

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

— جامعة أبي بكر بلقايد — تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MÉMOIRE

Présenté dans le cadre de l'arrêté ministériel 1275 en vue de l'obtention du diplôme de master et diplôme startup-diplôme PME

En : Génie civil

Spécialité : Travaux Publics, Voie et Ouvrage d'Art

Par: M. HADJARI Mohammed Nadjib & M. BENMANSOUR El hadi

Sujet

Développement d'un Bio composite biosourcé nouvelle génération

Soutenu publiquement, le 16/ 06 / 2026, devant le jury composé de :

M. MEGNOUNIF Abdellatif	PR	Université de Tlemcen	Président
Mme. SMAIL Nadia	PR	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme. MAHI Imane	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
M. DAHHAOUI Hachimi	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
M. MAACHO Omar	MAA	Université de Tlemcen	Encadreur
M. TALAB Omar	MCA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur
M. REBIAHI Sid Ahmed	PR	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2025 /2026

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude à Allah, qui nous a accordé la patience et la volonté pour mener à bien ce travail.

*Nous tenons à remercier énormément notre encadrant, **M. DAHHAOUI Hachimi, M. TALEB Omar et M. MAACHO Omar et M. REBIAHI Sidahmed**, pour leurs disponibilités et leurs accompagnements tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leur encadrement rigoureux a grandement enrichi notre travail.*

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury

Pr. MEGNOUNIF Abdalatif et Pr. MAIL Nadia

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de Génie civil, pour la qualité de leur enseignement et les compétences qu'ils nous ont transmises durant notre formation.

*Nous adressons nos vifs remerciements à **M. DIAF Amine**, doctorant à l'université Belhadj Bouchaib d'Aïn Témouchent, à **Mme BENCHOUK Assia**, directrice du laboratoire EOLE, à **M. KEDDOU Adel**, ingénieur de laboratoire Structures Intelligentes SSL et doctorant, ainsi qu'à **M. HENNAOUI Mustapha**, ingénieur au sein du laboratoire MDC, pour la qualité de leurs contributions et leurs efforts constants.*

Nous remercions aussi nos collègues et camarades pour leur collaboration et leur soutien moral, qui ont rendu cette expérience plus agréable.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos familles, et surtout à nos parents, sans lesquels nous n'aurions pas pu avancer.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents,

*À mon père, pour tous les sacrifices qu'il a consentis afin de me permettre
d'atteindre mes objectifs, pour son soutien constant, ses conseils précieux et sa
confiance.*

*À ma mère, pour son amour inconditionnel, sa patience, ses encouragements et
ses prières qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours.*

*À mes chères sœurs, pour leur affection, leur soutien moral et les moments de
bonheur partagés. Merci pour votre présence à mes côtés dans les moments
difficiles comme dans les moments de réussite.*

*Enfin, à tous mes enseignants, qui m'ont transmis leur savoir, leurs
conseils et leur expérience, contribuant ainsi à ma formation
académique et personnelle. À vous tous, j'adresse ma profonde
reconnaissance et ma sincère gratitude*

HADJARI Mohammed Nadjib

DEDICACES

Je dédie ce travail à la mémoire de mon cher père, qui nous a quittés. Son amour, ses valeurs et ses sacrifices continuent de m'accompagner et de m'inspirer chaque jour. Qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste Paradis.

Je le dédie également à ma chère mère, qui a tant souffert sans jamais me laisser souffrir, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et qui n'a jamais baissé les bras pour moi. Aucun mot ne saurait exprimer ma gratitude pour son amour, sa patience et son soutien indéfectible.

À mon frère, qui m'a aidé à construire mon parcours et qui m'a toujours encouragé à poursuivre mes études avec détermination.

À ma sœur, pour son affection, son soutien moral et ses encouragements tout au long de mon parcours universitaire.

À tous mes chers amis qui m'ont accompagné, soutenu et encouragé durant toutes ces années d'études.

Enfin, à tous mes enseignants, qui m'ont transmis leur savoir, leurs conseils et leur expérience, contribuant ainsi à ma formation académique et personnelle. À vous tous, j'adresse ma profonde reconnaissance et ma sincère gratitude

BENMANSOUR El Hadi

RÉSUMÉ

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la résolution ministérielle 1275 visant la création de startups innovantes à forte valeur ajoutée environnementale. L'étude explore une approche interdisciplinaire avancée, à la frontière entre la microbiologie appliquée et le génie civil, pour l'élaboration de biocomposites de nouvelle génération. Le procédé repose sur l'upcycling biotechnologique de sous-produits lignocellulosiques locaux abondants et sous-valorisés – notamment la sciure de bois, la paille de blé et les résidus de palmier dattier – agglomérés par le développement contrôlé d'un réseau micro-structuel de mycélium agissant comme liant biologique naturel. Plusieurs formulations expérimentales ont été soumises à un protocole rigoureux de bio-fabrication (stérilisation, inoculation, incubation contrôlée, démoulage et inactivation thermique). Les caractérisations physiques, thermiques et hydriques révèlent des densités sèches légères (0,11 à 0,19 g/cm³) et des conductivités thermiques prometteuses (λ entre 0,106 et 0,137 W/m·K), positionnant ces matériaux comme d'excellents correcteurs thermiques écologiques face aux isolants biosourcés de référence. Bien que limités structurellement et sensibles à l'humidité, ces biomatériaux offrent une alternative souveraine, biodégradable et à empreinte carbone négative. Ce projet pose ainsi les bases techniques pour le lancement de la première startup de panneaux de mycélium en Algérie et en Afrique du Nord, ciblant les marchés de l'éco-construction et du packaging écoresponsable.

Mots-clés : Biocomposite avancé, Mycélium, Interdisciplinarité (Microbiologie-Génie Civil), Économie circulaire, Isolation thermique, Startup 1275.

ABSTRACT

This work is part of Ministerial Resolution 1275, which aims to foster the creation of innovative startups with high environmental value. The study explores an advanced interdisciplinary approach, at the intersection of applied microbiology and civil engineering, for the development of next-generation biocomposites. The process relies on the biotechnological upcycling of abundant and underutilized local lignocellulosic byproducts—notably sawdust, wheat straw, and date palm residues—agglomerated through the controlled development of a microstructural network of mycelium acting as a natural biological binder. Several experimental formulations were subjected to a rigorous bio-manufacturing protocol (sterilization, inoculation, controlled incubation, demolding, and thermal inactivation). Physical, thermal, and hydraulic characterizations reveal low dry densities (0.11 to 0.19 g/cm³) and promising thermal conductivities (λ between 0.106 and 0.137 W/m·K), positioning these materials as excellent eco-friendly thermal regulators compared to standard bio-based insulation materials. Although structurally limited and sensitive to moisture, these biomaterials offer a superior, biodegradable alternative with a negative carbon footprint. This project thus lays the technical groundwork for the launch of the first mycelium panel startup in Algeria and North Africa, targeting the eco-construction and eco-responsible packaging markets.

