

MÉMOIRE - SAPI CCA :
Le mycélium, un liant naturel dans le myco-
matériau
Étude expérimentale sur les performances en flexion de myco-
matériau dans l'étude structurelle de la construction

Professeurs encadrants :

Joaquim SILVESTRE

Anne TÜSCHER

Louis VITALIS

Alice BICHAT

2025-2026



Résumé :

Dans un contexte marqué par la transition écologique et la nécessité de repenser les modes de production du bâtiment, les myco-matériaux s'inscrivent comme une piste de recherche pertinente face aux matériaux conventionnels. Ce mémoire interroge leur potentiel en tant que ressource biosourcée, susceptible de répondre aux exigences techniques et environnementales contemporaines de la construction. Il s'attache plus particulièrement à l'identification et à la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques du mycélium, à travers l'étude de son comportement en flexion. L'objectif est d'évaluer les limites et les possibilités d'usage de ce matériau dans une application constructive raisonnée. À travers cette démarche, le mycélium est envisagé comme un matériau émergent, participant à une logique d'économie circulaire, où la matière est pensée comme un élément vivant, renouvelable et potentiellement régénératif.

Abstract :

In a context shaped by the ecological transition and the need to rethink building production methods, myco-materials emerge as a relevant research avenue in response to conventional construction materials. This dissertation investigates their potential as a bio-based resource capable of meeting contemporary technical and environmental requirements in the construction sector. Particular attention is given to the identification and characterization of the physical and mechanical properties of mycelium, through the analysis of its behavior under bending stress. The objective is to assess both the limitations and the potential applications of this material within a reasoned and responsible constructive approach. Through this research, mycelium is considered an emerging material aligned with the principles of the circular economy, in which matter is understood as a living, renewable, and potentially regenerative element.

Remerciement :

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à **Madame Jena JEONG**, HDR, Docteure-Ingénieure, Enseignante-Chercheuse à l'Institut de Recherche de l'ESTP, pour son accompagnement scientifique, ainsi que pour l'accès aux machines et aux infrastructures expérimentales de l'ESTP, indispensables à la réalisation de ce travail.

Je remercie également **Monsieur Guillaume FAAS**, responsable de la filière IA et AI à l'ESTP, pour son aide précieuse dans l'établissement des contacts au sein de l'ESTP et pour m'avoir permis d'accéder aux différentes salles de travail nécessaires au bon déroulement de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à **Monsieur Rémi PIALOUX**, élève en IA5, pour son aide attentive lors de la relecture de ce mémoire et pour sa contribution à la structuration et à la clarification de mes idées initiales.

Je souhaite également remercier **Madame Paula Maria Ranhada Pereira de Castro**, Professeure à l'Université de la FAUP, pour son accompagnement lors des premières phases de recherche sur les myco-matériaux, dans le cadre de son enseignement « *Construção Circular, Certificação e Design Consciente* » (construction circulaire, certifications et design conscient), qui a largement nourri la réflexion théorique de ce travail.

Enfin, je remercie **Monsieur Aurélien DUFLO**, élève du groupe de séminaire SAPI, pour ses relectures répétées, ses conseils méthodologiques sur l'approche expérimentale, ainsi que pour son aide précieuse dans l'amélioration de la forme du mémoire, tant sur le plan de la syntaxe que de l'organisation générale des parties.

Avant-propos :

Ce mémoire trouve son origine dans mon parcours scolaire initial, au cours duquel un enseignant, **Monsieur POLVERELI**, (2010-2011) avait mis en place des cours spécifiques visant à sensibiliser les élèves aux enjeux environnementaux. À travers des classes vertes et des enseignements orientés vers l'étude du vivant, ces cours abordaient la faune, la flore, ainsi que les systèmes de fonctionnement des insectes et des végétaux. Durant un trimestre entier, un travail approfondi a notamment été consacré aux espèces de champignons, un domaine alors encore largement méconnu, mais qui avait suscité un vif intérêt et une fascination durable.

Cette découverte précoce du monde fongique trouve aujourd'hui une résonance particulière dans le champ de la construction et des matériaux biosourcés, où les myco-matériaux ouvrent de nouvelles perspectives de recherche et d'application. Ce travail s'inscrit également dans une continuité personnelle, nourrie par les nombreuses sorties en forêt effectuées dès l'enfance

avec **Monsieur BICHAT**, mon père, au cours desquelles il m'a transmis les bases de l'observation, de l'identification et de la compréhension des champignons. Je tiens à les remercier pour l'influence déterminante qu'ils ont eue dans l'émergence de cette réflexion.

SOMMAIRE :

Glossaire.....	12
I. Introduction.....	15
1. Exposition générale.....	15
2. Contexte.....	17
3. Enjeux.....	17
4. Problématiques et hypothèses.....	19
II. L'état de l'ART (biologie, propriétés potentiels).....	21
1. Le champignon : une organisation vivante.....	21
a. Distinction entre champignon et mycélium.....	21
b. Le mycélium dans les écosystèmes.....	22
c. Variétés de champignons et types de mycélium.....	22
2. La composition et les propriétés du mycélium.....	24
a. Structure microscopique.....	24
b. Propriétés comme matériau.....	24
3. Le potentiel du mycélium comme ressource matérielle.....	25
a. Application hors construction.....	25
b. Application en construction.....	25
c. Perspective globale.....	27
4. La résistance mécanique des matériaux biosourcés.....	27
a. La notion de flexion.....	27
b. L'expérimentation de la résistance à la flexion.....	27
c. Les matériaux biosourcés et leur comportement en flexion.....	28
d. Les myco-matériaux en compression.....	29
5. Synthèse.....	30
III. Etudes de cas et expérimentation.....	33
1. L'expérimentation.....	33
a. Méthode de l'expérimentation.....	33

b.	Hypothèse de l'expérimentation	33
c.	Le choix des matériaux	33
d.	Préparation des échantillons	34
i.	Stérilisation du substrat, préparation de la sciure	35
ii.	Mélange.....	35
iii.	Mise en forme de l'incubation	35
iv.	Séchage et stabilisation	36
e.	Tests prévus	36
f.	Résultats attendus.....	37
2.	Les résultats de l'expérience.....	38
a.	La mise en place des prototypes de l'expérience.....	38
b.	La pesée des substrats	39
c.	La superposition des couches.....	39
d.	Les premiers échecs, limites d'expérimentations	40
IV.	Analyse des résultats, limites et perspectives	41
1.	Interprétation des résultats et la comparaison.....	41
a.	Les résultats de l'expérience.....	41
b.	Résultat quantitatif.....	41
c.	Analyse du comportement mécanique.....	42
d.	Les facteurs influençant les résultats et limites expérimentales	43
2.	Les limites et les perspectives d'avenir	44
a.	Les limites du matériau.....	44
b.	Idées et développement par analyse.....	44
3.	Détermination de la portée maximale admissible d'un panneau de myco- matériau sous son propre poids.....	45
a.	Les données pour le calcul théorique.....	45
b.	Les conditions d'appui et de sollicitation	45
c.	Les hypothèses mécaniques explicitement posées.....	45
i.	Charge répartie due au poids propre	45
ii.	Moment fléchissant maximal.....	46
iii.	Caractéristiques de section.....	46

iv. Condition de résistance en flexion (ELU)	46
d. Traduction constructive (application sous toiture)	46
e. Conclusion	46
V. Conclusion et projection.....	47
1. Hypothèse et les limites d'expérience.....	47
2. Choix et limites de ce mémoire	47
3. Projections et perspective d'avenir	48
Liste des figures.....	49
Bibliographie	51

Glossaire :

Mycélium : partie végétative invisible du fungi, formée de filaments diffus, ramifiés, disposés en feutrage plus ou moins dense. Ils se développent sur l'humus, sur des débris organiques, des souches, des troncs d'arbres morts ou des végétaux vivants.

Myco-matériau : un matériau fabriqué à partir du mycélium, la partie végétative du champignon avec des substrats (organique : lin, bois, paille, café, ...).

Microbiote : ensemble de micro-organismes vivant dans un écosystème donné.

Co produit d'usage : matière produite simultanément et de manière inévitable lors de la fabrication d'un produit principal.

Liant : Agent ou propriété qui permet de solidariser entre eux les composants d'un matériau composite assurant la cohésion de l'ensemble.

Basidiomycète : Les Basidiomycota ou Basidiomycète constituent un vaste embranchement (ou division) des Fungi qui regroupe la plupart des espèces désignées dans la langue courante par le nom de champignon.

Saprophyte : organisme fongique ou bactérien capable de se nourrir de matière organique morte ou en décomposition, la saptomasse.

Nécromasse : masse de matière organique morte présente dans une parcelle, un volume ou un écosystème donné.

Corps fructifère : également appelé sporophore ou sporocarpe est l'organe reproducteur des champignons supérieurs.¹

Granulométrie : rapport des différents composants d'un mélange, d'après la taille des grains.

Mycorhize : résultat de l'association symbiotique, appelée mycorhization, entre des champignons et les

racines des plantes. La mycorhization, entre des champignons et les racines des plantes.² Le mycorhize est une composante majeure de l'édaphon (l'ensemble vivant dans le sol) et de la rhizosphère.

Corps normatifs : les normes sociales et les attentes implicites qui guident le comportement des individus dans une société donnée. Dans le cas des myco-matériaux, les normes érigées à l'exploitation et l'utilisation du matériau dans le domaine de la construction.

Résistance mécanique : capacité d'un matériau à supporter des forces externes sans se rompre ni se déformer de manière permanente.

Résistance à la flexion : contrainte maximale dans la fibre la plus externe. C'est donc la capacité à résister à la déformation ou à la rupture lorsqu'un élément est soumis à une charge qui le courbe ou le plie.

Substrat : matériau qui sert de base ou de support à une réaction chimique, généralement catalysée par une enzyme.

Flexion (mécanique) : sollicitation mécanique qui tend à courber un objet soumis à une charge perpendiculaire à son axe longitudinal.

ELU : l'état limite ultime, qui consiste à vérifier qu'elles ne subissent pas de déformation irréversible sous la charge, et a fortiori qu'elles ne présentent pas de dégradation.

ELS : l'état limite en service, qui consiste à vérifier que leur déformation élastique reste compatible avec le fonctionnement.

Module d'élasticité : rapport entre la contrainte appliqué à un matériau et la déformation qu'il subit dans sa zone élastique.

Norme ISO 178 : Norme internationale définissant les conditions de réalisation des essais de flexion sur un matériau plastiques et composite

¹ TABTI C. Résumé du cours de botanique (L2 Sciences agronomiques et Ecologie et environnement) 2019/2020

² Aurélie Deveau, Garbaye Jean, Pascale Frey-Klett. Des bactéries à la rescousse des champignons symbiotiques, Biofutur, 2008, 24, pp. 22-25. Hal-03910412

Flèche : déformation excessive qui peut causer des fissures dans les cloisons, des problèmes d'étanchéité ou un sentiment d'insécurité. Le calcul de la flèche est donc une vérification cruciale aux ELS.³

³ BENTLEMSAN N. Déformation des poutres fléchies – Méthode de la Double Intégrale, 20 décembre 2022.

I. INTRODUCTION :

« Un réseau invisible, tentaculaire, vivant : sous nos pieds, le mycélium tisse la trame silencieuse de nos écosystèmes. En le découvrant, c'est un nouveau monde architectural qui s'ouvre à nous. »⁴

1. Exposition générale

Le monde actuel se trouve confronté à une crise environnementale et climatique sans précédent, dont la principale origine est l'activité humaine. L'une des causes majeures de ce phénomène est l'intensification de la combustion des énergies fossiles, engendrant une libération exponentielle de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Le secteur du bâtiment constitue l'un des principaux contributeurs à ce phénomène. En France, il a généré en 2021 plus de 43,9 millions de tonnes de CO₂, représentant environ 16 % des émissions nationales, selon les données de l'INSEE. Cette empreinte carbone élevée s'explique en grande partie par la fabrication de matériaux tels que le béton et l'acier, dont les procédés de production sont particulièrement énergivores. Le verre peut également être mentionné, sa mise en forme nécessitant des températures très élevées qui contribuent fortement à son impact environnemental. Le ciment, "le principal constituant du béton, est à l'origine à lui seul d'environ 7 % des émissions mondiales de CO₂".⁵

Face à ce constat, les recherches pour des solutions constructives plus neutres pour l'environnement se multiplient. Ces efforts se concentrent en particulier sur le développement et l'adoption de matériaux de construction plus écologiques, issus de sources non carbonées, renouvelables et recyclables. Ces matériaux alternatifs cherchent à rivaliser avec ceux

traditionnellement utilisés, tels que le béton et ses différents substrats.

Parmi ces alternatives, on retrouve le bois et la terre crue, et certains matériaux biosourcés, comme le mycélium, micro-organisme encore relativement méconnu et réseau filamenteux du champignon.

Au croisement de la biologie, du design et de la construction, le mycélium suscite un intérêt croissant pour ses qualités mécaniques, thermiques et écologiques, tout en incarnant une nouvelle manière de penser la matière : vivante, cultivée, et potentiellement circulaire. Invisible à l'œil nu dans la nature, le mycélium se développe dans les sols, les bois morts ou les matières organiques, jouant un rôle essentiel dans la décomposition et le recyclage de la biomasse. Le mycélium peut ainsi valoriser des déchets agricoles, comme la paille, le chanvre ou le marc de café grâce à son pouvoir enzymatique et fongique en décomposant "la matière organique du sol, la rendant disponible pour d'autres organismes, et peut s'étendre sur de très grandes superficies".⁶

Comme le bois, le mycélium peut croître rapidement mais sa croissance peut être interrompue pour en faire un matériau stabilisé. Sa structure étant dense et légère, il offre de bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique, comparables à des isolants conventionnels tels que la laine de roche ou les mousses expansées " Par exemple, une maison ancienne à Lyon a réduit sa consommation d'énergie de 30 % après l'application d'isolation à base de *champignons*. Ce type de matériau améliore non seulement l'efficacité énergétique, mais contribue également à un habitat plus sain."⁷. De plus, il peut être cultivé localement favorisant alors les circuits courts et réduisant l'impact logistique. Enfin, sa résistance au feu, aux moisissures et aux insectes ne fait pas intervenir de traitement chimique, ce qui le rend plus sain et durable dans l'habitat.

⁴ *Fantastic Fungi. Film documentaire. Réalisation : Louie Schwartzberg. États-Unis : Moving Art, 2019.*

⁵ *DUMÉ, Isabelle. Diviser par 10 les émissions de CO₂ du ciment, c'est possible. Article de presse scientifique, 6 janvier 2022.*

⁶ *HYDROSWISS. Matériaux durables révolutionnaires : le mycélium pour la transition écologique. Article en ligne, 2025.*

⁷ *VINCENT, Fred. L'isolation myco-matériaux : quand les champignons protègent votre habitat. Énergies Eco Renouvelables, s.d.*

Des expériences ont montré que le mycélium agit comme un excellent liant. Dans celles de Alaneme et Al en 2023⁸, ils ont combiné le mycélium avec des co-produits agricoles (paille, chanvre, café, etc...). De même, dans une démarche d'économie circulaire, ils ont pratiqué les mêmes expérimentations en utilisant des produits issus de l'industrie pour former un matériau d'isolation, tout comme les myco-matériaux associés à des co-produits d'usinage. Le myco-matériau a démontré une efficacité nette en comparaison aux actuels polymères synthétiques utilisés dans l'isolation et qui présentent des "inconvenients majeurs en termes de durabilités environnementale"⁹, le myco-matériau est donc un matériau d'avenir pour la construction. La NASA envisage l'usage du mycélium dans des structures auto-croissantes pour l'habitat spatial afin de limiter les coûts logistiques liés aux matériaux de construction comme décrit dans l'article de Lynn Rothschild "Myco-architecture off planet : growing surface structure at destination"¹⁰.

