T. versicolor* est hydrophobe. En revanche, le TPN et le PAN ont présenté l'absorption la plus élevée. Aucune relation n'a été trouvée entre l'absorption d'eau et le type de champignon, le substrat ou les conditions de pression utilisées. Les résultats des tests effectués dans l'étude de (Appels et al., 2019) sont présentés dans le tableau 5.

En accord avec d'autres études rapportant que *P. Ostreatus* avec un substrat en fibres de céréales a absorbé jusqu'à 278% en 24 heures alors que le matériau mycélien à base de coton et le champignon inconnu ont absorbé 198% d'eau après 168 heures d'immersion.

Matériau	Augmentation du poids à 60 % d'humidité relative (%)	Augmentation de poids 80% RH (%)	Expansion de l'épaisseur 60% RH (%)	Expansion de l'épaisseur 80% RH (%)	Augmentation du poids après avoir placé le matériau dans l'eau (%)
TPN	8,22 +- 0,25	10,44 +- 0,17	0,29 +- 1,19	5,43 +- 1,38	436 +- 73
TSN	5,71 +- 0,12	11,63 +- 0,10	6,72 +- 2,81	-0,47 +- 1,21	43 +- 5
PTC	7,26 +- 0,09	10,96 +- 0,20	0,93 +- 0,41	1,98 +- 0,78*	246 +- 8
PPN	3,87 +- 0,32	10,26 +- 0,31	24,24 +- 4,61*	-5,13 +- 1,64	279 +- 2
PPF	4,94 +- 0,30	10,00 +- 0,10*	21,06 +- 1,68*	0,96 +- 0,26	262 +- 8
PPC	7,09 +- 0,27	10,92 +- 0,26*	0,97 +- 0,57	2,5 +- 0,56*	239 +- 3
PAN	3,15 +- 0,14	7,57 +- 0,14	18,74 +- 4,16	0,57 +- 2,62	508 +- 76
PAF	3,74 +- 0,18	7,84 +- 0,20	22,12 +- 1,07*	-2,96 +- 1,08	238 +- 1
PAC	5,80 +- 0,11	8,12 +- 0,30	-1,93 +- 2,12	-0,14 +- 1,64	281 +- 5

Tableau 5 : Augmentation du poids (%) à 60 % HR et 80 % HR, expansion de l'épaisseur (%) des échantillons à 60 % HR et 80 % HR et augmentation du poids (%) après avoir placé le matériau dans l'eau. Les astérisques indiquent des différences statistiquement significatives (test t, p<0,05).

L'étude de (Haneef et al., 2017) qui a échantillonné avec différents champignons, substrats et procédés, a montré des résultats similaires à ceux obtenus par Appels et ses collaborateurs.

Dans ce cas, l'analyse a été réalisée avec des échantillons de *G. Lucidum* et de *P. Ostreatus* sur des substrats de cellulose pure et de mélange de cellulose avec du bouillon dextrose de pomme de terre. Les substrats ont été préparés en laboratoire selon la procédure suivante : les substrats sont dissous dans du TFA à 0,5 % en poids dans des tubes à essai en verre de 60mL. Les tubes à essai ont été fermés avec du parafilm et placés dans un agitateur de laboratoire pendant 3 jours pour former une solution visqueuse. Ensuite, les solutions obtenues sont réparties dans des boîtes de Pétri et conservées sous une hotte jusqu'à évaporation complète du solvant (3-4 jours). Ces deux types de substrats sont appelés cellulose pure et cellulose PDB. Les échantillons sont incubés à 25-30°C et 70-80% HR pendant 20 jours dans une chambre et le matériel obtenu est placé dans un four à 60°C pendant 2 h pour inhiber la croissance.

Cette étude conclut que tous les matériaux analysés sont assez résistants à l'humidité, absorbant de faibles quantités d'eau :

50% d'humidité relative : absorption <4% quel que soit le substrat et la graine.

85% d'humidité relative : absorption 6% sans différence entre les substrats et les graines.