Keywords: Advanced biocomposite, Mycelium, Interdisciplinarity (Microbiology-Civil Engineering), Circular economy, Thermal insulation, Startup 1275.

ملخص

يأتي هذا العمل في إطار القرار الوزاري رقم 1275 الذي يهدف إلى إنشاء شركات ناشئة مبتكرة ذات قيمة مضافة بيئية عالية. وتستكشف الدراسة نهجاً متعدد التخصصات متطوراً، يقع على الحدود بين علم الأحياء الدقيقة التطبيقي والهندسة المدنية، من أجل تطوير مركبات حيوية من الجيل الجديد. تعتمد العملية على إعادة التدوير البيوتكنولوجي للمنتجات الثانوية اللجنوسليلوزية المحلية الوفيرة والمهمة – لا سيما نشارة الخشب وقش القمح ومخلفات نخيل التمر – التي يتم تكتلها من خلال التطوير المتحكم فيه لشبكة ميكرو-هيكلية من الفطريات التي تعمل كمواد رابطة بيولوجية طبيعية. خضعت عدة تركيبات تجريبية لبروتوكول صارم للتصنيع الحيوي (التعقيم، التلقيح، الحضانة الخاضعة للرقابة، إخراج القوالب، والتعطيل الحراري). وتكشف الخصائص الفيزيائية والحرارية والمائية عن كثافات جافة خفيفة (0,11 إلى 0,19 غ/سم³) وموصلية بين 0,106 و 0,137 وات/م.ك)، مما يجعل هذه المواد بمثابة عوامل تعديل حراري بيئية ممتازة مقارنةً (λ) حرارية واحدة بمواد العزل الحيوية القياسية. على الرغم من محدودية هذه المواد الحيوية من الناحية الهيكلية وحساسيتها للرطوبة، فإنها توفر بديلاً متميزاً وقابلاً للتحلل الحيوي وذو بصمة كربونية سلبية. وبذلك يضع هذا المشروع الأسس التقنية لإطلاق أول شركة ناشئة متخصصة في ألواح الميسيليوم في الجزائر وشمال إفريقيا، مستهدفة أسواق البناء البيئي والتغليف الصديق للبيئة.

الكلمات المفتاحية: مركب حيوي متطور، فطريات، التخصصات المتعددة (علم الأحياء الدقيقة - الهندسة المدنية)،

1275. الاقتصاد الدائري، العزل الحراري، شركة ناشئة

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACES.....	II
RÉSUMER.....	IV
ABSTRACT.....	V
ملخص	VI
TABLES DES MATIÈRES.....	VII
LISTES DES FIGURES.....	X
LISTES DES TABLEAUX.....	XII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1

CHAPITRE I : Les biomatériaux à base de mycélium

I.1. Introduction	2
I.2. Principaux acteurs du développement des matériaux à base de mycélium.....	2
I.2.1. Philip Ross et la genèse de la « Mycotecture »	2
I.2.2. L'apport de la recherche universitaire	3
I.3. Entreprises innovantes utilisant le mycélium.....	4
I.3.1. Ecovative	4
I.3.2. Mogu	6
I.3.3. MycoTile	7
I.4. Secteurs d'applications industrielles des composites de mycélium.....	9
I.5. Notions fondamentales relatives à la structure du bio composite	11
I.6. Conclusion.....	12

CHAPITRE II : État de l'art sur les matériaux à base de mycélium

II.1. Introduction	14
II.2. Travaux antérieurs sur les matériaux à base de mycélium.....	14
II.2.1. Études sur les propriétés thermiques	15
II.2.2. Études sur les performances acoustiques	15
II.2.3. Études mécaniques et physiques	16
II.3. Influence des paramètres de fabrication.....	16
II.3.1. Type de substrat utilisé.....	17
II.3.2. Densité du matériau.....	17

II.3.3.	Conditions de croissance du mycélium	17
II.4.	Comparaison avec d'autres matériaux biosourcés	18
II.4.1.	Comparaison thermique	18
II.4.2.	Comparaison mécanique	19
II.4.3.	Comparaison environnementale	20
II.5.	Limites des travaux existants	21
II.6.	Conclusion.....	21

CHAPITRE III : Matériels et méthodes

III.1.	Introduction	24
III.2.	Matériaux utilisés	24
III.1.	Sciure de bois	24
III.2.	Paille de blé	26
III.3.	Feuilles de palmier dattier	27
III.4.	Stipe de palmier.....	28
III.5.	Formulations expérimentales des bio composites :	30
III.6.	Conception et caractéristiques du moule de mise en forme :	31
III.7.	Protocole de fabrication du bio composite à base de mycélium	33
III.1.	Procédé de fabrication du bio-composite à base de mycélium	33
III.2.	Préparation du substrat	33
III.3.	Stérilisation du substrat	34
III.4.	Inoculation du substrat	35
III.5.	Mise en moule	36
III.6.	Incubation.....	36
III.7.	Démoulage	37
III.8.	Séchage.....	37
III.9.	Produit final obtenu.....	38
III.10.	Conclusion.....	39

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

IV.1.	Introduction	41
IV.2.	Suivi visuel de l'évolution des échantillons	41
IV.2.1.	Observation des échantillons Première formulation	41
IV.2.2.	Observation des échantillons de deuxième formulation	42
IV.2.2.1.	Observation les échantillons au 9 mars	42
IV.2.2.2.	Observation des échantillons au 15 mars	43

IV.2.2.3.	Observation des échantillons au 24 mars	44
IV.2.2.4.	État des échantillons avant démoulage.....	45
IV.2.2.5.	État des échantillons après démoulage.....	46
IV.2.3.	Analyse comparative de l'évolution morphologique	47
IV.3.	Densité sèche.....	50
IV.3.1.	Résultats de l'essai obtenu	51
IV.3.2.	Interprétation des valeurs mesurées	53
IV.3.3.	Discussion des résultats.....	54
IV.4.	Conductivité thermique	55
IV.4.1.	Discussion des résultats.....	56
IV.5.	Absorption d'eau	58
IV.5.1.	Résultats expérimentaux	58
IV.5.2.	Discussion des résultats.....	60
IV.6.	Conclusion.....	61
CONCLUSIONS générales.....		62
Annexes.....		64
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		65