Lors de ces recherches, il a été démontré qu'une bactérie appartenant au mycélium avait la capacité d'utiliser le soleil pour convertir l'eau et le dioxyde de carbone en oxygène et nourriture pour les champignons.

Néanmoins, alors que l'acceptation du rôle isolant du mycélium croît, sa potentielle utilisation structurelle reste largement sous-explorée. Très peu de projets architecturaux ou d'ingénierie envisagent aujourd'hui le mycélium comme un véritable composant porteur, capable de résister à des charges mécaniques importantes. L'exemple emblématique de la Hy-Fi Tower¹¹, conçue par David Benjamin et le studio The Living pour le concours annuel du Young Architects Program en 2014, a certes mis en lumière les possibilités esthétiques et écologiques du matériau, en érigeant une tour composée de 10 000

briques biosourcées à base de tiges de maïs et de mycélium. Toutefois, il est important de noter que cette construction reposait en réalité sur une ossature en bois, assurant la stabilité de l'ensemble. Cette limitation souligne l'écart actuel entre les qualités reconnues du mycélium comme isolant et sa capacité encore expérimentale à jouer un rôle porteur dans des structures à plus grande échelle.

Cette limite d'usage est-elle la conséquence d'un manque d'expérience et de recherche approfondie sur le sujet ? Ou bien résulte-t-elle d'un cadre normatif souvent frileux, lent à intégrer des matériaux émergents, surtout lorsqu'ils bousculent les habitudes constructives établies ? Ou encore leurs performances mécaniques sont-elles un frein conséquent devant des matériaux ayant déjà fait leurs preuves ? Ces questions méritent d'être posées car elles reflètent les tensions actuelles entre innovation matérielle et pratiques réglementaires.

En tant qu'architectes, il nous revient aussi de questionner cet usage quasi inexistant du mycélium structurel sous des angles plus proches de la réalité de notre profession.

D'abord, lors de la phase de conception, il s'agit de s'interroger sur la liberté formelle et constructive qu'offre le mycélium : contraint-il trop fortement le dessin architectural, l'ampleur des volumes et l'ambition spatiale ? Peut-on réellement envisager des portées, des hauteurs, des assemblages complexes sans compromettre l'esthétique ou la fonctionnalité ?

Ensuite, dans la phase de prospection d'entreprises, le mycélium implique-t-il un savoir-faire si spécifique qu'il est difficile à trouver et potentiellement coûteux ? Ce manque de main-d'œuvre qualifiée est-il un obstacle temporaire ou un frein durable à sa généralisation dans les appels d'offres ?

⁸ *Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications*, Kenneth Kanayo Alaneme Sodiq Abiodun Kareem, Justus Uchenna Anaele, Michael Adediran, Tolulope Moyosore Oke, Oluwadamilola Abigael Ajibuwa, Yvonne Onyinye Anabaranze, ScienceDirect, 2023

⁹ *Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial*, Alemu et al 2022

¹⁰ *ROTHSCHILD, Lynn. Myco-architecture off planet: growing surface structures at destination. NASA Ames Research Center, Moffett Field (CA), 2018*

¹¹ *Hy-Fi by The Living. Architizer. Queens, New York (États-Unis), 2014.*

Enfin, et surtout, en phase de chantier, le mycélium peut-il être mis en œuvre dans des conditions réalistes et garantir une structure stable, fiable, voire durable sur le long terme ? Si cette question trouve une réponse positive, alors le mycélium pourrait effectivement devenir une alternative crédible aux matériaux traditionnels comme la brique, le béton ou le bois — non seulement en termes de performance, mais aussi dans une logique de transition écologique et d'innovation architecturale.

2. Le contexte :

Dans un contexte environnemental et sociétal périlleux, il est important de connaître les problèmes rencontrés dès à présent pour apporter des réponses claires afin d'être en mesure de répondre à ces problèmes. Nous sommes face à une crise climatique, à un épuisement des ressources et à de trop nombreux déchets de construction qui demandent une attention particulière et à un besoin grandissant de matériaux biosourcés, recyclables et à faible empreinte carbone. Dans la mesure où le domaine de la construction demande de plus en plus de se concentrer sur de nouveaux matériaux par des certifications et des labels environnementaux (exemple : RE2020, HQE, etc...) qui affinent leurs demandes et les pré-requis pour les obtenir.

Les avancées récentes dans les biomatériaux et la bio-fabrications offrent de nouvelles perspectives d'évolution dans le domaine de la construction, de nos jours. Les travaux de laboratoire explorent dès à présent les champignons et le thalle fongique comme un matériau pour de nombreux domaines. En construction, les recherches tentent de parcourir les limites établies de cet organisme notamment sur ses propriétés mécaniques, isolantes et écologiques du mycélium.

Dans une moindre mesure, le contexte architectural et constructif est ouvert pour les matériaux vivants et les processus de fabrications circulaires. Les villes d'aujourd'hui s'agrandissent encore et encore, et c'est cette problématique qui ouvre l'architecture d'aujourd'hui sur des caractères plus vivants, temporaires, biodégradables et régénératifs. Dans le domaine de l'architecture, le mycélium suscite un intérêt particulier pour sa capacité à relier vivant et construit, remettant en

question les frontières entre croissance naturelle et fabrication humaine.

Il apparaît légitime de s'interroger sur les limites actuelles du myco-matériau. Dans le domaine de l'isolation, de nombreux travaux ont déjà été menés afin d'en caractériser les performances thermiques et acoustiques ; toutefois, plusieurs paramètres demeurent encore à approfondir, notamment l'influence des différentes espèces de mycélium ou des variations de substrats. La compréhension complète de ces facteurs reste un enjeu important pour optimiser le matériau. La question se pose de manière comparable pour les usages structurels. Le béton constitue aujourd'hui le matériau de référence dans la construction, en raison de ses qualités mécaniques et de sa grande polyvalence, malgré certaines contraintes liées par exemple au temps de séchage ou aux variations de résistance en fonction de sa composition. Bien que le myco-matériau ne présente ni les mêmes propriétés mécaniques ni la même échelle d'application, il partage avec le béton une logique de mise en forme similaire : dans les deux cas, le matériau est façonné dans un moule avant de subir un temps de stabilisation, qu'il s'agisse de la prise et du durcissement pour le béton ou de la croissance et du séchage pour le mycélium. Les procédés diffèrent naturellement par leurs exigences techniques, leurs durées et leurs conditions de mise en œuvre, mais reposent néanmoins sur une même idée générale de fabrication d'un matériau consolidé au sein d'une forme définie. Pour le béton, la mise en œuvre est variée, béton coulé en place ou préfabriqué mais aussi la main d'œuvre demandée peut être variée, ce sont des questions légitimes à se poser sur le myco-matériau et ses performances.

3. Les enjeux :

L'objectif de cette recherche est de tester la résistance mécanique de myco-matériaux fabriqués à la flexion avec des quantités de substrats différents. Le choix de l'essai en flexion plutôt qu'en compression permet de tester le comportement du matériau dans des sollicitations courantes pour des éléments de plancher, linteau ou mobilier, où la flexion est déterminante. De plus, les expériences en compressions ont déjà été effectuées dans l'intérêt de panneaux d'isolation acoustique et thermique. Ces expériences ont permis de déterminer les valeurs de références du myco-matériaux et les

différents substrats utilisés afin d'être aux normes d'utilisation dans le cas de panneaux d'isolation. Ce test permet donc de connaître les limites de leur performance dans de nombreux cas d'utilisation.

Afin de mener nos recherches sur les caractéristiques mécaniques en flexion du myco-matériau nous allons réaliser différentes briques échantillons en variant leur composition afin d'observer leur comportement à la flexion, cette méthode permettra d'apporter des données sur les performances structurelles des éléments à petites échelles. Il est important de préciser que cette méthode présente certaines limites : les réalisations demeureront de petite échelle, généralement au format décimétrique, les moyens industriels ne seront pas mobilisés et les échantillons conserveront un caractère artisanal. Par conséquent, les essais effectués resteront simples et ne bénéficieront pas d'une validation selon des protocoles normalisés. Ce choix permet un contrôle manuel de la fabrication. Il limite les coûts de production et reste cohérent avec les tests de résistance à la flexion dans des contextes de design expérimental, d'éléments de mobilier ou encore de modules architecturaux.

Grâce à cette méthode, il sera possible d'organiser les résultats sous la forme d'un tableau d'effort mit ensuite en comparaison avec celui du béton et d'autres éléments structurels comme le bois et l'acier pour déterminer la viabilité de l'utilisation des myco-matériaux comme élément structurel. On peut envisager que le myco-matériau présente un certain potentiel structurel, sans toutefois atteindre les performances du béton qui possède des armatures en acier. Il est également probable que sa résistance soit renforcée par une proportion plus élevée de sciure de bois, dont le rôle dans la matrice pourrait être comparé, de manière conceptuelle, à celui des armatures dans le béton. De même, l'utilisation du Reishi (II.1.c) pourrait offrir de meilleurs résultats, son mycélium étant généralement reconnu pour sa résistance supérieure. Cependant, par soucis de manque de ressource, les expériences ne seront pratiquées qu'avec du Pleurote (II.1.c).

Pour cette méthode, l'essai de flexion permettra d'évaluer la résistance des matériaux à la flexion. Lorsqu'une force est appliquée à un

matériau à une extrémité, l'essai de flexion mesure la réponse du matériau en termes de déformation (élastique, plastique ou ductile et cassant ou fragile). Ainsi, les propriétés mesurées et que l'on peut retrouver dans les différentes recherches¹² sont :

1. Le module d'élasticité en flexion E_{ff}
2. La contrainte de flexion σ_{ff}
3. La déformation en flexion ϵ_{ff}
4. La réponse à la contrainte-déformation.

L'essai de flexion peut se faire de manière artisanale pour imiter le comportement d'un banc de flexion à trois points.

Pour les résultats, nous nous référons conformément aux exigences industrielles à la norme ISO 178 qui définit les critères clés pour l'essai de flexion des plastiques et des composites renforcés de fibre. Elle fournit des instructions détaillées sur les conditions d'essais pour un test correct et précis. Si nos tests sont artisanaux, cette norme nous permettra de déterminer les performances des myco-matériaux en comparaison aux autres matériaux qui respectent la norme ISO 178. Bien que nos tests soient artisanaux, la norme ISO 178 fournit un cadre utile pour interpréter les résultats obtenus, notamment en termes de module d'élasticité, contrainte maximale et déformation à la rupture.

Nous limiterons cette étude à une évaluation des performances du mycélium à une échelle restreinte plutôt que de prétendre valider son usage à grande échelle, sans l'appui expérimental nécessaire.

Nous nous appuyerons ainsi sur un corpus d'études récentes, issues principalement de laboratoires de recherche en matériaux biosourcés, qui mettent en parallèle les propriétés physiques et mécaniques du mycélium avec celles de matériaux plus conventionnels tels que le béton. Densité, résistance à la flexion, comportement face à l'humidité, déformation dans le temps : ces critères feront l'objet d'une analyse critique, confrontée à nos propres essais réalisés à petite échelle.

Ces expérimentations, volontairement restreintes, permettront néanmoins de poser les premières bases d'une compréhension concrète du comportement du mycélium dans un contexte

¹² *Quelles propriétés mécaniques. Dans : Les bétons à hautes performances : du matériau à l'ouvrage. Paris : Presses de l'ENPC, 1990.*

architectural. L'objectif n'est pas d'en démontrer une viabilité définitive, mais de dégager des tendances, des limites, et surtout des pistes pour des recherches futures, plus larges et plus ambitieuses.

4. Problématique et hypothèses :

Ainsi donc, le but premier de ce mémoire est de s'intéresser à la problématique structurelle du myco-matériau et donc de déterminer **dans quelle mesure les propriétés mécaniques mesurées des panneaux de myco-matériaux permettent une intégration constructive, et sous quelles conditions de mise en œuvre.** Nous pouvons émettre l'hypothèse que le matériau possède une résistance à la flexion simple suffisante pour être qualifiée d'élément structurel dans le bâtiment. Dans la composition des myco-matériaux qui sera alors effectuée pour l'expérimentation, l'hypothèse est que la sciure de coco jouerait le rôle de remplissage et de structure homogène (comme substrat fin) et ainsi donc que la paille serait l'élément résistant à la flexion et à la compression. Par le biais d'expérimentation, nous pourrions répondre aux hypothèses énoncées.

II. L'ÉTAT DE L'ART :

Comprendre les myco-matériaux implique avant tout de s'intéresser à leur composant vivant principal : le champignon. Cet organisme complexe, souvent réduit à sa forme visible (le "champignon" que l'on cueille) dissimule en réalité une organisation souterraine et invisible, d'une importance écologique majeure : le mycélium. Dans notre étude, nous ferons donc la distinction entre les différentes parties qui constituent le vivant, cependant, dans les parties suivantes, nous appellerons "champignon" l'espèce qui est constituée de son organe fructifère et de la thalle fongique afin de ne pas se méprendre sur les dénominations. C'est l'étude de son système végétatif qui est essentielle pour saisir les logiques de croissance, de liaison de la matière qui fondent le fonctionnement même des myco-matériaux¹³.

L'état de l'art abordera donc le champignon ainsi que l'organisation filamenteuse appelée le thalle fongique, constituée d'un réseau d'hyphes interconnectées formant le mycélium. La distinction entre le champignon et le mycélium mènera donc à la manière dont ce dernier intervient dans les écosystèmes naturels, avant de présenter les principales espèces étudiées dans le cadre de ce mémoire, notamment le *Pleurotus ostreatus* et le *Ganoderma lucidum*, dont les caractéristiques naturelles influencent directement les propriétés du matériau obtenu.

Dans le cadre de la construction pour ce mémoire, il sera très important d'aborder les différentes résistances mécaniques d'un matériau et notamment celles face aux contraintes de compression et de flexion pour faire écho à la structure filamenteuse du mycélium dans un myco-matériau¹⁴. Ces contraintes, alors omniprésentes dans les éléments de structure, déterminent la tenue

¹³ RAPIOR, Stéphane et FONS, François. *La classification des champignons. Annales de la Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault*, 2006, vol. 146, n°4, p. 81-86.

¹⁴ ELSACKER, Elise, et al. *Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. Article scientifique, s.d.*

du matériau dans le temps, sa rigidité et sa capacité à remplacer partiellement les matériaux conventionnels lorsque ceux-ci révèlent des propriétés importantes contre des contraintes mécaniques (ici, la flexion simple).

1. Le champignon : une organisation vivante

a. Distinction entre champignon et mycélium :

Le terme de champignon est le nom commun donné à l'ensemble de l'organisme visible et invisible, mais il est important de faire la distinction entre le champignon et le mycélium qui participent différemment à la survie de l'écosystème. Le champignon, appelé aussi sporophore ou carpophore, est la partie visible et reproductive du mycélium (équivalent de la fleur et du fruit). Le mycélium, quant à lui, est le système végétatif (fongique) qui se développe sous terre et qui est responsable de la digestion de la matière organique et de la nutrition des champignons¹⁵. Il représente le régime racinaire du champignon.