100% d'humidité relative : *P. Ostreatus* sur substrat cellulose-PDB présente une absorption supérieure de 20% contre 12-13% pour le reste des échantillons.

Les résultats de ces deux études sont conformes aux spécifications techniques du matériau mycélien pour l'isolation thermique MycoFoam, déjà commercialisé par Ecovative :

Rétention d'humidité à 53,5% HR (%)	ASTM C1498	Laboratoire national d'Oak Ridge.	
Rétention d'humidité à 75% HR (%)	ASTM C1498	Laboratoire national d'Oak Ridge.	

Tableau 6. Spécifications techniques de Ecovative MycoFoam.

Bien que les valeurs qui caractérisent le matériau mycélium quant à son comportement par rapport à l'humidité soient faibles et pourraient répondre aux exigences des matériaux en polystyrène expansé (IDAE, 2007), les exigences de la norme EFHE pour les pièces en céramique semblent plus restrictives.

La quatrième et dernière exigence de l'EFHE pour les poutrelles est que la réaction au feu des pièces atteigne au moins la classification M1 selon la norme UNE 23727:90. Les coffres-forts en matériaux inflammables doivent être protégés de l'exposition au feu par des couches de protection efficaces. Le Code technique de la construction CTE dans son DB-SI (sécurité incendie) doit également être pris en compte. Selon cette exigence, la classification serait B-s3-d0 (Palma, 2014).

L'étude précitée de (Haneef et al., 2017) a également analysé les échantillons obtenus en fonction de leur caractérisation thermomécanique. Sur ce point, il conclut qu'il n'y a pas de différences significatives dans le comportement des différents échantillons analysés en fonction du type de champignon et du substrat atteignant tous une dégradation thermique unique commençant à 225°C et se terminant près de 300°C. Cette température de dégradation élevée prouve que ce sont des matériaux thermiquement stables, ce qui élargit leur champ d'application.

Une autre étude qui a analysé le comportement au feu du matériau mycélium est celle de (Jones et al., 2018). Selon cette étude, le matériau mycélium a montré un temps d'allumage similaire à celui du polystyrène extrudé, mais nettement plus court que celui des agglomérés. La température d'allumage se situait entre 200 et 400°C, bien que le mycélium n'ait pas montré de propriétés ignifuges intrinsèques mais ait seulement agi comme un ciment. Cela est dû à la passivation qui se produit dans le mycélium lorsque ses couches superficielles brûlent. Ces couches brûlées empêchent le contact de l'oxygène avec le matériau, ce qui limite la combustion du mycélium.

Le taux de dégagement de chaleur (HRR) est particulièrement important pour modéliser la croissance et la propagation du feu. Tant (Holt et al., 2012) que (Jones et al., 2018) ont rapporté des valeurs similaires pour les matériaux à base de mycélium, avec des valeurs moyennes de HRR de 55-75 et 33-107 kW/m² respectivement et des valeurs de HRR de pointe de 66-116 et 79-185 kW/m² respectivement. Cela signifie que le pic s'est produit dans la première minute après l'allumage. (Jones et al., 2018) ont également signalé que des valeurs de HRR plus élevées se produisent lorsque la fraction de grains dans le substrat a été augmentée en raison de sa valeur calorifique.

L'étude de (Jones et al., 2018) a été réalisée avec des substrats de balle de riz et de grains de blé trempés 48 h dans de l'eau ultrapure et stérilisés à 121°C et 103,4 kPa pendant 40 min avant utilisation. Les substrats et les additifs ont été combinés dans différents

rappports avec *Trametes versicolor*. Le substrat inoculé a été placé dans des moules en plastique scellés et incubé dans des conditions ambiantes de 25°C et 50% HR pendant 12 jours. Après cette période, les échantillons ont été séchés à 50°C pendant 48 heures pour éliminer complètement l'humidité absorbée et dénaturer la matière mycélienne.

En résumé et en corrélation avec les études examinées, les matériaux à base de mycélium auraient le plus faible HRR moyen et une durée de combustion éclair plus longue que les matériaux de construction synthétiques. Ils dégageraient également moins de fumée et de CO₂.