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Les biomatériaux à base de mycélium

Figure I.1: Philip Ross et exemples de structures réalisées à partir de mycélium.....	3
Figure I. 1: Évolution des financements d'Ecovative (2007–2024)	5
Figure I.2: Produits développés par Ecovative : a: biomatériaux à base de mycélium, b : emballages biodégradables, c: matériaux isolants0.....	5
Figure I.3: Évolution des financements de Mogu entre 2015 et 2024.....	7
Figure I 4: Panneaux acoustiques et revêtements décoratifs à base de mycélium développés par Mogu.....	7
Figure I.5: Évolution des financements de MycoTile entre 2017 et 2025.....	8
Figure I .7 : Panneaux d'isolation à base de mycélium développés par MycoTile au Kenya.	9
Figure I 6: Exemple d'emballage biodégradable à base de mycélium.....	9
Figure I.7: Panneaux isolants et briques fabriqués à partir de mycélium.....	10
Figure I.8: Exemples de mobilier et d'objets décoratifs à base de mycélium.....	10
Figure I.9: Exemple de cuir végétal obtenu à partir de mycélium.....	11
Figure I.10: Structure microscopique du mycélium.....	12

Chapitre II : État de l'art sur les matériaux à base de mycélium

Figure II. 1: comparaison thermique.....	19
Figure II. 2: Comparaison mécanique.....	20

Chapitre III : Matériels et méthodes

Figure III.1: 6,3 mm < SB diamètre < 10 mm.....	25
Figure III. 2: 4 mm < SB diamètre < 6,3 mm.....	25
Figure III. 3: SB diamètre > 10 mm.....	26

Figure III. 4 : Paille broyée utilisée comme substrat.....	27
Figure III. 5: Copeaux de feuille de palmier préparés comme substrat.....	28
Figure III. 6: Stipe de palmier préparées pour le substrat.....	29
Figure III. 7: Schéma du moule PVC pour culture de mycélium.....	33
Figure III. 8: Moules cylindriques utilisés pour la fabrication des éprouvettes.....	33
Figure III. 9 : stérilisation du substrat a l'autoclave.....	35
Figure III. 10 : Autoclave de stérilisation.....	35
Figure III. 11 : Conditionnement du substrat avant autoclavage.....	35
Figure III. 12 : Conditionnement du substrat après autoclavage.....	35
Figure III. 13: étape de fabrication du bio composite à base de mycélium.....	38

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1 : résultats obtenus des échantillons de première inoculation.....	42
Figure IV.2 : formulation 1.....	43
Figure IV.3: formulation 8.....	43
Figure IV.4: formulation 10.....	43
Figure IV.5: formulation 1.....	44
Figure IV.6: formulations 11.....	44
Figure IV.7 : formulation 7.....	44
Figure IV.8 : formulation 7.....	45
Figure IV.9 : formulation 7.....	45
Figure IV.10 : formulation 7.....	45
Figure IV.11: Échantillons avant démoulage.....	45

Figure IV.12 : Échantillons après démoulage.....	46
Figure IV.13: comparaison de colonisation mycélienne des différentes formulations en fonction du temps.....	49
Figure IV.14: Comparaison de la densité sèche.....	52
Figure IV.15 : Montage expérimental de l'essai de conductivité thermique.....	56
Figure IV.16: la conductivité thermique des formulations élaborées.....	56

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : État de l’art sur les matériaux à base de mycélium

Tableau II. 1: comparaison thermique.....	18
Tableau II. 2: Comparaison mécanique.....	19
Tableau II. 3: Principales limites des bio composites à base de mycélium.	21

Chapitre III : Matériels et méthodes

Tableau III. 1: Comparaison des caractéristiques des déchets agricoles utilisés comme renfort	29
Tableau III. 2: Tableau des compositions des matériaux organiques et du spawn	30
Tableau III. 3: Quantité d’eau et densité des formulations expérimentales	31
Tableau III. 4: Caractéristiques du moule utilisé dans l’étude	32

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.1: Évolution du taux de colonisation des formulations en fonction du temps.	49
Tableau IV. 2: Tableau des résultats de densité sèche.	51
Tableau IV.3: Résultats expérimentaux de la conductivité thermique.....	55
Tableau IV. 4: Évolution de la masse des différentes formulations en fonction du temps d’immersion dans l’eau.	59
Tableau IV.5: Évolution de l’absorption d’eau des composites à base de mycélium en fonction du temps d’immersion	60

Introduction générale

Face aux défis environnementaux et à la nécessité de réduire l'utilisation des ressources non renouvelables, le secteur de la construction s'oriente progressivement vers le développement de matériaux écologiques et durables. Les matériaux biosourcés constituent aujourd'hui une solution prometteuse grâce à leur faible impact environnemental, leur caractère renouvelable et leur capacité à valoriser les déchets agricoles.

Parmi ces matériaux innovants, les bio-composites à base de mycélium connaissent un intérêt croissant dans le domaine du génie civil. Le mycélium, partie végétative des champignons, possède la capacité de coloniser différents substrats lignocellulosiques et d'agir comme un liant naturel permettant la formation de matériaux légers, biodégradables et respectueux de l'environnement. Ces caractéristiques ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de solutions alternatives dans les domaines de l'isolation thermique, de l'emballage écologique et de la construction durable.

L'étude et la production de ces matériaux imposent une rupture interdisciplinaire majeure, située à la frontière exacte entre la microbiologie appliquée et le génie civil. C'est ce travail académique, mené à l'échelle internationale depuis les années 2010, qui a permis de cartographier l'influence des substrats agricoles et de transformer une curiosité biologique en un véritable matériau d'ingénierie quantifiable. En France, les travaux de doctorat de Gazal (2023) ont validé la faisabilité de ces isolants fongiques. De même, les simulations énergétiques globales menées par Zhang et al. (2022) ont prouvé que l'intégration de ces matrices mycéliennes dans l'enveloppe du bâtiment réduit efficacement les fluctuations thermiques intérieures tout en affichant une empreinte carbone négative. Dans ce contexte, ce travail porte sur le développement d'un bio-composite biosourcé nouvelle génération élaboré à partir de mycélium et de sous-produits végétaux locaux. L'objectif principal est de contribuer à la valorisation des ressources renouvelables et des déchets lignocellulosiques (sciure de bois, paille de blé, résidus de palmier dattier) tout en étudiant les performances physiques, thermiques et mécaniques du matériau obtenu afin d'évaluer son aptitude pour des applications dans le domaine du bâtiment et travaux publics.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres:

Le premier chapitre: présente les principaux acteurs du développement des matériaux à base de mycélium, les entreprises innovantes du secteur, les différentes applications développées ainsi que les notions fondamentales relatives aux bio-composites à base de mycélium.