Il est important de faire la distinction entre le champignon et le mycélium (*figure 1*) :

Caractéristiques	Champignon (corps fructifère)	Mycélium (réseau souterrain)
Rôle	Fruit du champignon (partie émergée, souvent visible)	Réseau souterrain racinaire

¹⁵ LETHIELLEUX-JUGE, D. *Étude morphologique de l'architecture fine du mycélium de champignons mycorrhiziens arbusculaires du genre Glomus. Travail académique, s.d.*

Fonction	La reproduction (spore)	Échanger avec la nature environnante, croître
Durée de vie	Éphémère	Peut perdurer pendant plusieurs années.

fig 1. Tableau de distinction entre le champignon et le mycélium – Alice BICHAT

b. Le mycélium dans les écosystèmes

Le mycélium remplit principalement trois fonctions. Il sécrète d’abord des enzymes capables de décomposer la matière organique en fragmentant ses polymères et monomères. Il assure ensuite l’absorption des composés carbonés nécessaires au maintien de ses cellules, notamment par diffusion facilitée et par transport actif. Enfin, par le phénomène de mycorhization,¹⁶ il joue un rôle essentiel dans de nombreux écosystèmes en améliorant l’absorption de l’eau et des nutriments par diverses plantes [fig. 2]. Son cycle de décomposition et assimilation joue un rôle principal dans le cycle du carbone, relâchant une partie du carbone en dioxyde de carbone dans l’atmosphère où les plantes peuvent s’en nourrir mais aussi dans le puits de carbone qu’est le sol.



¹⁶ TEDERSOO, Leho ; BAHAM, Mohammad ; ZOBEL, Martin. *How mycorrhizal associations drive plant population and community biology*. Science, vol. 367, 2020, eaba1223.

fig 2. Échange entre le mycélium et les végétaux - Alice BICHAT

C’est en contribuant à la décomposition de la nécromasse qu’il améliore la partie organique du sol. Le mycélium dans la nature est un acteur central dans la biodiversité du champignon. Il permet la décomposition de la matière organique comme les feuilles, le bois ou d’autres matières organiques et les transforme en nutriments pour les plantes et le sol. Le réseau de mycélium renforce la cohésion du sol et la capacité à retenir l’eau dans celui-ci ce qui permet de freiner l’érosion et maintenir la vie dans le sol. C’est une relation symbiotique que permet le mycélium et par extension le champignon, relation mycorhiziennes avec les plantes : la toile étendue que représente le mycélium nommé *wood wide web* permet le transfert mutuel entre les arbres et les champignons. “Cette association de deux ou plusieurs organismes vivants, profitable à chacun d’entre eux, est qualifiée de symbiose mutualiste”¹⁷.

Ainsi, le mycélium procède aux échanges pour les nutriments et les minéraux avec les végétaux mais c’est aussi un acteur important pour la régénération des sols car il intervient dans la décomposition de la matière organique comme les feuilles, le bois ou les résidus végétaux.

c. Variétés de champignons et types de mycélium

A travers le monde, il existe différentes espèces de champignons et ainsi donc, de mycélium aux caractéristiques distinctes. Dans le cadre de ce mémoire afin de comprendre les limites du mycélium comme ressource nécessaire dans le développement de matériaux de construction structurel, nous nous sommes principalement intéressés à deux espèces.

Le *Pleurotus ostreatus*, ou encore, pleurote en huître, est un champignon saprophyte qui se développe principalement sur le bois mort ou en décomposition, notamment les feuillus comme le hêtre ou le peuplier. Il est répandu dans les forêts tempérées et subtropicales, où il joue un rôle important dans la dégradation de la lignine et de la

¹⁷ Fiche technique : la symbiose mycorhizienne, agroforesterie.fr,

cellulose. Il se distingue par une forte capacité à coloniser les substrats organiques mais aussi pour sa croissance rapide, ce qui en fait une espèce très adaptable. Son mycélium se propage efficacement dans divers milieux riches en matière organique, comme la paille, les copeaux de bois ou les résidus agricoles¹⁸.



fig 3. *Pleurotus Ostreatus* - adam haritan

Le *Ganoderma lucidum* (reishi ou lingzhi) est un champignon basidiomycète (caractérisé par la production de spores sexuées appelées basidiospores) qui pousse naturellement sur les troncs et souches d'arbres feuillus, affaiblis ou morts. On le retrouve dans les zones forestières humides (Asie, Europe, Amérique du Nord). Il possède un développement plus lent que celui du pleurote, mais son mycélium forme un réseau très dense capable de survivre plusieurs années dans le même substrat. Ce champignon est également capable de s'adapter à des conditions environnementales variées.



¹⁸ AGROFORESTERIE.FR. Fiche technique : la symbiose mycorhizienne. Ressource en ligne, s.d.

fig 4. *Ganoderma Lucidum* - Hekma Center

Caractéristique	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Ganoderma Lucidum</i>
Vitesse de croissance	Élevée	Modérée / lente
Capacité de propagation	Élevée	Lente
Colonisation du mycélium	Rapide / différents substrats	Lente / meilleure cohésion des substrats colonisés
Densité	Moindre	Forte
Réseau de mycélium	Fin / léger	Compact / résistant

fig 5. Tableau comparatif du *Pleurotus Ostreatus* et du *Ganoderma Lucidum*

Ainsi, les deux espèces incarnent deux stratégies complémentaires :

- Le *Pleurotus* favorise la rapidité et l'efficacité de colonisation, utile pour des matériaux légers ou produits à grande échelle ;
- Le *Ganoderma* privilégie la durabilité et la résistance, ouvrant la voie à des applications nécessitant plus de robustesse.

Ces différences influencent directement les propriétés du matériau obtenu : un mycélium à croissance rapide permet une production efficace et à moindre coût, tandis qu'un mycélium plus dense offre de meilleures performances structurelles. Le choix de l'espèce fongique dépend du domaine d'application recherché, qu'il s'agisse d'isolants légers, de briques plus résistantes ou encore de textiles innovants.

2. La composition et les propriétés du mycélium

a. Structure microscopique

Comme mentionné précédemment, ce que nous appelons couramment « le champignon » correspond en réalité au thalle fongique, c'est-à-dire au corps végétatif de l'organisme. Comme l'illustre le schéma présenté en figure 6, ce thalle se compose de plusieurs éléments : le champignon au sens macroscopique, le mycélium qui en constitue la structure filamenteuse principale, et les hyphes, unités cellulaires élémentaires formant le réseau mycélien.

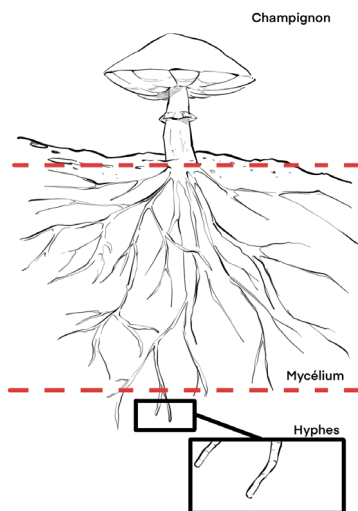


fig 6. Constitution du thalle fongique - Alice BICHAT

Le mycélium représente la structure végétative constituée de Hyphes, des filaments ramifiés minuscules qui s'étendent et progressent, c'est une structure qui se développe dans le sol au sein de matières organiques en décomposition. Certains de ces filaments sont appelés Rhizomorphes car ils sont plus épais ce qui permet le transport de nutriments sur de plus longues distances. A la différence du mycélium, les hyphes connaissent une phase de croissance individuelle afin d'atteindre des zones à la recherche de ressources. Bien que les deux concepts soient nettement similaires, leur rôle spécifique est important dans la biologie fongique.

Ainsi, il est possible de réunir leurs

caractéristiques dans un tableau comparatif afin de les nettement les distinguer :

caractéristique	Hyphes	Mycélium
Définition	Filaments individuels	Réseau d'hyphes interconnectés
Structure	Filaments simples et allongés	Réseau d'hyphes dense et ramifié
Fonction	Capter des nutriments et étendre l'organisme	Distribuer les nutriments dans l'organisme
Taille	petit et simple	grand et complexe
Rayon d'action	s'étend individuellement	large sous la forme d'un réseau
Importance	unité de croissance	structure principale

fig 7. Tableau comparatif des hyphes et du mycélium

- Erik Collado Vidal

b. Propriétés comme matériau

Le mycélium présente plusieurs propriétés qui en font une ressource particulièrement intéressante en tant que matériau. L'une de ses caractéristiques est sa légèreté et sa rigidité (dépendante de l'origine du mycélium employé). La structure filamenteuse des hyphes forme un réseau

dense et poreux ce qui donne alors un matériau facile à manipuler et transporter¹⁹.

Le mycélium a déjà démontré ses capacités d'isolation thermique et acoustique. Les cavités internes emprisonnent l'air, ce qui limite les transferts de chaleurs et atténue le son. Ce matériau possède des qualités comparables aux isolants conventionnels comme la laine ou des mousses synthétiques. Valérie Grenon, dans le mémoire "*Caractérisation des propriétés du mycélium de Pleurotus ostreatus comme liant de fibres végétales pour un matériau isolant*"²⁰, compare les actuels matériaux isolants thermiques et acoustique avec les myco matériaux à l'aide du déphasage thermique, la capacité thermique, des mesures de porosités, l'inflammabilité ainsi que la transmission et l'absorption du son. Ainsi "il est possible de partiellement infirmer (...) [que] des propriétés isolantes [sont] similaires entre le matériau à base de mycélium et la laine de chanvre" (p.115). Elle démontre aussi la résistance à la compression "50 fois plus importante pour le matériau à base de mycélium".

Contrairement aux isolants synthétiques, le mycélium est un matériau vivant qui peut être cultivé à partir de déchets agricoles ou forestiers et qui, par la suite, a la possibilité d'être composté en fin de vie. Son cycle de production s'inscrit ainsi dans une logique écologique et circulaire, réduisant considérablement son impact environnemental.

En comparaison des matériaux conventionnels, on retrouve un équilibre avec le mycélium : les performances sont proches de certains isolants industriels avec un empreinte écologique minimale. Le mycélium représente une nouvelle manière d'habiter nos structures afin de correspondre au mieux aux nouvelles qualifications environnementale demander dans le domaine du bâtiment (exemple : la certification HQE)

¹⁹ ARIFIN, Y. H., et al. *Mycelium fibers as new resource for environmental sustainability*. *Procedia Engineering*, 2013.

²⁰ GRENON, Valérie. *Caractérisation des propriétés du mycélium Pleurotus ostreatus comme liant de fibres végétales pour un matériau isolant*. Montréal, 9 novembre 2023.

3. Le potentiel du mycélium comme ressource matérielle

a. Applications hors construction

- **Emballage biodégradable (substitut au plastique).**

La start-up The Magical Mushroom Company (MMC) produit à grande échelle des emballages dérivés du mycélium breveté par Ecovative Design. Avec la récupération de chanvres, de houblon ou de bois, le matériau produit avec le mycélium devient un emballage biodégradable et résistant.

- **Mycorémédiation (dépollution des sols, eaux).**

La Mycoremédiation est un processus utilisant le mycélium afin de dégrader ou diminuer les contaminants dans l'environnement. Pour ce faire, certains mycéliums sont hyper accumulateurs et donc stimulent l'activité microbienne et enzymatique pour réduire les toxines in situ.²¹ Plusieurs espèces de champignons sont utilisées pour éliminer efficacement le plomb, le cadmium, le nickel, le chrome, le mercure et d'autres contaminants des eaux usées.

b. Applications en construction

- **Isolation et remplissage.**

Plusieurs entreprises telles que GPS Climat utilisent dès à présent des panneaux de mycélium pour faire office d'isolant thermique et acoustique.

²¹ BASSIMON, Chloé. *Mycorémédiation d'un sol industriel co-contaminé en métaux et hydrocarbures aromatiques*. Thèse de doctorat en chimie organique. Normandie Université, 2025.



Les panneaux sont fabriqués à partir d'un substrat organique sur lequel pousse le mycélium (partie végétative d'un champignon). Le panneau est traité à 110°C en fin de procédé pour obtenir un matériau inerte. Le développement d'un isolant à base de mycélium étant en phase exploratoire, son utilisation dans la construction est actuellement déconseillée. Elle nécessite la validation de la durabilité quant à la résistance face au risque de moisissures par des laboratoires agréés.

Plus d'informations sur les isolants biosourcés et les essais mentionnés dans notre

Composition

Matières premières : résidus organiques (agriculture, fibres végétales) et mycélium
Adjuvants fongicides et ignifuges : aucune information disponible, probablement aucun.

Format

Épaisseurs : 20-200 mm
Longueurs : 1200 mm
Largeurs : 600 mm
Disponible en blocs rigides

Propriétés d'isolation

Conductivité thermique [EN 12667]: $\lambda_{23^{\circ}\text{C},50\%} = 0,04-0,18 \text{ W/m.K}$

Capacité thermique massique : $C_{p, \text{non certifié}} = \text{non disponible}$

Densité [EN 1802]: $\rho = 57-99 \text{ kg/m}^3$

Résistance à l'écoulement d'air [ISO 9903-2]: non disponible

Épaisseur théorique pour R = 5 m².K/W : $e = 200-400 \text{ mm}$

fig 8. *Panneaux de myco-matériaux isolant et performance thermique- BUILD WISE*

Stratzer, lors de la rénovation de son édifice à remplacer le gypse qui séparait les bureaux par des panneaux de myco matériaux pour le revêtement intérieur.

- **Expérimentations structurelles (Hy-Fi Tower, projets exploratoires).**

La Hy-Fi tower produite par le Studio The Living pour le Museum of Modern Art et le MoMA PS1 est une tour composée de briques organiques soutenue par une structure en bois. Cette structure est innovante et s'inscrit dans les nouvelles discussions de la construction dans l'environnement car sur le long terme²². C'est une belle démonstration de l'architecture durable avec des

mode de construction innovant et qui s'inscrit dans le cycle naturel du carbone.



Fig 9 : *Hy-Fi tower - David Benjamin et le studio The Living*

- **Limites actuelles (normes, durabilité, portance).**

Les performances de ce matériau ont déjà été prouvées concernant son isolation acoustique ainsi que thermique. Les nouvelles avancées technologiques et scientifiques permettent un développement exponentiel des nouvelles techniques de construction. Ainsi donc, les briques de myco-matériaux ont déjà prouvé leur capacité structurelle dans l'absorption des chocs. En ce qui concerne la résistance en compression, les essais montrent que les myco-matériaux peuvent avoir des propriétés mécaniques supérieures avec des taux de substitution de 90% de fines briques, ce qui améliore leur résistance à la compression. C'est donc un matériau polyvalent.