Le matériau mycélium MycoFoam commercialisé par Ecovative dans ses spécifications techniques présente les valeurs suivantes contre le feu :

Propagation de la flamme	ASTM E84	QAI	
Émissions de fumées	ASTM E84	QAI	50

Tableau 7. Spécifications techniques de Ecovative MycoFoam.

Cela le classerait dans la classe A selon la norme américaine (propagation de la flamme entre 0 et 25, émission de fumée entre 0 et 450).

Le matériau mycélium de la collection acoustique Mogu présente dans ses spécifications techniques :

	À l'épreuve du feu	Touche naturelle
Typologie des retardateurs de flamme	Sans métaux lourds, non halogénés, à base d'eau, écologiques.	Pas d'utilisation de retardateur
Classification UNE EN 13501-1	B-s1-d0	D-s2-d0

Tableau 8. Spécifications techniques du matériau de la collection acoustique Mogu.

Par conséquent, il semble que le matériau mycélium, comme les voûtes en EPS, nécessiterait une sorte de traitement ou de revêtement pour obtenir la classification de réaction au feu requise pour la dalle dans *l'état d'utilisation finale*.

En conclusion, et compte tenu de toutes les caractéristiques analysées, il a pu être déterminé que les voûtes fabriquées avec le matériau mycélium seraient conformes aux exigences de la réglementation en vigueur en ce qui concerne leur utilisation comme allègement des dalles de plancher.

3.6.3. avantages et inconvénients du matériau mycélium par rapport aux voûtes en EPS

Dans cette section, nous essayons d'analyser si, en fonction des caractéristiques présentées par les deux matériaux, les voûtes fabriquées avec le matériau mycélium seraient une alternative réalisable aux voûtes en EPS et, par conséquent, à celles en béton et en céramique.

Le premier et principal avantage du matériau mycélium est sa durabilité. C'est un matériau d'origine organique qui réutilise également les déchets de l'agriculture ou de la sylviculture. Son processus de fabrication n'implique pas de procédures compliquées avec des températures élevées ou des coûts énergétiques importants. À la fin de sa vie utile, le matériau peut être désassemblé et retourné à la terre où il est entièrement composté.

En revanche, les autres types de briques creuses en PSE, en béton ou en céramique ont pour origine l'extraction de matériaux de la terre, ce qui peut entraîner l'épuisement de ces ressources, leurs processus de fabrication impliquent des coûts énergétiques plus élevés et, à la fin de leur cycle de vie dans la construction, elles sont généralement transportées vers des décharges.

Le matériau mycélium peut être considéré comme un matériau léger. Bien qu'elles aient une densité plus élevée que les voûtes en EPS, environ dix fois plus élevée, celle-ci est inférieure dans la même fourchette, environ dix fois, aux densités des voûtes en béton ou en céramique.

Par conséquent, l'utilisation des voûtes en mycélium entraînerait une réduction du poids propre de la structure ainsi que des voûtes en EPS, bien que cette réduction de poids soit plus faible. Cet allègement des voûtes, comme on l'a vu dans la section 3.6.1.2. avec les voûtes en EPS, se traduirait par un meilleur fonctionnement des contraintes et des déformations, un dimensionnement plus petit des colonnes, des poutres et des fondations et une réduction de l'acier nécessaire pour les renforcer avec une réduction conséquente de l'énergie et des émissions de CO₂ tant dans la fabrication des mêmes que dans la construction. En outre, ce poids plus léger des voûtes pourrait se traduire par une meilleure performance dans l'assemblage et le placement, par rapport à des voûtes plus lourdes.

En conclusion de ce point, on pourrait déterminer que les voûtes en matériau mycélien représenteraient un avantage par rapport aux voûtes en béton et en céramique en raison de leur poids inférieur, mais un inconvénient par rapport aux voûtes en EPS.