Le deuxième chapitre: est consacré à l'état de l'art sur les matériaux à base de mycélium et à l'analyse des travaux de recherche réalisés dans ce domaine.

Le troisième chapitre: décrit les matériaux utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée pour la fabrication et la caractérisation des bio-composites.

Le quatrième chapitre: présente les résultats obtenus et leur discussion avant de terminer par une conclusion générale et des perspectives de recherche.

Chapitre I :
Les biomatériaux à base
de mycélium

I.1. Introduction

Ce premier chapitre présente les bases historiques, commerciales et biologiques du matériau. L'utilisation du mycélium n'est plus une simple expérience de laboratoire. C'est aujourd'hui une technologie solide, capable de remplacer les isolants en plastique issus du pétrole.

Pour bien comprendre ce sujet avant d'entrer dans les détails scientifiques, ce chapitre est divisé en trois points principaux :

L'histoire et les chercheurs : Nous expliquons comment on est passé d'un simple champignon à un vrai bloc de construction, depuis les premières briques de mycélium jusqu'aux recherches dans les universités.

- **Les entreprises modèles :** Nous étudions le fonctionnement des deux usines leaders dans le monde (Ecovative, Mogu) ainsi que la première startup en Afrique MycoTile du Kenya, afin de montrer comment ce modèle est possible et rentable en Afrique.
- **La structure et les usages :** Nous décrivons la composition du matériau (le mélange entre le champignon et les déchets végétaux) et ses utilisations concrètes comme l'isolation, l'acoustique ou l'emballage.

I.2. Principaux acteurs du développement des matériaux à base de mycélium

I.2.1. Philip Ross et la genèse de la « Mycotecture »

L'exploration du mycélium comme matériau de construction débute dans les **années 1990** grâce à Philip Ross. En observant la croissance du champignon *Ganoderma lucidum* sur des copeaux de bois, il découvre que le réseau d'hyphes agit comme une colle biologique capable de solidifier des résidus organiques volatils [1].

Son parcours technique se résume en quatre étapes majeures :

- **Années 1990 (Découverte) :** Observation de la capacité naturelle du mycélium à agglomérer, durcir et lier les particules de bois sous une forme contrôlée.
- **2009 (Première application) :** Réalisation du projet « **Mycotecture Alpha** », la première structure autoportante au monde construite en briques de mycélium.

- **Introduction du concept (Mycotecture) :** Création de ce terme pour définir la technique de conception d'éléments architecturaux à partir de matrices fongiques.
- **Preuve de concept pour le bâtiment :** Validation des propriétés de moulage précises, d'une grande légèreté, d'une stabilité après séchage thermique et d'une résistance naturelle au feu grâce à la chitine présente dans les parois cellulaires.



Figure I.11: Philip Ross et exemples de structures réalisées à partir de mycélium [1]

I.2.2. L'apport de la recherche universitaire

Parallèlement aux initiatives artistiques et industrielles, les laboratoires universitaires ont structuré scientifiquement la filière à partir des années 2010. Leurs travaux ont permis de faire passer le mycélium du statut de curiosité biologique à celui de matériau d'ingénierie quantifiable et standardisé.

L'organisation et l'apport de la recherche mondiale se résument ainsi :

- **Rupture interdisciplinaire :** Intégration de la microbiologie appliquée au sein des départements de Génie Civil et de Science des Matériaux pour maîtriser les mécanismes de croissance sur les substrats lignocellulosiques.
- **Pôles de recherche majeurs :** Structuration de la recherche autour de trois zones géographiques principales :
- **Europe (Belgique, Italie) :** pionnière dans l'étude de l'influence de la granulométrie des substrats agricoles et de la durabilité.
- **Amérique du Nord (États-Unis) :** Spécialisée dans la simulation énergétique, le comportement au feu et le développement d'alternatives aux mousses synthétiques.
- **Asie :** Axée sur l'optimisation des propriétés poreuses pour l'isolation acoustique.

I.3. Entreprises innovantes utilisant le mycélium

I.3.1. Ecovative

Fondée en 2007 par Eben Bayer et Gavin McIntyre au Rensselaer Polytechnic Institute, l'entreprise américaine Ecovative est la première entité au monde à avoir industrialisé les composites fongiques pour remplacer les isolants et mousses dérivés du pétrole [2].

Son modèle technologique et commercial se résume en trois piliers pragmatiques :

- **Le procédé breveté** : Inoculation d'un réseau mycélien au sein de biomasses lignocellulosiques locales (tiges de chanvre, coques de maïs, résidus de soja). Le réseau d'hyphes colonise le substrat en quelques jours pour former une structure solide et légère, définitivement stabilisée par inactivation thermique (séchage). [2].
- **Les innovations majeures** :
 - Mushroom Packaging : Un substitut biodégradable et compostable au polystyrène expansé (EPS), déjà adopté par des multinationales comme IKEA, DELL, Steelcase et Puma. [3]
 - Panneaux isolants structurels : Matériaux isolants thermiques et acoustiques à faible empreinte carbone et haute résistance naturelle au feu.
 - Technologie AirMycelium™ : Développement de structures mycéliennes pures et souples destinées à remplacer le cuir animal dans l'industrie textile et de la maroquinerie. [4]
- **Impact d'ingénierie** : Validation à l'échelle macroscopique d'un modèle d'économie circulaire viable, capable de détourner les déchets agricoles pour éliminer les plastiques expansés et les isolants synthétiques.

La figure ci-dessous présente l'évolution des financements ainsi que les principales étapes du développement d'Ecovative entre 2007 et 2024. Elle met en évidence la croissance progressive de l'entreprise, depuis sa création et ses activités de recherche et développement jusqu'aux importantes levées de fonds ayant soutenu son expansion industrielle.