Cette polyvalence s'explique par la nature même du mycélium, capable de lier des particules lignocellulosiques ou minérales tout en conservant une structure légère et poreuse. Bien que ses performances mécaniques restent inférieures à celles des matériaux structurels conventionnels, les résultats expérimentaux et les études de référence

²² *Hy-Fi by The Living. Architizer. Queens, New York (États-Unis), 2014.*

montrent que le myco-matériau présente un potentiel pertinent pour des applications non structurelles, notamment lorsqu'il est associé à un système porteur indépendant. Son comportement en compression, combiné à ses capacités d'absorption d'énergie et à ses performances isolantes, ouvre ainsi des perspectives d'usage dans le domaine du bâtiment, en particulier pour des éléments de remplissage, d'isolation sous toiture ou de composants hybrides intégrés à des cadres porteurs en acier ou en bois.

c. Perspectives globales

- **Économie circulaire et valorisation des déchets agricoles.**

Certaines entreprises font pousser le mycélium dans des formes adaptées aux besoins de la population ce qui peut, dans certains secteurs, remplacer la mousse ou le plastique. C'est un allié de choix dans les objets jetés car c'est un produit qui peut se dégrader rapidement sans polluer et qui conserve une place de choix dans le cycle du carbone.

4. La résistance mécanique des matériaux biosourcés :

a. La notion de flexion :

Dans le domaine de la construction, les éléments sont soumis à des contraintes et des sollicitations mécaniques qui caractérisent le comportement de ces matériaux : traction, compression, cisaillement, flexion.

La flexion, plus particulièrement, sera notre élément d'étude. Elle intervient lorsque la charge appliquée est essentiellement perpendiculaire à l'axe principale de l'élément d'étude (ex : poutre, linteau, plancher) ce qui crée une déformation courbée (fig 7).

Dans le cas de la déformation, une moitié de la section passe en traction et l'autre en compression (fig 7). Cette description est caractéristique des recherches en RDM (résistance des matériaux) et en mécanique des matériaux. Ainsi, la condition de résistance en flexion peut se

formaliser par la formule de Navier appelée aussi équation de flexion :

$$\sigma(y) = M \cdot y / I$$

$\sigma(y)$: contrainte normale en une fibre

y : distance entre la fibre neutre et la fibre observée,

M : le moment fléchissant,

I : le moment d'inertie de la section.

La contrainte maximale \max dans la section la plus sollicitée doit rester inférieure à la contrainte admissible R_{pe} :

$$\max R_{pe}$$

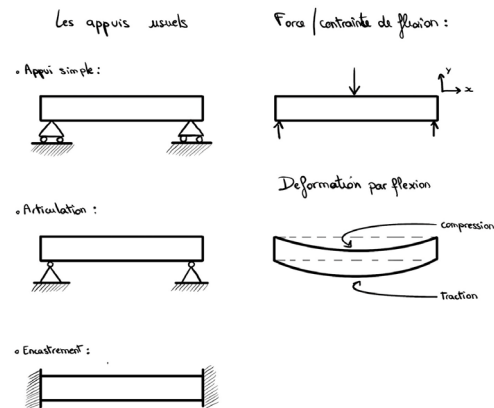


fig 10. Schémas des différents appuis, force et déformation de la flexion - Alice BICHAT

b. L'expérimentation de la résistance à la flexion :

Afin de déterminer la résistance à la flexion d'un matériau, on procède à un essai en flexion normalisé. Le principe de cette expérience et d'enregistrer la courbe contrainte-déformation du matériau par l'intermédiaire d'un graphique qui traduit alors les différentes phases de réponses à l'effort jusqu'à la rupture :

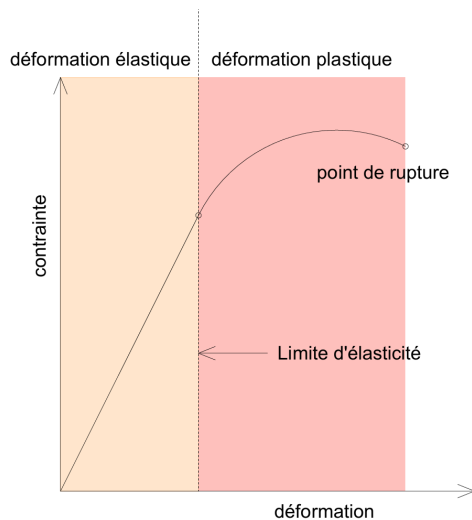


fig 11. Courbe contrainte-déformation caractéristique du comportement d'un matériau à l'issu d'un essai de flexion - Alice BICHAT.

On enregistre 3 domaines :

- Domaine élastique linéaire : face à l'effort en flexion, la contrainte augmente proportionnellement à la déformation. Le matériau retrouve sa forme initiale dès que la charge est supprimée. Ce comportement suit la loi de Hooke

$\sigma = E \cdot \varepsilon$ C'est la phase qui traduit la rigidité intrinsèque du matériau.

- Domaine plastique (ou non linéaire) : le matériau subit des déformations irréversibles. La contrainte continue d'augmenter mais moins rapidement que dans la zone élastique.

- Zone de rupture : comme son nom l'indique, la contrainte atteint son maximum et le matériau cède. La transition entre domaine élastique et rupture est souvent brutale.

Ainsi, nous sommes en mesure de déterminer le module d'élasticité, de rigidité, la contrainte maximale admissible, la ductilité ou fragilité du matériau et ainsi de comparer objectivement et efficacement différents matériaux biosourcés.

²³ FOREST PRODUCTS LABORATORY (USDA). *Engineering and Design*. 30 mai 2025.

²⁴ MATON, Inès. *Conception éco-responsable : comment les matériaux biosourcés et géosourcés*

c. Les matériaux biosourcés et leur comportement en flexion :

Dans le cas des matériaux biosourcés face aux efforts de flexion, nous avons des résultats assez disparates car leur résistance est variable selon la nature, la densité, l'orientation des fibres ou encore le procédé en mise en œuvre.

Dans le rapport du Forest Products Laboratory²³ (USDA), le bois d'œuvre présente une bonne à très bonne performance en flexion bien que les propriétés dépendent fortement de l'essence, de l'humidité et de la qualité du bois.

Pour le chanvre, le lin et les composites végétaux, les recherches sont peu concluantes, cependant, la résistance à la flexion dans le cas des composites végétaux dépend fortement de l'orientation des fibres, de la matrice et du traitement²⁴.

Dans les matériaux biosourcés capables de résister en flexion, nous avons le bambou avec une structure très fibreuse et performante en rapport masse/résistance, les valeurs peuvent parfois atteindre >150MPa dans certains procédés.

Pour conclure, nous pouvons expliciter les résultats sous la forme de la figure 9 :

fig 12 : tableau et frise des performances des matériaux en flexion-Alice BICHAT

Matériau	Catégorie	Résistance en flexion Moyenne	Notes
Acier de construction (ex : S235)	Conventionnel	235 MPa	Structurel
Béton armé (selon composition)	Conventionnel	3-5 MPa	Structurel (associé à des armatures)

réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Mémoire de fin d'études. Université de Liège, 2024-2025, p. 25-30.

			aciers pour la flexion)
Béton fibré (selon fibres et dosage)	Conventionnel	5-15 MPa	Structural (dalles préfabriqués)
Epoxy conventionnel	Conventionnel (polymère)	100-130 MPa	Non structural
Bois (ex : Épicéa, perpendiculaire au fil)	Biosourcés	40-80 MPa	Structural
Panneau de fibres de bois (MDF)	Biosourcés (isolant et remplissage)	20-40 MPa	Non structural
Bio-béton de chanvre	Biosourcés / composite	0.5-2 MPa	Non structural
Bio béton (avec biomasse)	Biosourcé (biocomposite)	0.5-9.5 MPa	Non structural
Composite époxy biosourcé	Biosourcés / composite	80-120 MPa	Non structural

d. Les myco-matériaux en compression :

Dans le cas du comportement à la compression pour les myco-matériaux, les chercheurs Elise ELSACKER, Simon VANDELOOK, Joost BRANCART, Eveline PEETERS et Lars DE LAET²⁵ ont pratiqué des essais de compression uni axiale sur les composites (espèce utilisée : *Trametes versicolor*) combiné à différents types de fibres lignocellulosiques (chanvre, lin, déchets de lin, pois et paille).

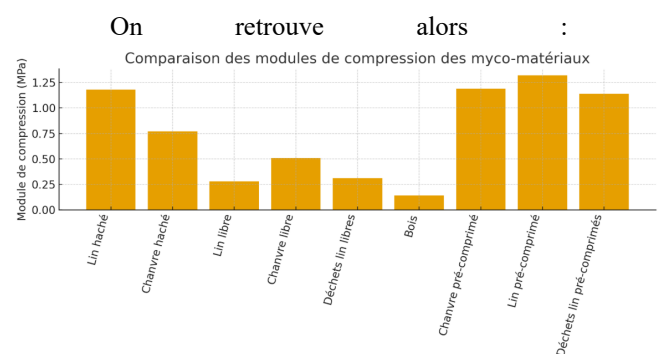
Dans les valeurs rapportées, les modules d'Young en compression exprimé en MPa

²⁵ ELSACKER, Elise, et al. *Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates*. Article scientifique, s.d.

démontrent une variation des performances selon la nature des fibres et surtout leur état de préparation (fibres libres, hachées, tow (mèche), pré-comprimées). Mais de manière générale, les fibres hachées donnent de meilleurs résultats grâce à une densité plus élevée.²⁶

Myco-matériaux et différents substrats	Module de compression (MPa)
Lin haché	1.18
Chanvre haché	0.77
Lin libre	0.28
Chanvre libre	0.51
Déchets de lin libres	0.31
Bois	0.14
Chanvre pré-comprimé	1.19
Lin pré-comprimé	1.32
Déchets de lin pré-comprimés	1.14

fig 13. Tableau comparatif des résultats de compression avec les données de "Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates" - Alice BICHAT



²⁶ AGROFORESTERIE.FR. Fiche technique : la symbiose mycorhizienne. Ressource en ligne, s.d.

fig 14. Graphique de comparaison des modules de compression des myco-matériaux - Alice BICHAT

Avec les données récoltées par les expériences, les résultats obtenus pour les myco-matériaux montrent des modules d'Young très faibles, compris entre environ 0,1 et 1,3 MPa selon le type de fibres utilisées et selon que les échantillons ont été pré-comprimés ou non. Ces valeurs placent les composites mycéliens parmi les matériaux à très faible rigidité, ce qui est cohérent avec leur structure interne très poreuse et majoritairement organique.

À titre de comparaison, les matériaux de construction conventionnels comme le bois, le béton ou l'acier présentent des modules de plusieurs ordres de grandeur supérieurs. Le bois, selon les essences, varie généralement entre 7 000 et 15 000 MPa, tandis que le béton structurel se situe autour de 25 000 à 35 000 MPa. L'acier, matériau de référence pour la rigidité, dépasse largement ces valeurs avec un module d'environ 210 000 MPa. Dans ce contexte, la rigidité des myco-matériaux apparaît donc inférieure d'un facteur allant de 10 000 à plus de 200 000 par rapport aux standards de construction structurelle.

Même lorsqu'on compare les myco-matériaux à d'autres matériaux biosourcés dits « légers », comme les panneaux de fibres végétales, le bambou ou les composites chanvre-chaux, l'écart reste significatif. Le bambou, par exemple, atteint des modules de l'ordre de 20 000 MPa, tandis que les panneaux en fibres végétales compressées dépassent fréquemment 100 à 1 000 MPa selon les procédés. Les composites chanvre-chaux, bien que nettement plus tendres que le bois, conservent des rigidités situées autour de 200 à 500 MPa. À l'inverse, les myco-matériaux étudiés n'excèdent pas quelques MPa, même dans leurs configurations les plus denses.

Ainsi, même si certains choix de fibres (lin haché, chanvre pré-comprimé, déchets de lin densifiés) permettent d'améliorer légèrement la rigidité des échantillons, les myco-matériaux se distinguent avant tout par une flexibilité élevée, une faible rigidité et une réponse mécanique proche de matériaux mous ou isolants. Ces résultats confirment que leur vocation actuelle se situe principalement dans des usages non structurels, notamment pour l'isolation, l'absorption acoustique

ou la fabrication de composants légers, plutôt que dans des applications nécessitant une résistance ou une rigidité structurelle élevée.

5. synthèse :

Le mycélium constitue la partie végétative du champignon, formant un réseau filamenteux capable de coloniser et de lier des substrats lignocellulosiques. Contrairement au champignon visible, le mycélium agit comme un liant biologique, dont les propriétés dépendent de l'espèce fongique, du substrat utilisé, des conditions de croissance et du procédé de séchage. Cette nature vivante implique une variabilité intrinsèque du matériau, qui le distingue fondamentalement des matériaux industriels conventionnels. Les myco-matériaux sont classés parmi les matériaux biosourcés légers et poreux, aux performances proches de celles des mousses isolantes. Les usages existants documentés concernent principalement l'isolation thermique et acoustique, les éléments de remplissage ou des structures expérimentales à faible sollicitation mécanique. Mais les comparaisons avec des matériaux conventionnels (bois, béton, composites végétaux) montrent que les performances mécaniques du mycélium sont nettement inférieures aux matériaux structurels en compression malgré les différents substrats assimilés.

La flexion est une sollicitation centrale dans le domaine du bâtiment, notamment pour les panneaux, les planchers mais aussi les éléments de toiture. La flexion combine alors compression, traction et cisaillement ce qui en fait un bon indicateur global du comportement mécanique d'un matériau. Les normes de référence (ISO 178, ASTM D790) constituent un cadre méthodologique pertinent, même lorsqu'elles sont adaptées à des essais artisanaux ou exploratoires.

L'état de l'art inscrit donc les myco-matériaux dans une logique d'économie circulaire, de valorisation de déchets agricoles ou de chantier et de réduction de l'empreinte carbone des matériaux. Toutefois, il souligne également que l'intérêt environnemental ne peut se substituer à une analyse technique rigoureuse et que l'intégration architecturale doit composer avec les limites mécaniques du matériau.