L'autre avantage de l'utilisation de briques creuses en PSE dans les dalles de plancher est l'isolation thermique. Dans cet aspect, l'analyse des voûtes de matière mycélienne est similaire à celle effectuée dans l'aspect du poids analysé ci-dessus.

Le PSE est un matériau qui est utilisé comme isolant thermique sous forme de panneaux dans la construction en raison de ses faibles valeurs de conductivité thermique qui varient entre 0,030 et 0,050 W/mK. Par conséquent, une dalle avec ce matériau isolera mieux le bâtiment sur le plan thermique.

En général, les conductivités du matériau mycélium sont un peu plus élevées que celles du polystyrène expansé, même si dans les matériaux mycélium déjà commercialisés pour l'isolation thermique et acoustique, on atteint des valeurs de 0,037 et 0,050 W/mK, très proches de celles du polystyrène expansé. Ces conductivités sont beaucoup plus

faibles que celles des blocs de béton, 0,35-0,79 W/mK et du matériau céramique, 0,49-0,87 W/mK.

On peut donc conclure que l'utilisation de voûtes mycéliennes contribuerait clairement à l'isolation thermique du bâtiment, bien qu'à des valeurs légèrement inférieures à celles des voûtes en EPS.

En ce qui concerne les inconvénients de l'utilisation de voûtes en EPS par rapport à celles en béton ou en céramique, on peut dire que les voûtes en matériau mycélien réduiraient ces inconvénients.

Le principal inconvénient de l'utilisation d'un noyau creux en PSE dans les dalles de plancher est une isolation acoustique plus faible. Comme nous l'avons vu dans la section 3.6.1.2. la masse est la meilleure propriété d'isolation sonore qu'un matériau puisse avoir. Pour cette raison, toutes les dalles allégées ont une performance acoustique plus mauvaise qu'une dalle en béton massif, et parmi celles-ci, celle qui a la masse la plus faible est la dalle allégée avec noyau creux en PSE, ce qui signifie que ce sont les dalles ayant la plus mauvaise performance acoustique. Dans cet aspect, les voûtes en mycélium amélioreraient l'isolation acoustique des dalles par rapport aux voûtes en EPS puisque, comme déjà mentionné, les densités et les poids du mycélium sont environ 10 fois supérieurs à ceux du polystyrène expansé. Et pas seulement en raison de sa densité et de son poids, mais aussi en raison de ses propriétés intrinsèques d'absorption acoustique. Aujourd'hui, le matériau mycélium commence à être commercialisé comme produit pour l'amélioration de l'isolation acoustique des murs et des plafonds.

En ce qui concerne le comportement au feu, le matériau mycélium aurait une meilleure classification que le polystyrène expansé, qui a une classification Euroclasse E selon la norme UNE EN 13501-1. Cependant, tous deux, comme l'exige le code technique du bâtiment, atteindraient les valeurs requises dans la dalle comme condition ultime d'utilisation avec les protections ou les revêtements appropriés.

Comme indiqué dans la section 3.6.1.2, le polystyrène expansé est un matériau à très faible porosité, de sorte qu'il n'y a pas d'adhérence avec les autres revêtements. Pour améliorer cette circonstance, on réalise des rainures ou des saillies sur la face de la voûte à revêtir afin que la pâte ait une plus grande adhérence mécanique, ou on utilise des enduits spéciaux auxquels on ajoute des additifs qui améliorent l'adhérence chimique mais rendent le revêtement plus coûteux. Le matériau mycélium a une porosité plus élevée que le polystyrène expansé, de sorte que son comportement lorsqu'il est enduit pourrait être meilleur et nécessiter moins de traitements qui rendent le processus plus coûteux.

Le dernier inconvénient mentionné au point 3.6.1.2. concerne le fait que les dalles en PSE peuvent absorber des charges suspendues, mais avec plus de difficultés que leurs concurrents. Dans cet aspect, la voûte en matériau mycélium améliorerait le comportement de la voûte en EPS, puisque, ayant une densité et un poids plus élevés, elle serait capable de supporter des charges suspendues plus importantes.