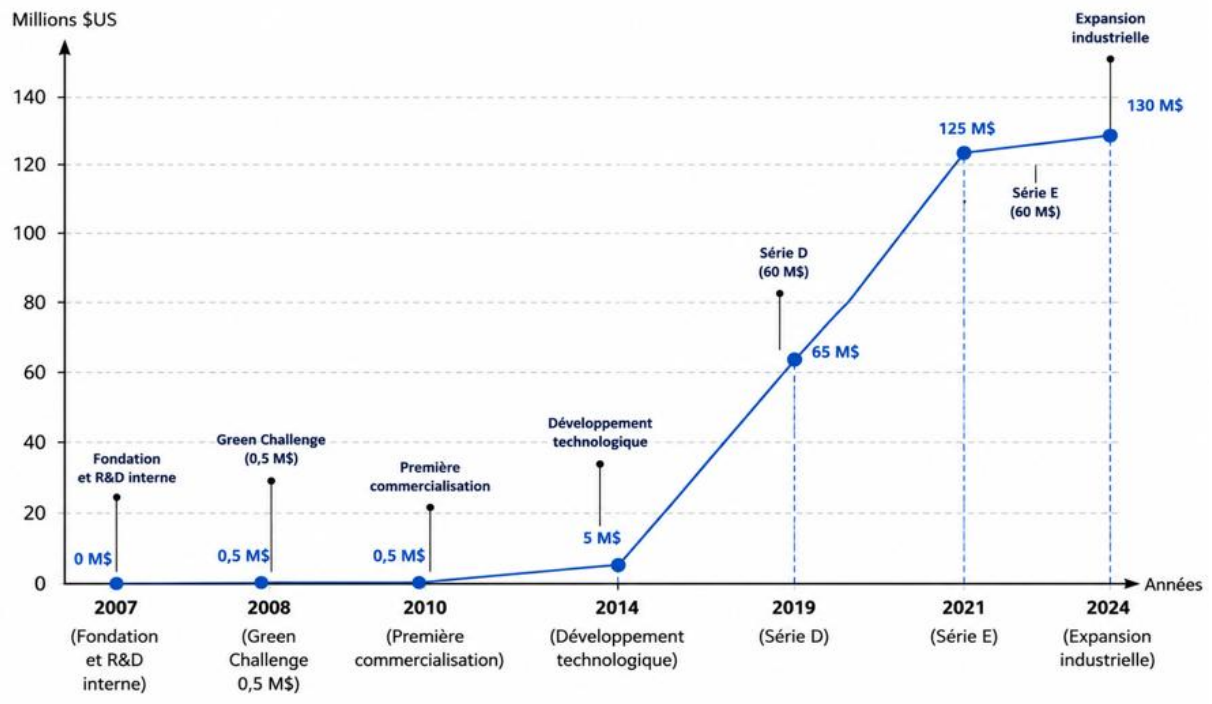


Figure I. 12: Évolution des financements d'Ecovative (2007–2024)



a



b



c

Figure I.13: Produits développés par Ecovative : a : biomatériaux à base de mycélium, b : emballages biodégradables, c : matériaux isolants.[9]

I.3.2. Mogu

Fondée en 2015 en Italie par le designer et chercheur Maurizio Montalti, Mogu est l'entreprise de référence en Europe pour l'intégration des composites mycéliens dans l'aménagement intérieur et l'architecture durable.

Son apport technique et industriel s'articule autour de trois axes fondamentaux :

- **Substrats et bio-fabrication** : Valorisation d'une gamme élargie de résidus agricoles, de sous-produits industriels et de déchets textiles. Le processus de colonisation fongique et de stabilisation par séchage thermique permet de produire des éléments de second œuvre légers et biodégradable [5] [6].
- **Spécialisation acoustique** : Conception de panneaux correcteurs acoustiques haut de gamme destinée aux infrastructures professionnelles et publiques (bureaux, salles de conférence, établissements scolaires). Grâce à la porosité tridimensionnelle naturelle du réseau d'hyphes, ces matrices captent les ondes sonores et réduisent efficacement la réverbération du bruit [5] [6].
- **Gamme de produits et débouchés** :
 - Revêtements muraux décoratifs : panneaux texturés offrant une alternative esthétique et biosourcée aux finitions intérieures classiques.
 - Dalles de sol écologiques : Formulation densifiée répondant aux exigences mécaniques d'usure tout en affichant une empreinte carbone négative et une faible consommation d'énergie grise.

La figure ci-dessous présente l'évolution des investissements et des levées de fonds de l'entreprise (Mogu) depuis sa création en 2015.