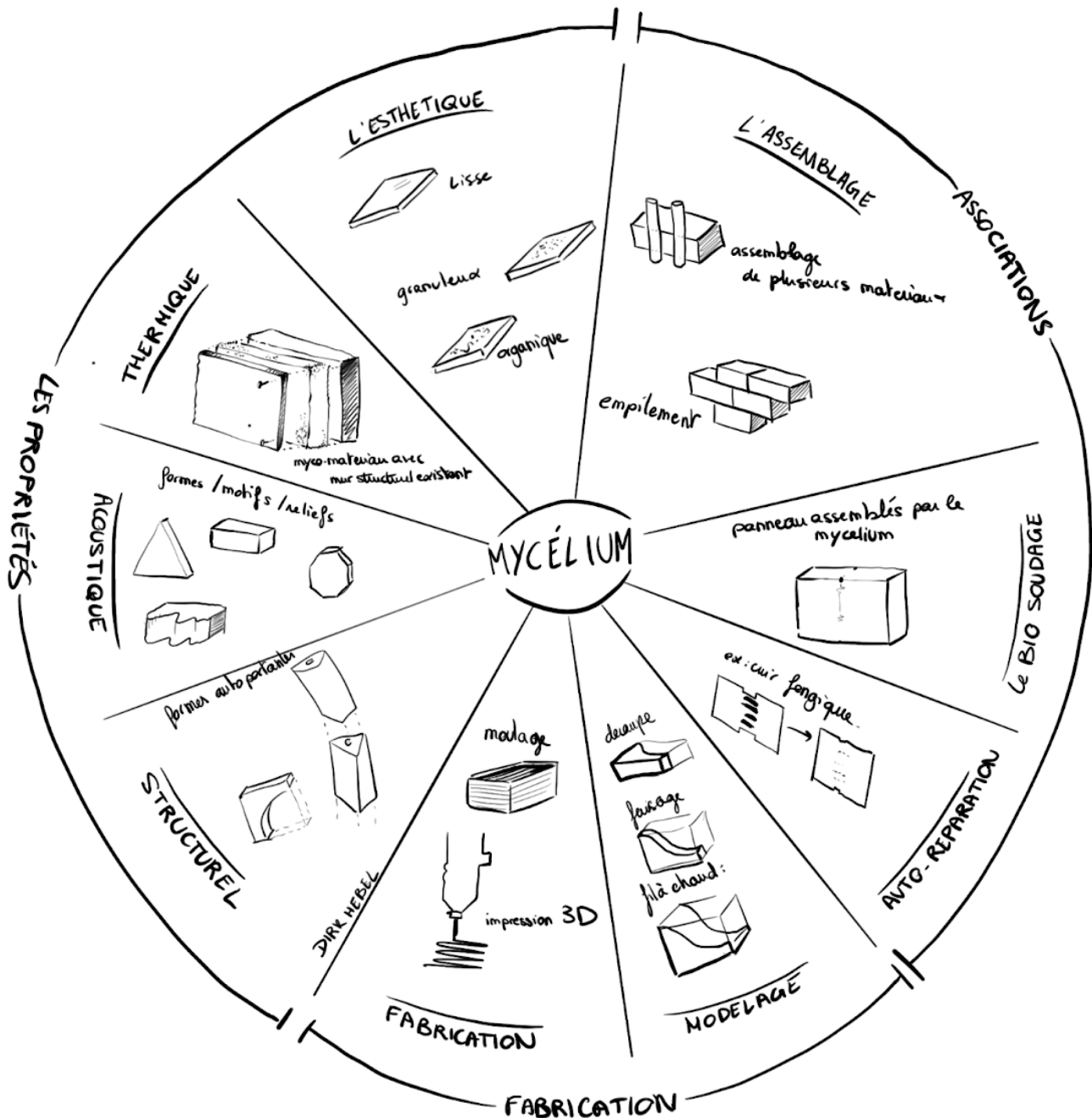


fig 15. schéma des recherches actuelles établies sur les myco-matériaux - Emilien Fillion

III. ETUDES DE CAS ET EXPÉRIMENTATIONS :

1. L'expérimentation

a. Méthode de recherche

L'expérimentation a pour objectif d'évaluer la résistance mécanique à l'effort de flexion simple des myco-matériaux aux quantités de substrat différentes afin de déterminer ses performances structurelles en comparaison avec d'autres matériaux bio-sourcés sur le domaine expérimental équivalent.

- *Pleurotus Ostreatus* (pleurote)²⁷

Cette espèce est facilement trouvable, l'objectif est de faire varier les substrats afin de déterminer le rôle de ceux-ci dans les performances des briques de myco-matériaux.

b. Hypothèse de l'expérimentation

L'hypothèse principale considère que le myco-matériau développé pourrait présenter une résistance à la flexion simple suffisante pour être envisagé comme un élément à potentiel structurel dans le domaine du bâtiment. Cette hypothèse repose sur l'idée que, malgré la nature organique et légère du matériau, la croissance du mycélium pourrait générer une cohésion interne lui permettant de supporter des charges en flexion de manière satisfaisante.

L'hypothèse secondaire propose que la sciure de bois ou de coco agirait comme un remplissage fin assurant l'homogénéité du substrat, tandis que la paille jouerait un rôle comparable à celui d'armatures internes, contribuant davantage à la résistance mécanique, notamment en flexion et en compression. Cette répartition fonctionnelle entre

substrat fin et fibres longues pourrait ainsi renforcer la performance globale du myco-matériau.

La confection des myco-matériaux permet d'établir un parallèle entre le mycélium et la colle au formol utilisée dans la fabrication du MDF (Medium Density Fiberboard)²⁸. Dans le MDF, la colle synthétique agit comme un liant chimique, reliant entre elles les fibres de bois pour former un matériau dense et homogène. Dans le cas des myco-matériaux, ce rôle est assuré naturellement par le mycélium du champignon, qui colonise et soude les particules du substrat au cours de sa croissance. Ainsi, le mycélium agit comme un liant biologique, assurant la cohésion du matériau sans recourir à des composants toxiques ou issus de la pétrochimie. Ce parallèle met en évidence le potentiel du mycélium comme alternative écologique aux colles industrielles, tout en démontrant qu'un processus vivant peut remplacer une réaction chimique artificielle dans la fabrication des matériaux.

c. Choix des matériaux



fig 16. *Pleurotus Ostreatus* (Pleurote) - *O* Champignon

- Champignon :
 - *Pleurotus ostreatus* (pleurote), pour sa croissance rapide et sa culture aisée.
- Substrats testés :
 - Paille (élément fibreux jouant un rôle d'armature souple)
 - Sciure de bois de feuillus (élément plus rigide, jouant le rôle du sable dans le béton)

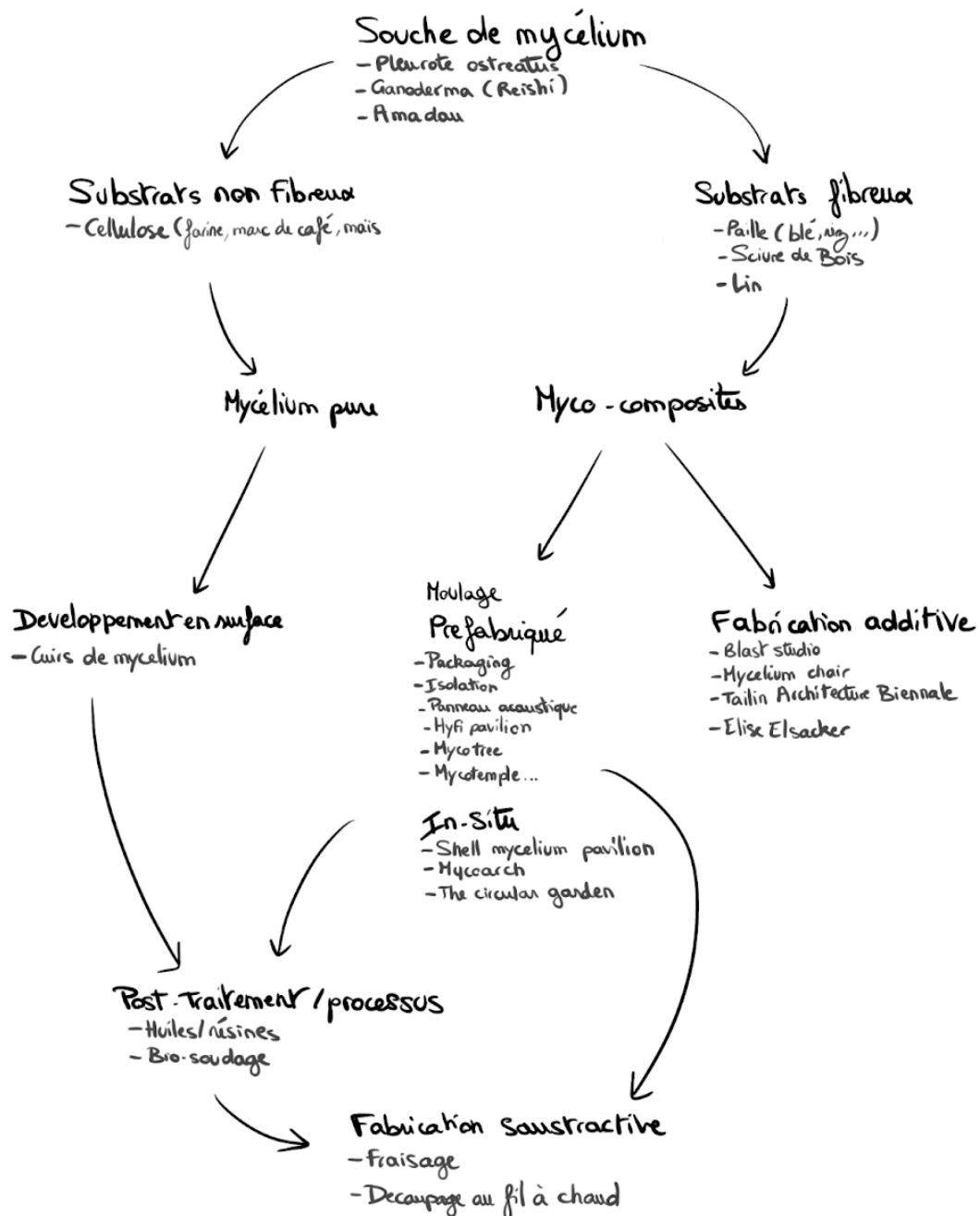
²⁷ CLAVEL, Marine. *Pleurotus ostreatus : un champignon aux multiples activités thérapeutiques*. Sciences pharmaceutiques, 2024.

²⁸ FOREST PRODUCTS LABORATORY (USDA). *Engineering and Design*. 30 mai 2025.

- Matériel annexe :
 - boîtes de culture,
 - sacs de congélation (moules),
 - four, thermomètre,
 - balance,
 - boîte noire ou placard d'incubation,
 - Mortier.

d. Préparation des échantillons :

fig 17. Organigramme de fabrication des myco-matériaux-réalisation expérimentale - Alice BICHAT



i. Stérilisation du substrat, préparation de la sciure :

Avant l'inoculation, les substrats destinés à la culture du mycélium doivent être soigneusement nettoyés et stérilisés afin d'éliminer toute contamination par d'autres micro-organismes (bactéries, moisissures ou spores concurrentes). Cette étape est essentielle, car la présence d'organismes étrangers peut ralentir la croissance du mycélium ou compromettre le développement du matériau. La stérilisation s'effectue le plus souvent par immersion dans de l'eau chaude pendant une dizaine de minutes, ce qui permet de neutraliser la majorité des agents pathogènes²⁹. Une fois chauffés, les substrats sont essorés afin d'éliminer l'excès d'eau, tout en conservant un taux d'humidité favorable à la colonisation fongique.

ii. Mélange :

Les mélanges sont réalisés selon différentes proportions, réparties comme suit :

Champignon	déchets de chantier (%)	Sciure (%)	Paille (%)
pleurote	0	20	80
pleurote	0	50	50
pleurote	0	80	20

Fig 18. Tableau de répartitions dans les prototypes - BICHAT Alice.

iii. Mise en forme et incubation

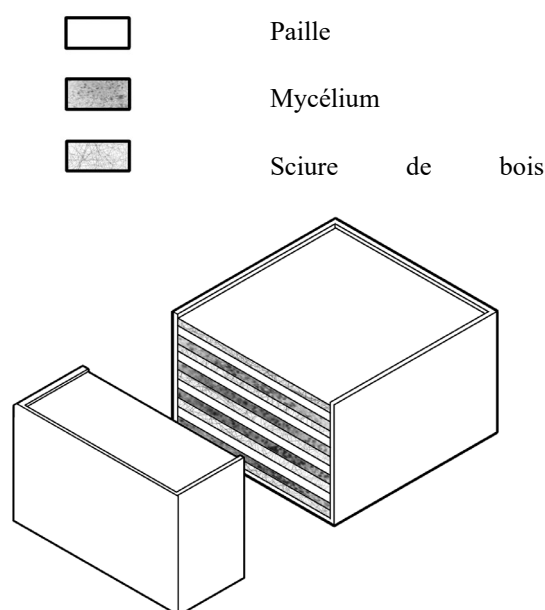


Fig 19. Composition de la brique de myco-matériau avant incubation - Alice BICHAT

Les mélanges sont placés dans des moules doublés de sacs plastiques (de type congélation) pour assurer la forme des briques sans contact avec de l'eau ou d'autres micro-organismes (on évite donc les moules en bois). On réalise des couches succinctes en respectant le schéma paille, mycélium, sciure de bois (le nombre de couche et la masse dépendra du moule sélectionné et qui sera fourni comme référence lors de la réalisation de l'expérience) jusqu'à compléter le moule entièrement en tassant au maximum chaque couche pour éviter l'humidité et les trous dans les briques. Il est important de ne pas laisser beaucoup d'espace entre les couches, assez pour avoir de l'air sans trop pour éviter les risques de fissure à l'obtention du matériau. De même, nous essaierons de respecter la même masse pour chaque échantillon afin de pouvoir mesurer leur masse une fois la brique formée et démoulée. L'incubation est réalisée à 20–25°C dans un environnement sombre pendant 10 à 14 jours pour concentrer la prolifération du mycélium avec les substrats. La croissance est considérée comme terminée lorsque toute la surface

²⁹ Comment fabriquer votre propre brique de champignon ? Vidéo YouTube, 2022.

du matériau devient blanche aussi bien en surface qu'en dessous.

iv. Séchage et stabilisation

Les échantillons sont démoulés avec soin hors des moules avec vérification de leur état. Ils sont ensuite chauffés à 100°C pendant 45 minutes (four domestique dans le cas de la fabrication artisanale pour son accessibilité et ses performances). L'étape finale du processus de fabrication consiste en la stabilisation thermique du myco-matériau, une phase essentielle qui permet de figer la structure obtenue à l'issue de la croissance du mycélium.³⁰

Ce traitement thermique a pour objectif principal de tuer le mycélium vivant, stoppant ainsi toute activité biologique et empêchant la poursuite de la colonisation du substrat. En neutralisant les cellules fongiques, on évite toute évolution ultérieure du matériau, comme la reprise de croissance, la production de spores ou la dégradation interne du support.

Cette étape joue également un rôle déterminant dans la stabilisation mécanique et la conservation du matériau. En effet, le passage à la chaleur permet de retirer les résidus d'eau présents dans la structure, ce qui réduit le poids du matériau final tout en augmentant sa rigidité et sa durabilité. L'évaporation de l'humidité interne provoque un léger resserrement du réseau de mycélium, consolidant ainsi les liaisons entre les fibres du substrat. Le matériau acquiert alors une texture plus dense et plus stable, adaptée à la manipulation et à l'étude de ses propriétés physiques et mécaniques.

Afin de suivre cette transformation, chaque échantillon est pesé à trois étapes clés : au moment de la confection de la brique (avant incubation), lors du démoulage (après la croissance du mycélium) et enfin après séchage. Ces pesées successives permettent de quantifier la perte de masse liée à l'évaporation de l'eau et à la destruction de la biomasse vivante.

Il est attendu que cette différence de masse varie d'un échantillon à l'autre, car le développement du

mycélium peut se propager de manière inégale selon la densité du substrat, le taux d'humidité ou la répartition de l'inoculum initial.

Le séchage représente donc une étape de transition critique, où le matériau passe d'un état vivant, souple et organique, à un état inerte, solide et manipulable. Cette transformation marque la fin du cycle de culture et le début de la phase d'analyse, au cours de laquelle les propriétés mécaniques, physiques et esthétiques du myco-matériau peuvent être étudiées et comparées ce qui représentera alors mes expériences dans le cadre de ce mémoire.

e. Tests prévus

Des tests de résistance à la flexion seront réalisés afin d'évaluer la solidité structurelle des différents mélanges. Si l'accès à des machines de test est possible (disponible à l'ESTP), des mesures précises pourront être obtenues. Sinon, des tests manuels de charge progressive pourront être envisagés à titre indicatif.