3.6.4. Conclusions

En résumé de l'analyse des caractéristiques des matériaux et des avantages et inconvénients d'utilisation en fonction de ceux-ci, on peut conclure que les voûtes en matériau mycélien :

- Elles entraîneraient un allègement de la structure plus important que les voûtes en béton et en céramique, mais moins important que celles en EPS.
- Ils amélioreraient l'isolation thermique des dalles creuses en béton et en céramique, et atteindraient pratiquement les valeurs des dalles creuses en PSE.
- Elles n'atteindraient pas l'isolation acoustique des dalles creuses en béton ou en céramique, mais dépasseraient les valeurs des dalles creuses en PSE.
- Elles auraient la même performance au feu que le reste des dalles puisque, dans leur condition finale d'utilisation, elles atteindraient les classifications requises.
- Il est possible qu'ils n'aient pas besoin d'un renforcement supplémentaire pour l'adhésion des revêtements améliorant l'état des voûtes en EPS.
- Elles supporteraient moins de charges suspendues que les voûtes en béton ou en céramique, mais plus que les voûtes en PSE.
- Ils favoriseraient la protection de l'environnement en raison de leur origine biologique et de leur biodégradabilité, ils entraîneraient une réduction des coûts et des dépenses énergétiques de production et favoriseraient l'économie circulaire.

4. Technologies de fabrication additive pour les produits polymères dérivés de l'étude.

Il existe un besoin crucial de développer des composites polymères imprimables à haute performance. De nombreuses technologies de fabrication, appelées fabrication additive pour les produits en polymère, sont explorées en raison des propriétés mécaniques et des fonctionnalités intrinsèquement limitées des pièces imprimées en polymère pur. L'impression 3D offre de nombreux avantages dans la fabrication de matériaux composites, notamment une géométrie de haute précision, rentable et personnalisée. Le développement de méthodologies pour la formation et la recherche de performances optimales des composites polymères renforcés par des particules, des fibres et des nanomatériaux est appelé à devenir une activité prioritaire en ingénierie des matériaux. Il existe un besoin crucial de développer des composites polymères imprimables à haute performance.

Tous les polymères extrudables par fusion ne présentent pas une imprimabilité FDM efficace. Parmi toutes les méthodes, l'impression tridimensionnelle (3D) par modélisation par dépôt de matière fondue (FDM) ou extrusion par fusion est la plus populaire. Avec la FDM, les objets 3D sont produits par le dépôt séquentiel de couches de polymère fondu. Dans ce cas, le dépôt est réalisé en poussant un monofilament de polymère solide (diamètre, 2 à 3 mm) à travers une chambre cylindrique chauffée, où il est fondu. Le filament solide, qui agit comme un piston, pousse la matière fondue à travers une buse chauffée.

Le marché des matériaux utilisés dans l'impression par extrusion à l'état fondu est très vaste et est actuellement dominé par les thermoplastiques à base de pétrole. Malgré les avantages du bois et des matériaux d'origine végétale pour la fabrication additive, le marché reste limité, à l'exception notable de l'acide polylactique (PLA) pour le FDM. Cependant, le PLA présente de mauvaises propriétés thermiques et mécaniques, ce qui le rend inacceptable pour la plupart des applications techniques. Si les efforts visant à améliorer les propriétés thermomécaniques du PLA sont prometteurs, d'autres chercheurs ont choisi d'étudier d'autres matières premières biologiques.

La voie semble ouverte pour valoriser la lignine à travers la fabrication additive de composites durables de haute performance pour l'industrie de l'impression 3D. Cela permettrait de remplacer les polymères thermoplastiques utilisés dans l'industrie du modelage par dépôt en fusion, en remplaçant l'ABS [acrylonitrile-butadiène-styrène] dans le mélange final du composite filamentaire [avec le nylon] par un polymère d'origine purement organique. Un analogue de l'ABS intégrant la lignine dans le caoutchouc nitrile-butadiène.