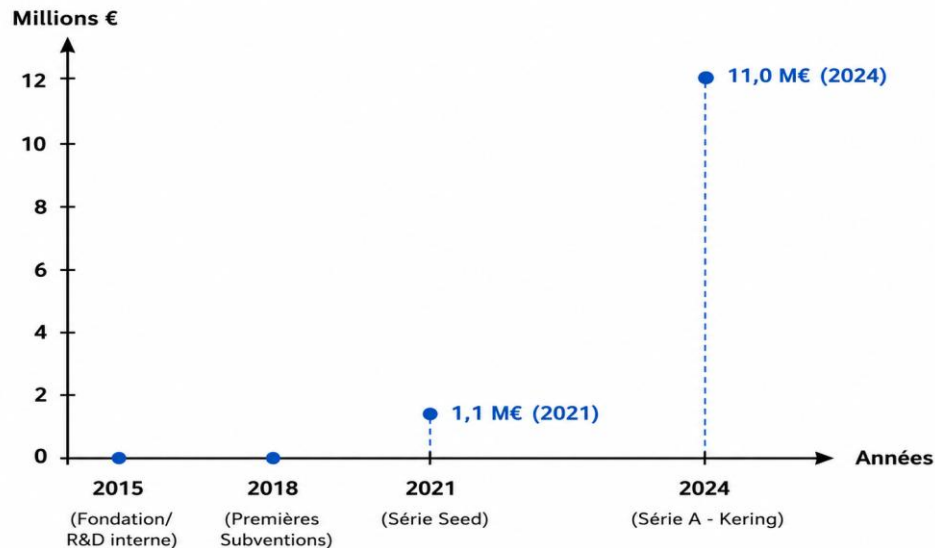


Figure I.14: Évolution des financements de Mogu entre 2015 et 2024

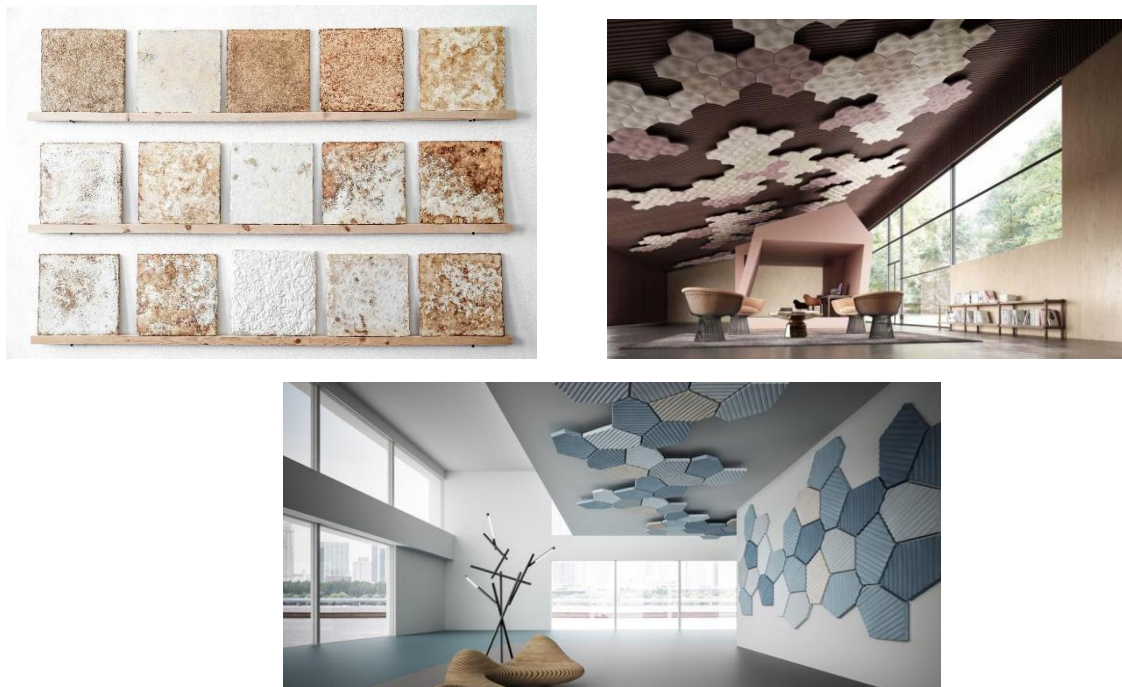


Figure I 15: Panneaux acoustiques et revêtements décoratifs à base de mycélium développés par Mogu.[12]

I.3.3. MycoTile

Fondée en **2019** au Kenya par Mtamu Kililo, MycoTile est une entreprise pionnière qui démontre la viabilité technique et économique des composites mycéliens face aux réalités climatiques, sociales et industrielles du continent africain.[7]

Son approche pragmatique et son développement se résument en quatre points clés:

- **Valorisation des biomasses locales :** Le procédé repose sur l'agglomération de résidus agricoles tropicaux abondants et sous-valorisés, notamment la bagasse de canne à sucre, les épis de maïs, les coques de café et la fibre de coco.
- **Technologie et performances :** Les déchets sont naturellement liés par la croissance contrôlée du réseau d'hyphes, puis stabilisés par traitement thermique. Les panneaux obtenus garantissent d'excellentes propriétés d'isolation thermique, d'absorption acoustique et une haute résistance au feu.
- **Applications et intégration sur le marché :** L'entreprise produit des cloisons sèches, des plafonds suspendus et des éléments de toiture, déjà intégrés dans des projets immobiliers pilotes à Nairobi pour fournir des logements abordables et isolés.
- **Levée de fonds et viabilité économique :** Preuve de la solidité de son modèle, la startup a réussi à capter des financements internationaux majeurs, notamment auprès du fonds d'accélération africain Baobab Network et du prestigieux MassChallenge. Ces levées de fonds ont permis de financer le passage du prototype de laboratoire à une unité de production semi-industrielle.

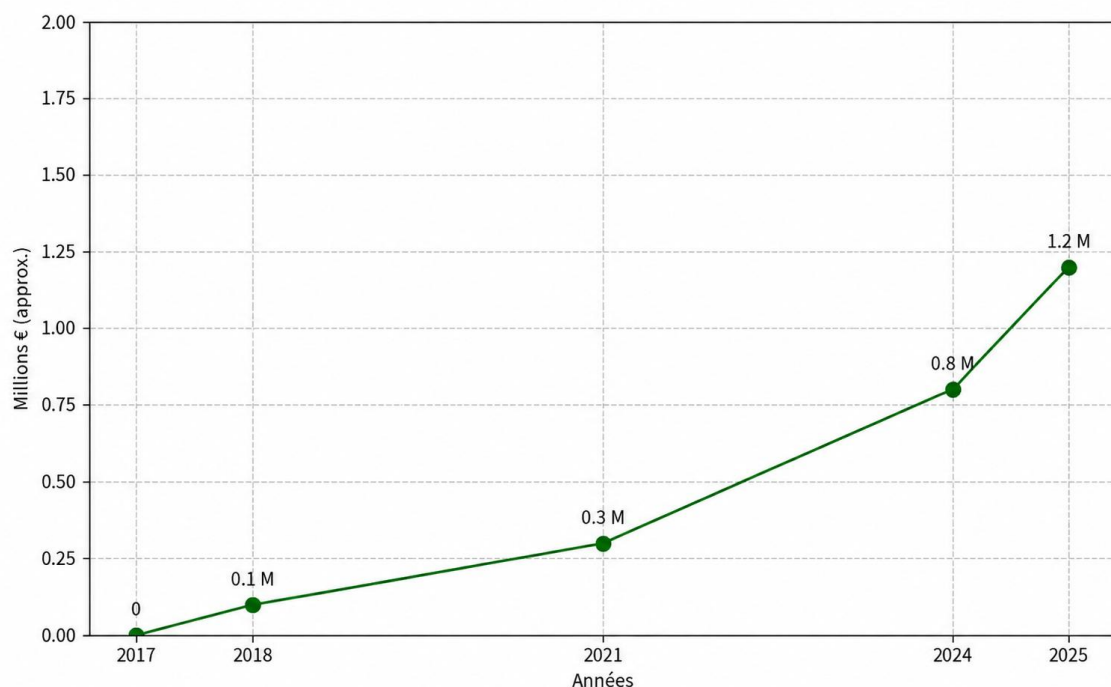


Figure I.16: Évolution des financements de MycoTile entre 2017 et 2025

- **MycoTile constitue la preuve de concept indispensable pour notre projet:** elle valide qu'un modèle de production circulaire basé sur le mycélium est parfaitement transposable, finançable par des investisseurs et rentable dans une économie en développement.