Si les tests doivent être manuels, l'échantillon sera placé en hauteur avec ses extrémités soutenue ou tenue par des charges pour le maintenir en place. On ajoutera alors de la masse pesée à l'avance que l'on ajoutera au fur et à mesure jusqu'à arriver au point de rupture, cela permettra de déterminer la limite d'élasticité du matériau.³¹ Après l'ensemble des tests menés, les résultats seront mis sous la forme d'un tableau comparatif pour donner lieu à un graphique visuel qui permettra de confronter les performances du matériau avec ceux déjà connus de matériaux structurels existant comme l'acier, le bois ou le béton. Pour chaque échantillon, seront donc mesurés : la masse sèche, la charge à rupture (en g ou N), la déformation maximale observées, et l'allure de la courbe contrainte-déformation si possible.

³⁰ *BIOPTERRE. Les mycomatériaux. Ressource en ligne, s.d.*

³¹ MEFTAH, Khaled ; BEN ALI, Mohamed. *Cours et exercices de géotechnique 1 selon l'Eurocode 7*. Support pédagogique, s.d

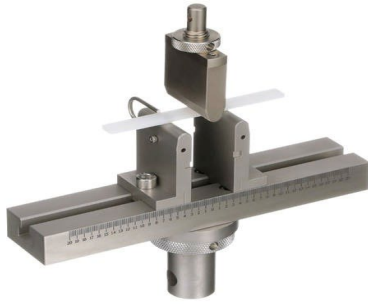


fig 20. Dispositif d'essai de flexion à trois points - Instron

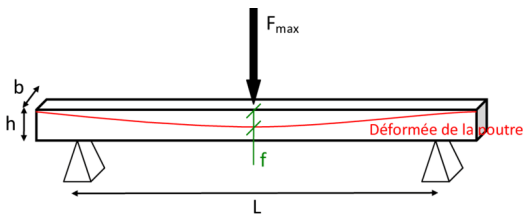


fig 21. Principe du test de flexion à trois points - Research Gate

f. Résultats attendus

Il est anticipé que les échantillons contenant une plus grande proportion de sciure de bois et la récupération de matériaux de chantier présenteront une résistance plus élevée à la flexion. Cette hypothèse s'inspire de la logique du béton armé, où l'ajout d'éléments rigides améliore la solidité du matériau. Les résultats permettront également de comparer les performances entre les deux espèces fongiques.

Nous nous attendons à observer une différence nette de performances entre nos matériaux et ceux déjà existant dans le domaine du bâtiment structurel mais avec les résultats en limites, il sera possible de chercher une utilité structurelle conjuguée aux capacités isolantes des myco-matériaux

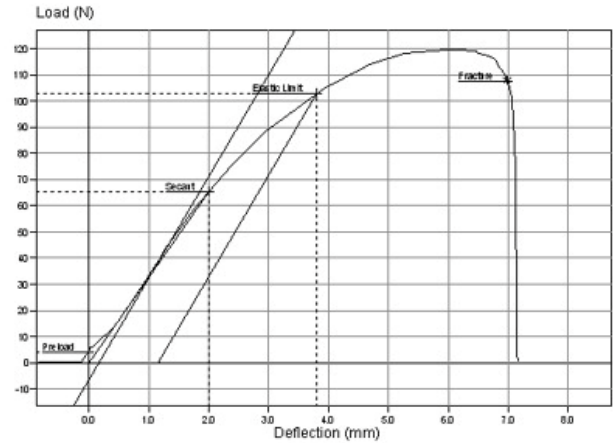


fig 22. Exemple de graphique de test de résistance à la flexion - Ametek Test France

2. Les résultats de l'expérience :

a. La mise en place des prototypes de l'expérience :

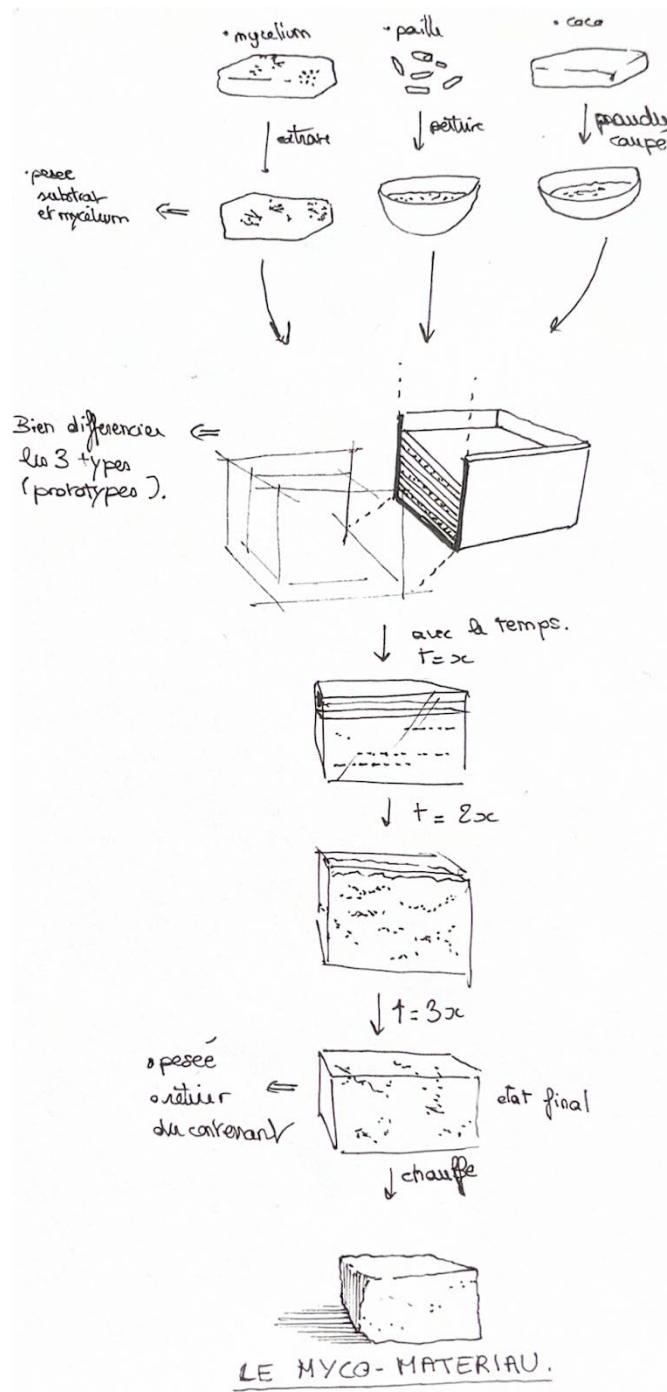


fig 23. Schéma de fabrication d'un myco-matériau -
Alice BICHAT

Dès lors de la réception des substrats (paille et sciure de coco pour faire office de sciure de bois), j'ai dû les préparer à la mise en place des myco-matériaux. Pour cela, il fallait les hacher et en faire des particules les plus fines possibles (fig 21 et 22) car la granulométrie du substrat (la taille et la finesse des particules de paille, sciure, chanvre, fibres de coco, etc.) joue un rôle déterminant dans la réussite de la colonisation du mycélium et dans les propriétés mécaniques finales du matériau [21].

fig 24. Sciure de coco coupée-photographie Alice BICHAT



fig 25. grains de pailles hachés à l'aide d'un mortier - photographie Alice BICHAT

La dimension des fibres, tout comme leur orientation au sein du matériau, exerce une influence déterminante sur la résistance à la flexion, dans la mesure où elles conditionnent à la fois la cohésion interne du composite et la manière dont les efforts mécaniques sont transmis et répartis. Dans le cas des myco-matériaux, la réduction granulométrique du substrat constitue une étape clé dans la préparation des myco-matériaux. Un substrat finement haché favorise la colonisation homogène du mycélium, améliore la cohésion interne du composite et conduit

à une densité accrue, facteurs déterminants pour les performances mécaniques, notamment en flexion.

b. La pesée des substrats

Après le hachage, les substrats ont été pesés afin d'assurer une quantité homogène dans chaque prototype et de faciliter la comparaison entre les échantillons. Chaque mélange de substrat a été pesé à l'inoculation, puis après le démoulage et enfin après le séchage, de manière à mesurer la perte de masse liée à l'évaporation de l'eau et à la destruction du mycélium vivant lors de la stabilisation thermique. Ces données permettront d'établir un tableau comparatif des variations de masse selon la composition du substrat et le développement du mycélium, afin d'observer les écarts éventuels dus à la nature vivante et aléatoire du processus biologique.

Les différences observées entre les échantillons traduisent les variations naturelles de croissance du mycélium, influencées par des facteurs tels que le taux d'humidité, la densité du substrat ou la répartition du mycélium lors de l'ensemencement.

c. La superposition des couches

Pour chaque prototype, la mise en place du substrat s'est effectuée par couches successives, alternant les éléments de substrat (paille, sciure de coco) et les points d'en semencement du mycélium. Cette stratification vise à garantir une répartition homogène du mycélium dans l'ensemble du volume et à éviter les zones non colonisées. Chaque couche a été légèrement tassée afin d'assurer un contact optimal entre les fibres et d'éliminer les poches d'air susceptibles d'entraver la croissance. Le niveau de compaction reste néanmoins mesuré : un compactage trop fort pourrait limiter la circulation de l'air et ralentir la propagation du mycélium.

Cette méthode par couches successives permet également de varier la composition interne des prototypes, en testant différentes proportions de paille et de sciure, ou en modifiant leur orientation. L'objectif est d'évaluer l'impact de ces variations sur la croissance du mycélium et sur les propriétés mécaniques finales des échantillons.

d. Les premiers échecs, limites d'expérimentations :

Les essais réalisés ont été nombreux et riches d'enseignements. Bien que les premières étapes aient permis d'acquérir les connaissances nécessaires à la mise en œuvre des myco-matériaux, les conditions d'expérimentation se sont révélées déterminantes pour la réussite du processus.

Comme pour toute expérience impliquant un organisme vivant, le respect précis des paramètres de croissance comme température, humidité, stérilisation du substrat et conditions d'aération, est indispensable pour garantir la colonisation complète et homogène du mycélium.

Les premiers essais ont mis en évidence plusieurs limites et sources d'échec.

- Dans certains cas, le substrat présentait une humidité excessive, ralentissant le développement du mycélium et favorisant l'apparition de moisissures concurrentes.
- Dans d'autres, une stérilisation insuffisante a conduit à la contamination du substrat par des bactéries ou des champignons parasites, empêchant la propagation du mycélium inoculé.
- Des problèmes de température ambiante instable ou de manque d'aération ont également pu altérer la croissance, entraînant une colonisation partielle ou asymétrique des échantillons.

Ces échecs, bien qu'inévitables dans le cadre d'une démarche expérimentale, ont permis de mieux comprendre la sensibilité du mycélium aux variations de son environnement. Ils ont également souligné l'importance d'un contrôle rigoureux des paramètres et la nécessité d'un cadre expérimental stable, souvent difficile à reproduire dans un contexte non professionnel ou en dehors d'un laboratoire.

Ces premiers échecs ne doivent pas être perçus comme des obstacles, mais comme des étapes d'apprentissage essentielles à la maîtrise du matériau vivant.

Ils permettent d'affiner les protocoles, de mieux cerner les limites des conditions expérimentales artisanales et d'envisager des améliorations futures,

notamment à travers un environnement de culture plus stable et mieux contrôlé.



fig 26. Brique de myco-matériau à la machine de flexion simple - Alice BICHAT

IV. ANALYSE DES RÉSULTATS, LIMITES ET PERSPECTIVES :

1. Interprétation des résultats et la comparaison :

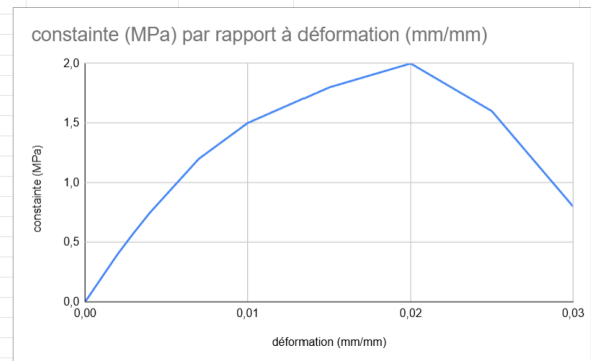
a. Les résultats de l'expérience :

Dans l'essai de flexion à 3 points qui se trouve être le test de flexion le plus courants, l'essai est régi par des normes internationales telles que l'ASTM D790 ou l'ISO 178 (souvent adaptées pour les matériaux biosourcés comme les myco-matériaux). L'éprouvette est placée horizontalement sur deux supports parallèles à une distance de 17 cm (taille de la boîte notée L , ici $L=17$ cm, on note dès à présent la valeur h représentant la hauteur de notre brique $h=9,5$ cm).

Sur la brique, on applique une charge F qui augmentera au fur et à mesure de l'expérience afin de déterminer les différents stades de déformation du matériau durant l'expérience. Ainsi, avec ce procédé on obtient une courbe Force-Déplacement aussi nommée Contrainte-Déformation (II.4.b, fig8). À partir de cette courbe, on calcule :

- La résistance à la Flexion (notée f), crucial pour évaluer la capacité portante du matériau calculé de la façon suivante dans le cas de l'expérience : $f=3FL2bh2$
- Module de flexion (Ef) calculé à partir de la pente de la partie linéaire (élastique) : $Ef=L34bh3 (F)$ avec la déformation du matériau

déformation (mm/mm)	constainte (MPa)	Description du comportement
0	0	début du test
0,001	0,2	domaine élastique linéaire
0,002	0,4	domaine élastique linéaire
0,003	0,58	domaine élastique linéaire
0,004	0,75	fin du domaine élastique
0,005	0,9	début du non-linéaire (limite élastique)
0,007	1,2	micro-fissuration interne
0,01	1,5	domaine plastique
0,015	1,8	déformation irréversibles importantes
0,02	2	résistance maximale en flexion
0,025	1,6	début de rupture
0,03	0,8	rupture avancée



déformation (mm/mm)	constainte (MPa)	Description du comportement
0	0	début du test
0,001	0,2	domaine élastique linéaire
0,002	0,4	domaine élastique linéaire
0,003	0,58	domaine élastique linéaire
0,004	0,75	fin du domaine élastique
0,005	0,9	début du non-linéaire (limite élastique)
0,007	1,2	micro-fissuration interne
0,01	1,5	domaine plastique
0,015	1,8	déformation irréversibles importantes
0,02	2	résistance maximale en flexion
0,025	1,6	début de rupture
0,03	0,8	rupture avancée

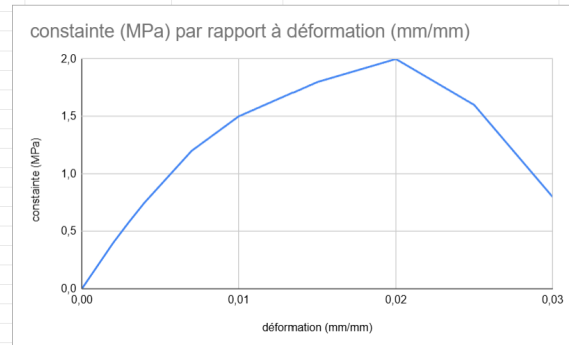


fig 27 - tableau et graphique de la déformation et contrainte du myco-matériau - Alice BICHAT

Il est important de rappeler que les valeurs exactes dépendent fortement de la densité finale de votre brique, du taux d'inoculation et du temps de colonisation et séchage.

b. Résultat quantitatif :

Afin d'interpréter les résultats, il est important de se rappeler ce que nous cherchons pour répondre à la problématique et les hypothèses. Ainsi donc, l'interprétation des résultats doit se concentrer

sur l'évaluation de la cohésion du liant (ici le mycélium), l'analyse des données de déformations du myco-matériau afin de procéder à une comparaison active avec les données connues des autres matériaux (principalement les biosourcés) et la mise en relation avec les normes existantes pour les matériaux biosourcés comme l'EUROCODE 5³².