A ce jour, un produit d'origine organique composé de 40% à 60%, en poids, de matériaux polymères synthétisés par de la lignine, formulé par un procédé sans solvant et

présentant une aptitude au traitement limitée par : (a) une fenêtre de température optimale, (b) un taux de cisaillement et/ou (c) un taux d'alimentation du filament.

L'objectif déclaré est de créer un composite renouvelable à base de lignine, renforcé par des fibres, qui présente des propriétés mécaniques supérieures à ce qui est actuellement connu [extraordinaire] et une capacité d'impression 3D avec des performances améliorées de type FDM. À ce jour, le premier rapport sur un polymère renouvelable qui contient environ 50 % en poids de lignine non modifiée et qui surpasse les thermoplastiques de base, tels que les résines de polystyrène à haut impact (HIPS), en termes de performances mécaniques et d'imprimabilité 3D est intitulé "A path for lignin valorization via additive manufacturing of high-performance sustainable composites with enhanced 3D printability". publié dans Science Advances, le 14 décembre 2018, où il est montré que le matériau résultant présente une viscosité réduite et une imprimabilité très efficace, même après chargement avec 16 % [en poids] de fibres de carbone (FC) hachées comme agent de renforcement, présentant des viscosités inférieures à celles d'une résine imprimable pure dérivée du pétrole.

Il convient d'ouvrir de nouvelles voies dans l'utilisation de la lignine isolée comme matière première pour formuler des matériaux d'impression 3D présentant des caractéristiques mécaniques et d'impression supérieures à celles des matériaux actuels. Les résultats de la recherche devraient se traduire par des revenus supplémentaires pour les industries de transformation de la biomasse grâce à la valorisation de la lignine.

5. Bibliographie

- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., ... Wösten, H. A. B. (2019). Facteurs de fabrication influençant les propriétés mécaniques et les propriétés liées à l'humidité et à l'eau des composites à base de mycélium. *Materials and Design*, *161*, 64-71.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>.
- Capilla-González, G., Plascencia-Mora, H., Torres-Cisneros, M., Aguilera-Cortés, L. A., & Diosdado-De la Peña, J. A. (2013). Optimisation topologique d'une voûte en mousse de polystyrène avec mélange de densité. *Dyna (Espagne)*, *88*(4), 444-452.
<https://doi.org/10.6036/5445>.
- Cerimi, K., Akkaya, K. C., Pohl, C., Schmidt, B., & Neubauer, P. (2019). Les champignons comme source de nouveaux matériaux biosourcés : une revue des brevets. *Fungal Biology and Biotechnology*, *6*(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y>. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y>
- Europe. (2015). Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions - Boucler la boucle : un plan d'action européen pour l'économie circulaire. *Journal officiel des Communautés européennes*, (2 décembre 2015 (614)), 1-24.
- Frey, M., Schneider, L., Masania, K., Keplinger, T., & Burgert, I. (2019). Composites interpénétrants bois délignifié-polymère dépassant la règle des mélanges [Research-article]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *11*(38), 35305-35311.
<https://doi.org/10.1021/acsami.9b11105>.
- Frey, Marion, Widner, D., Segmehl, J. S., Casdorff, K., Keplinger, T., & Burgert, I. (2018). Matériaux en vrac à base de cellulose délignifiée et densifiée présentant d'excellentes propriétés de traction pour l'ingénierie durable. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *10*(5), 5030-5037.
<https://doi.org/10.1021/acsami.7b18646>.
- Frey, Marion, Zirkelbach, M., Dransfeld, C., Faude, E., Trachsel, E., Hannus, M., ... Oyj, S. E. (2019). Fabrication et conception de composites hautes performances à base de bois. *Journal of Visualized Experiments*, *2019*(153), 1-8.
<https://doi.org/10.3791/60327>. <https://doi.org/10.3791/60327>
- Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., ... Savino, E. (2019). Propriétés physico-mécaniques et thermodynamiques des biocomposites à base de mycélium : Une revue. *Sustainability*, *11*(1), 281.
<https://doi.org/10.3390/su11010281>.
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., & Athanassiou, A. (2017). Matériaux avancés issus du mycélium fongique : fabrication et réglage des propriétés physiques. *Scientific Reports*, *7*(décembre 2016), 1-11. <https://doi.org/10.1038/srep41292>.
<https://doi.org/10.1038/srep41292>
- Heisel, F., Lee, J., Schlesier, K., Rippmann, M., Saeidi, N., Javadian, A., ... Hebel, D. E. (2017). Conception, culture et application de composants mycéliens porteurs : le MycoTree à la Biennale d'architecture et d'urbanisme de Séoul 2017. *International Journal of Sustainable Energy Development*, *6*(1), 296-303.
<https://doi.org/10.20533/ijsted.2046.3707.2017.0039>.