Figure I 17 : Panneaux d'isolation à base de mycélium développés par MycoTile au Kenya.[7]

I.4. Secteurs d'applications industrielles des composites de mycélium

L'analyse des entreprises pionnières montre que les applications du mycélium se structurent aujourd'hui autour de trois grands secteurs industriels :

- **L'emballage et le packaging (Alternative au PSE) :** Utilisation de la capacité de moulage du matériau pour concevoir des emballages de protection sur mesure, résistants aux chocs, thermo-isolants et 100 % compostables en fin de vie [2].



Figure I 18: Exemple d'emballage biodégradable à base de mycélium

Le second œuvre et l'aménagement intérieur : Fabrication de dalles de plafonds suspendus, de revêtements muraux acoustiques et de cloisons sèches légères pour le secteur du bâtiment.



Figure I.19: Panneaux isolants et briques fabriqués à partir de mycélium.

- **Le design et le mobilier durable :** Création d'objets du quotidien (chaises, luminaires, modules décoratifs) exploitant la rigidité naturelle du biocomposite après sa stabilisation thermique.



Figure I.20: Exemples de mobilier et d'objets décoratifs à base de mycélium.

1. **L'industrie textile et la maroquinerie (Cuir végétal) :** Développement de matrices de mycélium pur et souple (comme la technologie *AirMycelium™*). Ces structures offrent une alternative écologique et haut de gamme au cuir animal et synthétique, avec des débouchés majeurs dans la mode, la maroquinerie et le revêtement d'ameublement.



Figure I.21: Exemple de cuir végétal obtenu à partir de mycélium.

I.5. Notions fondamentales relatives à la structure du bio composite

Le matériau développé dans ce travail n'est pas un bloc homogène, mais un système composite multiphasique complexe. Sa structuration microscopique et sa cohésion macroscopique reposent sur l'interaction entre deux composants principaux :

- **Le renfort (La phase dispersée / Le substrat lignocellulosique) :** Nature : Constitué de sous-produits végétaux (dans notre étude : sciure de bois, paille de blé, résidus de palmier dattier).
 - Rôle : Il sert de support physique tridimensionnel et de source nutritive (carbone, azote, lignine, cellulose) pour le développement du champignon. Sa granulométrie et sa porosité initiale dictent en grande partie la densité finale du bio composite.
- **La matrice (La phase continue / Le liant biologique) :** * Nature : Le mycélium, qui est le réseau végétatif filamenteux des champignons, composé de cellules allongées appelées *hyphes* (Figure 10)
 - Rôle : En se développant, les hyphes sécrètent des enzymes extracellulaires pour digérer partiellement la surface du substrat. Ce réseau s'insère dans les interstices, s'enroule autour des particules végétales et agit comme une colle biologique ultrapuissante en solidifiant la biomasse lâche.

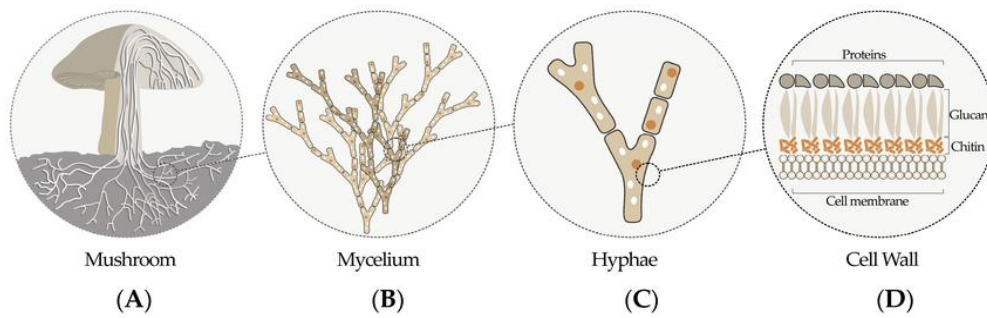


Figure I.22: Structure microscopique du mycélium

- **Le matériau composite final :**

- Structure : Une matrice poreuse, anisotrope et biosourcée. Sa stabilité est obtenue par une désactivation thermique (séchage) qui stoppe définitivement la croissance biologique.
- Dépendance factorielle : Les propriétés finales du matériau (mécaniques, thermiques et hydriques) dépendent directement du couple "**essence fongique / nature du substrat**", de la durée d'incubation et des conditions de compactage.

I.6. Conclusion

En conclusion, ce premier chapitre a permis de cartographier l'évolution rapide des composites à base de mycélium, confirmant leur passage du statut de curiosité biologique au rang de matériau d'ingénierie. Qu'il s'agisse des travaux pionniers de Philip Ross ou des succès industriels d'entreprises comme *Ecovative*, *Mogu* et *MycoTile*, la faisabilité technique de cette colle biologique est aujourd'hui une réalité sur les marchés de l'emballage, du second œuvre et du textile.

D'un point de vue structurel, il est désormais établi que les performances macroscopiques de ce bio composite multiphasique dépendent intimement du triptyque : **nature du renfort végétal, efficacité de la matrice fongique et protocole d'inactivation thermique**.

Cependant, pour valider scientifiquement l'intégration de ces matrices dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, l'analyse descriptive ne suffit plus. Il est indispensable de quantifier précisément leurs propriétés physiques et mécaniques. C'est précisément l'objet du **Chapitre II**, qui dressera un **état de l'art approfondi et critique** des performances thermiques, acoustiques, hydriques et mécaniques répertoriées dans la littérature internationale, tout en

ciblant les verrous technologiques (notamment la sensibilité à l'eau) que notre propre campagne expérimentale devra tenter de lever.

Chapitre II :
État de l'art sur les
matériaux à base de
mycélium

II.1. Introduction

Après avoir présenté l'histoire, les entreprises modèles et la biologie du matériau dans le premier chapitre, ce Chapitre II analyse ses performances techniques réelles à travers les recherches scientifiques mondiales. Il regroupe les données existantes sur les capacités thermiques, acoustiques et mécaniques de ces bio-composites pour évaluer leur utilité réelle dans le domaine du bâtiment. Ce chapitre examine également comment les choix de fabrication, comme le type de déchet végétal utilisé, le temps d'incubation ou la densité, font varier les propriétés physiques du matériau final. Enfin, il compare le mycélium aux isolants classiques du marché et met en évidence ses limites techniques actuelles, notamment sa forte sensibilité à l'eau, afin de bien justifier l'intérêt de notre propre étude expérimentale en laboratoire.