Le mycélium agit comme une colle naturelle qui maintient les particules du substrat, en flexion, c'est ce liant qui, avec les fibres de substrat, permet une résistance mécanique face aux efforts. D'après le tableau et le graphique de la *figure 24*, nous avons :

- Par lecture graphique (*fig.24*) : $f = 2.0 \text{ MPa}$ pour la contrainte maximale avant rupture
- Par calcul $E_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$, on prend deux points de la zone élastique linéaire de la table fournie :

Point 1 : $\varepsilon_1 = 0,001, \sigma_1 = 0.20 \text{ MPa}$

Point 2 : $\varepsilon_2 = 0,003, \sigma_2 = 0,75 \text{ MPa}$

La différence de contrainte : $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 = 0,55 \text{ MPa}$

La différence de déformation : $\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 = 0,003$

La pente ou Module : $E_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{0,55}{0,003} = \frac{550}{3} = 183,33 \text{ MPa}$

c. Analyse du comportement mécanique :

Le graphique obtenu nous permet d'analyser les zones de déformations du matériau sur l'exemple de la *figure 8*. Ainsi on obtient :

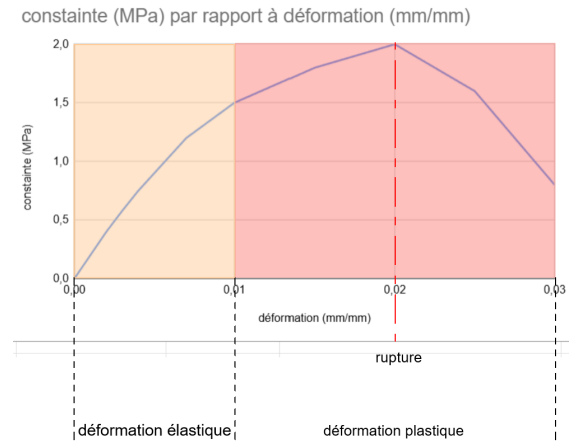


fig 28. Analyse du graphique contrainte-déformation - Alice BICHAT

Par soucis d'expérimentation avec les différentes cultures, l'expérience a été pratiquée sur la culture ayant le plus de copeaux de paille (*fig. 29*). L'hypothèse exprimant une différence de performance selon le taux de substrats dans la culture, ne peut pas être appréhendée, cependant, nous pouvons analyser les résultats et les données connues pour l'hypothèse selon laquelle le matériau possède une résistance à la flexion simple suffisante pour être qualifiée d'élément structurel dans le bâtiment.



Fig 29. Photographie brique de mycélium après séchage avec mauvaise propagation du mycélium - Alice BICHAT

³² IRABOIS. Eurocode 5 : réalisez vos notes de calculs de façon autonome. Manuel simplifié,

annexe 1, p. 48. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

Pour cela, nous prendrons comme comparatif, les données concernant le matériau biosourcé du bambou³³. Avec les résultats donnés dans le mémoire d'Inès MATON, ainsi que les résultats récoltés durant l'expérience, nous avons :

Matériau Biosourcé	Ef	f
Bambou (structurel)	10GPa à 20 GPa	150 MPa à 300 MPa
Myco-matériau	0.183 GPa	2 MPa

fig 30. Tableau comparatif du bambou et du myco-matériau, donnée d'expérience et d'étude [22] - Alice BICHAT

Le tableau nous montre alors que le bambou considéré comme un élément structurel à une capacité de rigidité et de résistance 100 à 200 fois plus élevé que le myco-matériau. Or, en se rapportant aux données de l'EUROCODE 5, les normes pour le bois et les matériaux biosourcés doivent être capables d'avoir une résistance minimale entre 10(résineux)-20 GPa(feuilleux) pour la contrainte de flexion³⁴.

Pour les poutres de section rectangulaire sollicitées en flexion simple, la vérification de la contrainte de flexion est définie par la relation :

$$\sigma_{m,ed} \leq f_{m,ed} \quad \text{où} \quad \sigma_{m,ed} = \frac{M}{I/v} = \frac{6M}{bh^2}$$

avec : $\sigma_{m,ed}$ la contrainte de flexion dans la pièce de bois,
 $f_{m,ed}$ la valeur de calcul de la résistance en flexion,
 M le moment sollicitant cette pièce de bois,
 I l'inertie de l'élément,
 v la demi hauteur pour une section rectangulaire.

Le moment ultime acceptable pour toute pièce de bois est donc :

$$M_{ed}^{max} \leq \frac{I}{v} f_{m,d} = \frac{1}{6} f_{m,d} \times b \times h^2$$

Le module de flexion I/v requis est alors :

$$\frac{I}{v} f_{m,d} \geq \frac{M_{ed}^{max}}{f_{m,d}}$$

³³ MATON, Inès. *Conception éco-responsable : comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Mémoire de fin d'études. Université de Liège, 2024-2025, p. 25-30.*

³⁴ IRABOIS. *Eurocode 5 : réalisez vos notes de calculs de façon autonome. Manuel simplifié,*

fig 31. Extrait de l'Annexe des Calculs et vérifications EC-5 - EUROCODE 5 [1c]

Cependant, il est à noter que E_f mesuré pendant l'expérience est une valeur encourageante mais que la résistance et la rigidité restent insuffisantes pour pouvoir utiliser le myco-matériau comme un élément structurel pour le bâti en comparaison avec des éléments structurels primaires comme le bois, le béton ou l'acier (mais aussi des éléments biosourcés comme le bambou).

Ainsi donc, nous pouvons conclure de l'expérience que le myco-matériau ne peut, bien que suggérer dans la problématique, être un outil structurel pour les bâtiments.

d. Les facteurs influençant les résultats et limites expérimentales :

L'expérience pratiquée a su révéler les données nécessaires afin de réfuter la problématique et l'hypothèse de nos expériences cependant, il est important de rappeler que dans le but d'élaborer ce mémoire, les conditions d'expérimentation comportaient de nombreuses sources d'incertitude : hétérogénéité de la brique, colonisation incomplète, variation de densité, mesures artisanales, influence de l'humidité résiduelle. Dans le cadre d'expérience scientifique avec un cadre protégé et abouti, il serait possible de connaître avec plus de précision les limites du myco-matériau ainsi que les possibilités d'agencement des matériaux avec des substrats plus compétents en relation directe avec le liant efficace que représente le mycélium de champignon. Les expériences sur la compression que l'on peut retrouver, pratique la culture du mycélium de Reishi qui, comme exprimé dans l'État de l'Art (I.1.c) est un mycélium plus résistant et qui possède des capacités liantes supérieures à celle du Pleurote³⁵.

Cependant, les résultats obtenus, typiquement le module de Flexion et la résistance à la flexion un situent les myco-matériaux dans la catégorie des

annexe 1, p. 48. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.

³⁵ ANGÉLISME, Cristina. *L'architecture comme support de la matière vivante : le cas du mycélium. Mémoire ENSAPLV, 2020.*

matériaux légers et poreux (similaires aux mousses isolantes).

2. Les limites et les perspectives d'avenir

a. Les limites du matériau :

En testant les échantillons avec différents types de substrats, l'essai de flexion peut permettre d'identifier quelle combinaison substrate et mycélium optimise la résistance et la rigidité en flexion. Ce sont ces expériences qui ont permis les différentes utilisations actuelles du mycélium et nos usages quotidiens de celui-ci. En construction, ses performances mécaniques envisagent l'utilisation des myco-matériaux pour des panneaux isolants thermiques comme acoustiques ou les emballages écologiques. Cependant, le caractère vivant du matériau, suggère l'utilisation de substrat plus performant pour un cycle de vie optimisé et durable pour l'utilisation dans le domaine du bâtiment. Le module de flexion ainsi calculé dans les expériences précédentes est essentiel pour toutes applications du matériau où une certaine rigidité est requise (pour que les panneaux conservent leur forme). Le myco-matériau ne constitue pas, de part ce mémoire et les données récoltées, une alternative viable pour les éléments structurels primaires (poutres, poteaux, murs porteurs). L'obstacle majeur étant la rigidité alors que les normes de construction exigent des matériaux avec des rigidités de l'ordre du GPa. Ainsi, la viabilité réelle serait une alternative non-structurelle avec des applications où la performance mécanique est secondaire

b. Idées et développement par analyse :

Le mycélium est limité par la densité de l'interface qu'il crée, il peut lier les particules mais il n'a pas la capacité intrinsèque d'une matrice composite polymère ou minérale comme nous pourrions le retrouver dans des matériaux comme le bois, la pierre, l'acier ou d'autres matériaux utilisés dans le domaine de la construction.

Ainsi donc, l'étude des myco-matériaux hybrides où le mycélium est utilisé comme liant pour des fibres techniques serait plus pertinent dans la recherche plutôt que les déchets agricoles simples. De même, la recherche en bio minéralisation pour introduire des additifs minéraux (comme la chaux ou des nanoparticules) pendant la croissance pour stimuler le mycélium permettrait de créer une matrice plus dense et résistante, imitant alors le processus biologique naturels (comme la biocimentation³⁶).

Il est important de ne pas perdre de vue les problématiques environnementales actuelles. De nombreuses réglementations permettent aux matériaux biosourcés d'être employés dans une volonté d'obtenir un domaine plus respectueux des enjeux climatiques. Dans cette optique, le caractère vivant du myco-matériaux et par extension, les substrats plus performants permettent un cycle de vie optimisé. Le caractère biologique pose des défis majeurs comme la durabilité et l'uniformité. Le substrat doit être nutritif sans compromettre la performance finale du matériau sec. Ainsi donc, les traitements Post-production seraient une possibilité intéressante pour les myco-matériaux : en étudiant l'efficacité des traitements de surface comme le revêtement écologique, les huiles ou cires afin d'améliorer la résistance à l'eau et au feu. Pour l'ACV (Analyse du Cycle de Vie), le myco-matériau est un produit biodégradable en fin de vie ce qui est un atout majeur surpassant les isolants traditionnels³⁷.

Le mycélium pourrait se présenter comme une alternative à l'acier, en effet, les résultats ont montré qu'en termes de résistance à la flexion, ceci est irréaliste. Cependant, il serait capable d'améliorer les performances d'autres matériaux biosourcés fragiles, comme pour les les panneaux de terre crue pour améliorer la cohésion. Grâce à ses propriétés liantes, le mycélium pourrait être intégré dans des matériaux pour ces capacités d'auto-réparation, les hyphes contenus dans le mycélium pourrait combler

³⁶ DADDA, A., et al. Amélioration des propriétés mécaniques des sols par biocimentation : étude mécanique et microstructurale. *Revue Française de Géotechnique*, 2019, n°160, p. 4.

³⁷ AGUILAR, Kyle, et al. Production of mycomposite from wood industry waste. *Université de Lorraine, LERMAB, France*, 22-24 novembre 2023.

les microfissures augmentant la durabilité des constructions en bois par exemple.

3. Détermination de la portée maximale admissible d'un panneau de myco-matériau sous son propre poids.

Conforme aux données faites par l'expérimentation sous l'essai en flexion simple, on peut faire un rappel des données nécessaire pour cette détermination.

a. Les données pour le calcul théorique :

Les essais mécaniques réalisés sont des essais de flexion à trois points, conformément au principe décrit par la norme ISO178 adaptée aux matériaux composites biosourcés. Les données mécaniques retenues pour l'analyse sont donc :

- Module d'élasticité en flexion : $E = 183,33 \text{ MPa}$ valeur obtenue avec nos expériences afin d'approcher au maximum ce que nous souhaitons trouver dans cette démonstration.
- Résistance moyenne à la flexion : $\sigma = 2 \text{ MPa}$ valeur obtenue avec nos expériences afin d'approcher au maximum ce que nous souhaitons trouver dans cette démonstration.
- Densité sèche après séchage : $\rho = \frac{m}{V} = [55; 99] \text{ kg/m}^3$ (donnée récoltée et évaluée - BuildWise).

Géométrie du panneau étudié :

- Épaisseur : $h = 9,5 \text{ cm} = 0,095 \text{ m}$ (on se limitera à l'épaisseur que nous avons obtenue avec notre brique et non une valeur nouvelle).
- Largeur de calcul : $b = 1,00 \text{ m}$

Avec ces données on peut dire que le panneau est donc assimilé à une poutre rectangulaire pleine, homogène.

2.1. Prédimensionnement de la section de la poutre

Au stade du prédimensionnement, on peut choisir les dimensions de la section de la poutre [largeur (b) × hauteur (h)] comme suit :

Hauteur h $\frac{l}{15} \leq h \leq \frac{l}{10}$ Avec l : longueur de la poutre mesurée entre appuis

Largeur b $\frac{h}{5} \leq b \leq \frac{h}{2}$ Avec $b \geq 15 \text{ cm}$ Pour des raisons de bétonnage correct

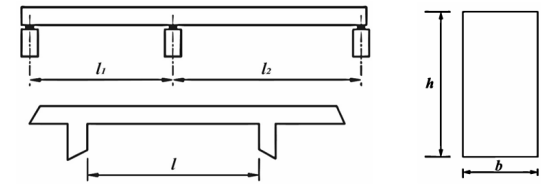


fig 32. Prédimensionnement de la section de la poutre - Cours-génie-civil.com

b. Les conditions d'appui et de sollicitation :

On considère le panneau simplement appuyé à ses extrémités (appuis simples), cohérent avec l'essai de flexion à trois points. Pour le chargement, la charge est uniformément répartie correspondant au poids propre du panneau. L'orientation est horizontale afin de travailler en flexion verticale.

c. Les hypothèses mécaniques explicitement posées :

Les hypothèses mécaniques traitent des principes fondamentaux et des règles de calculs, dans le cas de mon expérimentation, j'émet l'hypothèse que le comportement est linéaire élastique jusqu'à la rupture. On considère le matériau comme isotrope équivalent à l'échelle macroscopique induit directement de l'absence des fibres orientées continues mis en place lors de la formation de la brique de myco-matériau. Avec cela, nous pouvons faire les vérifications à l'Etat limite Ultime (ELU) qui est le critère de rupture en flexion gouvernant le dimensionnement d'un matériau.