- <https://doi.org/10.20533/ijsted.2046.3707.2017.0039>.
- Holt, G. A., McIntyre, G., Flagg, D., Bayer, E., Wanjura, J. D., et Pelletier, M. G. (2012). Mycélium fongique et matières végétales de coton dans la fabrication de matériaux d'emballage moulés biodégradables : étude d'évaluation de mélanges sélectionnés de sous-produits de coton. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 6(4), 431-439. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2012.1241>.
- IDAE. (2007). *Guide technique pour la réhabilitation de l'enveloppe thermique des bâtiments Solutions avec isolation en polystyrène expansé (EPS)*. 1–67. Récupéré sur www.idae.es
- Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C. H., et John, S. (2018). Matériaux de construction composites à faible coût à base de mycélium provenant de déchets, offrant une meilleure sécurité incendie. *Fire and Materials*, 42(7), 816-825. <https://doi.org/10.1002/fam.2637>.
- Lelivelt, R. J. J., Lindner, G., Teuffel, P., & Lamers, H. (2015). Le processus de production et la résistance à la compression des matériaux à base de mycélium. *Première conférence internationale sur les matériaux de construction biosourcés*, (2015).
- Macarthur, E. (2020). Vers l'économie circulaire - Justification économique et commerciale d'une transition accélérée. *Fondation Ellen Macarthur Repenser l'avenir*, 100.
- Madrid, C. De. (2004). *"Instruction pour le projet Éléments préfabriqués*.
- Modelo, B., Juan, S. A. N., & Vigueta, P. (2014). *FICHA TÉCNICA Características particulares :*
- Palma, J. B. D. E. (2014). *A n a p*.
- Paneles, A. Y., & Casetones, B. Y. (n.d.). *FICHE TECHNIQUE ISOLATION ET PANNEAUX . COFFRES ET CASSETTES*. 1-3.
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Bayer, E. et McIntyre, G. (2013). Une étude d'évaluation des absorbeurs acoustiques à base de mycélium cultivé sur des substrats de sous-produits agricoles. *Industrial Crops and Products*, 51, 480-485. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.008>.
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Lara, A. J., Tapia-Carillo, A., McIntyre, G. et Bayer, E. (2017). Une étude d'évaluation des absorbeurs acoustiques à pression comprimée cultivés sur des sous-produits agricoles. *Industrial Crops and Products*, 95, 342-347. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.042>.
- Promoteur, P. (2019). *Etude de l'impact environnemental et du potentiel de circularité des panneaux sandwichs dans les bâtiments commerciaux : Conception d'un panneau sandwich avec une âme en mycélium*.
- S.A., C. (n.d.). *Des voûtes en EPS, plus performantes et plus efficaces*.
- Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., ... Hu, L. (2018). Transformation de bois naturel en vrac en un matériau structural à haute performance. *Nature*, 554(7691), 224-228. <https://doi.org/10.1038/nature25476>.
- Xing, Y., Brewer, M., El-Gharabawy, H., Griffith, G. et Jones, P. (2018). Culture et test des briques de mycélium comme matériaux d'isolation des bâtiments. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 121(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032>. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032>
- Yang, Z. (Joey), Zhang, F., Still, B., White, M., & Amstislavski, P. (2017). Propriétés

physiques et mécaniques de la bio-mousse à base de mycélium fongique. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 1-9.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866).