Modélisation mécanique du problème : Le panneau est modélisé comme une poutre simplement appuyée de portée L , soumise à une charge répartie q .

i. Charge répartie due au poids propre :

Poids volumique : $\gamma = \rho \cdot g$ avec $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Alors : $\gamma = 971 \text{ N/m}^3$

En charge linéique : $q = b \cdot h \cdot \gamma$. alors :

$$q = 92.2 \text{ N/m}$$

ii. Moment fléchissant maximal :

Pour une poutre simplement appuyée sous charge répartie : $M = \frac{qL^2}{8}$

iii. Caractéristiques de section :

Le moment d'inertie : $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$ alors : $I = 7,14 \times 10^{-5} m^4$

La fibre la plus sollicitée : $y_{max} = \frac{h^2}{2} = 0,0475 m$

iv. Condition de résistance en flexion (ELU) :

Equation de Navier :

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot y_{max}}{I}$$
$$\sigma_{max} = \frac{qL^2}{8} \cdot \frac{y_{max}}{I}$$

Attention cependant à la condition de non-rupture :

$$\sigma_{max} \leq \sigma_r$$

Soit donc :

9

$$\frac{92,2 \cdot L^2}{8} \cdot \frac{0,0475}{7,14 \cdot 10^{-5}} \leq 2 \cdot 10^6$$

Ainsi donc :

$$L^2 \leq 26 \Rightarrow L_{max} \approx 5,1 m$$

La portée maximale théorique avant la rupture serait donc de **Lmax=5m**

Il est important de rappeler que cette valeur concerne une rupture en flexion avec un matériau sous son poids propre seul, sans coefficient de sécurité.

d. Traduction constructive (application sous toiture) :

Pour une utilisation réelle en bâtiment, et en tenant compte des normes qui assujettit les matériaux biosourcés, les panneaux ne doivent jamais travailler à la limite de rupture. De même les critères de flèche admissible (ELS) deviennent prépondérants et il est important de ne pas oublier qu'en plus de leur poids propre, les panneaux utilisés

seront aussi soumis à d'autres charges complémentaires comme le vent, la neige ou encore la manutention. Afin d'obtenir un résultat réaliste d'entraxe pour le cadre acier, on applique un coefficient de sécurité 3 : $L_{service}$ 1,5 à 2m. Ainsi, ce résultat est cohérent dans un usage de panneau isolant autoporteur, posé sur une ossature secondaire en acier sans fonction structurelle primaire.

e. Conclusion :

Avec l'expérimentation et la théorie, je peux affirmer que le myco-matériau ne peut pas être structurel dans le cas d'élément soumis aux contraintes de flexion (toiture, poutre, etc...) mais qu'il représente une capacité autoportante théorique suffisante pour des portées maîtrisées. Ainsi, les panneaux en myco-matériaux peuvent avoir une intégration crédible en isolation sous toiture à condition d'avoir un cadre porteur rapproché avec un dimensionnement gouverné par la flèche et la durabilité. Cependant et malgré mes recherches, il n'y a pas de données concernant le critère de flèche admissible pour le myco-matériau. Il serait intéressant dans l'optique de déterminer l'ELS du matériau de chercher à connaître les limites de flèche, cela permettrait d'approfondir les recherches sur le matériau et ses compétences mécaniques pour le domaine de la construction.

CONCLUSIONS ET PROJECTIONS :

1. Les hypothèses et limites d'expérience :

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de recherche appliquée afin d'être en mesure d'évaluer le potentiel des myco-matériaux comme alternative biosourcée aux matériaux conventionnels du bâtiment. L'objectif principal était de caractériser mécaniquement les panneaux de myco-matériaux développés expérimentalement, afin d'envisager une application architecturale réaliste, principalement au départ, comme matériau structurelle principale et, dans une moindre mesure, comme élément d'isolation sous toiture. La problématique envisagée était alors : dans quelle mesure les propriétés mécaniques mesurées des panneaux de myco-matériaux permettent-elles une intégration constructive, et sous quelles conditions de mise en œuvre ?

Afin de répondre à la problématique, j'ai émise les hypothèses suivantes : "les myco-matériaux possède une résistance à la flexion simple suffisante pour être qualifiée d'élément structurel principaux dans le bâtiment" ainsi que l'hypothèse "dans la composition des myco-matériaux qui sera alors effectuer pour l'expérimentation, l'hypothèse est que la sciure de coco jouerait le rôle de remplissage et de structure homogène (comme substrat fin) et ainsi donc que la paille serait l'élément résistant à la flexion et à la compression". Cette dernière hypothèse n'a malheureusement pas pu être travaillée étant donné les échecs d'expérimentation des briques dans un milieu non expérimental. En effet, travailler avec le vivant doit être encadré et exige une maîtrise et un environnement parfaitement sain, ce qui n'était pas le cas dans les expérimentations que j'ai pratiqué, aussi les expériences mécaniques observées ont été faites sur le seul sujet arrivé à terme à temps.

Pour cela, j'ai adopté une double approche complémentaire : une campagne expérimentale comprenant la fabrication, séchage et essais mécaniques ainsi qu'une analyse théorique mobilisant les outils classiques de la résistance des

matériaux. Les essais ont permis de déterminer le module d'élasticité en flexion et ces essais et données ont ensuite été intégrés dans un modèle simplifié de poutre cohérent avec les conditions d'essai et les hypothèses de la résistance des matériaux. Les résultats sur les essais expérimentaux ont montré que les panneaux de myco-matériau présentent une faible rigidité avec un module d'élasticité de l'ordre de 10^2 MPa et une résistance à la flexion limitée et donc que l'hypothèse selon laquelle les myco-matériaux peuvent être qualifiée d'élément structurel principaux dans le bâtiment n'en pas valide. Cependant, les portées admissibles compatibles avec un usage dans le bâtiment sont de plusieurs mètres du point de vue de la résistance ultime (ELU) mais fortement réduite dès lors que l'on considère le confort d'usage et la déformation admissible.

Les résultats confirment donc que les panneaux de myco-matériau ne peuvent pas être considérés comme des éléments porteurs mais peuvent être envisagés comme éléments autoportants non structuraux. L'application en isolation sous toiture apparaît pertinente à condition d'avoir un cadre porteur secondaire, un entraxe réduit entre appuis et une fonction strictement non structurelle. Le matériau doit être pensé comme un composant de système constructif et non comme un matériau isolé remplaçant un élément structurel classique.

2. Choix et limites de ce mémoire :

Ce mémoire apporte des données expérimentales sur un matériau encore peu normalisé avec une méthodologie de transposition des résultats de laboratoire vers une application constructive avec un cadre de réflexion critique sur les résultats obtenus pour l'usage architectural des myco-matériaux.

Ce mémoire montre l'intérêt d'une approche croissant l'expérimentation matérielle, la pratique du vivant, le calcul théorique et la réflexion architecturale. Ce choix de mémoire était ambitieux sans nul doute, mais cela a permis de connaître les

performances d'un matériau nouveau et encore en développement, utilisé dès à présent pour des usages communs mais dont le potentiel n'a pas encore été totalement révélé. En effet, la plupart des hypothèses émises ont été réfutées mais toutes ces réponses ont permis de comprendre un peu plus les limites de ce matériau méconnu et j'ai pu proposer une ouverture à mes résultats. Les limites de ce travail résident principalement dans l'absence de données concrètes sur l'influence de l'humidité mais aussi sur le nombre limité d'échantillons testés. Le modèle théorique, quant à lui, repose sur des hypothèses mécaniques simplificatrices nécessaires mais qui restreignent la portée normative des résultats et imposent une lecture prudente pour une application réelle.

3. Projections et perspective d'avenir :

Enfin, des travaux complémentaires pour portés sur des essais de fluage à long terme ou une caractérisation hydro mécanique du matériau et l'optimisation des performances pourrait également passer par l'amélioration de la formulation du myco-matériau ou l'intégration de renfort biosourcés mais aussi par une conception architecturale exploitant les limites du matériau plutôt que les subissant.

Ce matériau innovant est encore à développer, les recherches pratiquées sur celui-ci ainsi que les nombreuses variantes qui en découlent en font un matériau d'avenir dans la construction à des échelles hétérogènes.

Liste des figures :

figure 1 : Tableau de distinction entre le champignon et le mycélium

figure 2 : échange entre le mycélium et les végétaux - Alice BICHAT

figure 3 : Pleurotus Ostreatus - adam haritan

figure 4 : Ganoderma Lucidum - Hekma Center

figure 5 : Tableau comparatif du Pleurotus Ostreatus et du Ganoderma Lucidum

figure 6 : Constitution du thalle fongique - Alice BICHAT

figure 7 : Tableau comparatif des hyphes et du mycélium - Erik Collado Vidal

figure 8 : Panneaux de myco-matériaux isolant et performance thermique- BUILD WISE

figure 9 : Hy-Fi tower - David Benjamin et le studio The Living

figure 10 : schémas des différents appuis, force et déformation de la flexion - Alice BICHAT

figure 11 : courbe contrainte-déformation caractéristique du comportement d'un matériau à l'issue d'un essai de flexion - Alice BICHAT.

figure 12 : tableau et frise des performances des matériaux en flexion- Alice BICHAT

figure 13 : Tableau comparatif des résultats de compression avec les données de "Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates" - Alice BICHAT

figure 14 : Graphique de comparaison des modules de compression des myco-matériaux - Alice BICHAT

figure 15 : schéma des recherches actuelles établies sur les myco-matériaux - Emilien Fillion

figure 16 : Pleurotus Ostreatus (Pleurote) - O Champignon

figure 17 : organigramme de fabrication des myco-matériaux-réalisation expérimentale - Alice BICHAT

figure 18 : Tableau de répartitions dans les prototypes - BICHAT Alice.

figure 19 : Composition de la brique de myco-matériau avant incubation - Alice BICHAT

figure 20 : Dispositif d'essai de flexion à trois points - Instron

figure 21 : Principe du test de flexion à trois points - Research Gate

figure 22 : Exemple de graphique de test de résistance à la flexion - Ametek Test France

figure 23 : Schéma de fabrication d'un myco-matériau - Alice BICHAT

figure 24 : sciure de coco coupée- photographie Alice BICHAT

figure 25 : grains de pailles hachés à l'aide d'un mortier - photographie Alice BICHAT

figure 26 : Brique de myco-matériau à la machine de flexion simple - Alice BICHAT

figure 27 : tableau et graphique de la déformation et contrainte du myco-matériau - Alice BICHAT

figure 28 : Analyse du graphique contrainte-déformation - Alice BICHAT

figure 29 : Photographie brique de mycélium après séchage avec mauvaise propagation du mycélium - Alice BICHAT

figure 30 : Tableau comparatif du bambou et du myco-matériau, donnée d'expérience et d'étude - Alice BICHAT

figure 31 : Extrait de l'Annexe des Calculs et vérifications EC-5 - EUROCODE 5

figure 32 : prédimensionnement de la section de la poutre - Cours-génie-civil.com

Bibliographie (norme ISO 690)

Ouvrages

DESPRET, Vinciane ; AVENTIN, Christine ; SALME, Juliette. *Demeurer en mycélium*. Bruxelles : Cellule Architecture Federation Wallonie Bruxelles, édition Biennale D'Architecture Venise, 2023.

HEBEL, Dirk ; HEISEL, Felix. *Cultivated Building Materials: Industrialized Natural Resources for Architecture and Construction*. Bâle : Birkhäuser, 2017.

KARIM, J. E. *Biodegradable Architecture, Finite Construction for Endless Futures*. Ottawa : Azrieli School of Architecture and Urbanism, 2024.

SNYDER, James C. *Architectural Research*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1984.

Articles scientifiques et chapitres d'ouvrages

ALANEME, Kenneth Kanayo, et al. *Mycelium-based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications*. *Construction and Building Materials*, 2023. Disponible sur : ScienceDirect.

ARIFIN, Y. H., et al. *Mycelium fibers as new resource for environmental sustainability*. *Procedia Engineering*, 2013.

DADDA, A., et al. *Amélioration des propriétés mécaniques des sols par biocimentation : étude mécanique et microstructurale*. *Revue Française de Géotechnique*, 2019, no 160, p. 4.

ELSACKER, Elise, et al. *Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates*. Creative Commons Attribution License, 22 juillet 2019.

FOURÉ, B. *Quelles propriétés mécaniques*. Dans : *Les bétons à hautes performances : du matériau à l'ouvrage*. Paris : Presses de l'ENPC, 1990.

RAPIOR, Stéphane ; FONS, François. *La classification des champignons*. *Annales de la Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault*, 2006, vol. 146, no 4, p. 81-86.

ROTHSCHILD, Lynn. *Myco-architecture off planet: growing surface structures at destination*. NASA Ames Research Center, 2018.

TEDERSOO, Leho ; BAHRAM, Mohammad ; ZOBEL, Martin. *How mycorrhizal associations drive plant population and community biology*. *Science*, vol. 367, 2020, eaba1223.

Thèses, mémoires et travaux universitaires

ANGÉLISME, Cristina. *L'architecture comme support de la matière vivante : le cas du mycélium*. Mémoire de fin d'études. Lille : ENSAPLV, 2020.

BASSIMON, Chloé. *Mycoremédiation d'un sol industriel co-contaminé en métaux et hydrocarbures aromatiques*. Thèse de doctorat en chimie organique. Normandie Université, 2025.

CLAVEL, Marine. *Pleurotus ostreatus : un champignon aux multiples activités thérapeutiques*. Mémoire en sciences pharmaceutiques, 2024.

FILLION, Émilien. *La culture du mycélium : une production envisageable pour exploiter ses capacités thermiques dans le bâtiment ?* Mémoire de Master 1. Grenoble : ENSA de Grenoble, 2024.

GRENON, Valérie. *Caractérisation des propriétés du mycélium de Pleurotus ostreatus comme liant de fibres végétales pour un matériau isolant*. Mémoire de M.Sc.A. Montréal : École de technologie supérieure – Université du Québec, 2023.

LETHIELLEUX-JUGE, D. *Étude morphologique de l'architecture fine du mycélium de champignons mycorhiziens arbusculaires du genre Glomus*, 2008.

MATON, Inès. *Conception éco-responsable : comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ?* Mémoire de fin d'études. Liège : Université de Liège, 2024-2025.

OUEDRAOGO, Kouka Amed Jérémy. *Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue*. Thèse de doctorat. Toulouse : Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2019.

Rapports techniques et normes

EUROCODE 5. *Réalisez vos notes de calculs de façon autonome : manuel simplifié – annexe 1*. IRABOIS. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, p. 48.

TABTI C. Résumé du cours de botanique (L2 Sciences agronomiques et Ecologie et environnement) 2019/2020

FOREST PRODUCTS LABORATORY (USDA). *Engineering and Design*. Madison, 2025.

GHOMARI, F. ; BENDI-OUIS, A. *Science des matériaux de construction – Travaux pratiques*. Tlemcen : Université Aboubekr Belkaid, 2007-2008.

Articles de presse et ressources professionnelles

DUMÉ, Isabelle. Diviser par dix les émissions de CO₂ du ciment, c'est possible. [Média non précisé], 6 janvier 2022.

VINCENT, Fred. L'isolation myco-matériaux : quand les champignons protègent votre habitat. *Énergies Éco Renouvelables*, 21 octobre 2024.

Webographie (sources audiovisuelles et sites spécialisés)

Fantastic Fungi. Film documentaire. États-Unis, 2019.

HYDROSWISS. Matériaux durables révolutionnaires : le mycélium pour la transition écologique. 2025.

ARCHITIZER. *Hy-Fi by The Living*. Queens (NY), 2014.

AGROFORESTERIE.FR. Fiche technique : la symbiose mycorhizienne. [s.d.].

BIOPTERRE. Les mycomatériaux. [s.d.].

LA MYCOSPHERE. Les mycomatériaux. [s.d.].

YOUTUBE. *Cultiver les champignons – Comment fabriquer votre propre brique de champignon ?* 2022.