II.2. Travaux antérieurs sur les matériaux à base de mycélium

Les matériaux à base de mycélium représentent une classe émergente de bio-composites obtenus par un procédé de bio-fabrication fondé sur la croissance contrôlée de champignons filamenteux sur des substrats lignocellulosiques (déchets agricoles, sciures, fibres végétales, résidus céréaliers, etc.). Le mycélium, constitué d'un réseau tridimensionnel d'hyphes interconnectés, agit comme un liant biologique naturel. Lors de la colonisation, les hyphes pénètrent le substrat, s'entrelacent et forment une matrice fibreuse cohésive assurant l'assemblage des particules végétales.

À l'issue de la phase de croissance, un traitement thermique (séchage ou chauffage contrôlé) est appliqué afin d'inactiver l'activité biologique et de stabiliser structurellement le composite [8].

Ces biomatériaux présentent plusieurs caractéristiques particulièrement attractives:

- Une faible densité apparente,
- Une biodégradabilité complète en fin de vie,
- Une capacité isolante thermique notable,0
- Une résistance au feu intéressante liée à la formation de résidus carbonés (char) lors de la combustion.

Les travaux récents indiquent que les composites mycéliens peuvent constituer une alternative durable aux mousses synthétiques telles que le polystyrène expansé (EPS) ou le polyuréthane,

notamment dans les applications d'isolation thermique, d'emballage et dans certaines fonctions non structurelles du bâtiment [9].

II.2.1. Études sur les propriétés thermiques

Les propriétés thermiques représentent l'un des axes majeurs de recherche sur les composites à base de mycélium, car ces matériaux sont principalement envisagés pour des applications d'isolation. Les valeurs de conductivité thermique rapportées dans la littérature se situent généralement dans une plage comparable à celle des isolants naturels ou synthétiques.

- **Résultats sur déchets agricoles :** l'étude de Mbabali. (2024), portant sur des composites à base de balles de riz et sciure de bois liés par *Pleurotus ostreatus*, rapporte une conductivité thermique comprise entre 0,069 et 0,080 W/mK, confirmant un potentiel intéressant pour des applications d'isolation et de panneaux légers. [10]
- **Simulation énergétique :** De manière similaire, Zhang. (2022) ont étudié un matériau isolant obtenu par croissance naturelle du mycélium sur des grains de seigle. Ils indiquent que les composites mycéliens possèdent des performances thermiques comparables à des matériaux d'isolation conventionnels. L'étude inclut également une simulation énergétique (Energy Plus) montrant que l'intégration du mycélium dans l'enveloppe du bâtiment peut réduire les fluctuations de température intérieure et diminuer les besoins en chauffage/refroidissement dans plusieurs zones climatiques. [11]

Ainsi, les travaux académiques convergent vers l'idée que la structure poreuse du réseau mycélien et la présence d'air piégé dans le matériau jouent un rôle majeur dans la réduction de la conductivité thermique.

II.2.2. Études sur les performances acoustiques

Même si les articles fournis ne développent pas en détail les performances acoustiques sont également étudiées dans la littérature car les matériaux mycéliens présentent une structure très poreuse, favorable à l'absorption des ondes sonores. Les composites mycéliens sont donc envisagés comme panneaux acoustiques ou matériaux absorbants dans les bâtiments.

- **Structure poreuse :** La revue scientifique de Sreerag (2025) souligne que les matériaux à base de mycélium possèdent des caractéristiques adaptées à l'isolation acoustique, en raison de leur porosité et de leur structure fibreuse [8].

- **Mécanisme d'absorption** : La littérature confirme que l'architecture interne (distribution des pores, densité, orientation des fibres végétales) influence fortement le comportement acoustique, comme c'est le cas dans les matériaux isolants traditionnels.

II.2.3. Études mécaniques et physiques

Les propriétés mécaniques sont l'un des défis majeurs pour l'utilisation du mycélium dans la construction. En général, ces matériaux sont classés comme mousses rigides ou semi-rigides, ce qui limite leur emploi à des fonctions non porteuses (isolants, remplissage, panneaux légers).

- **Comportement standard** : Dans l'étude de Mbabali. (2024), la résistance en compression des composites à base de balles de riz et sciure atteint jusqu'à 265 kPa, avec un module de Young pouvant atteindre 0,615 MPa. Cependant, les matériaux restent fortement hydrophiles, avec une absorption d'eau pouvant dépasser 200 %. De plus, la densité mesurée dans cette étude varie entre 0,153 et 0,239 g/cm³, confirmant le caractère léger du matériau, mais indiquant aussi que la densité est un facteur déterminant dans l'amélioration de la rigidité. [10]
- **Effet du renforcement et de la pré-charge** : Dans une approche plus orientée renforcement, Kaffash. (2026) ont étudié un composite renforcé par fibres de palmier dattier, colonisé par *Pleurotus eryngii*. Les résultats montrent que la compression préalable (pré-charge) améliore fortement les propriétés mécaniques, avec une résistance en compression pouvant atteindre 4,55 MPa, ce qui est nettement supérieur aux valeurs habituellement rapportées pour des composites mycéliens classiques. [12]
- **Compromis performance / environnement** : Enfin, l'étude de Gazelle Bagheriehnaajjar. (2023) combine essais mécaniques et analyse environnementale. Les auteurs montrent qu'en fonction du type de fibres ajoutées (bambou, copeaux), la résistance et la rigidité peuvent être optimisées, mais qu'il existe toujours un compromis entre performance mécanique et impact environnemental.[13]

II.3. Influence des paramètres de fabrication

Les performances finales des composites mycéliens dépendent fortement des paramètres de fabrication. Les études récentes insistent sur le fait que ces matériaux sont "ajustables" (tunable), ce qui signifie qu'il est possible de modifier leurs propriétés en contrôlant la composition et les conditions de croissance.

II.3.1. Type de substrat utilisé

Le substrat joue un rôle fondamental, car il influence à la fois la cinétique de croissance du champignon et la structure poreuse interne du composite.

- **Rapport Lignine / Cellulose :** Mbabali (2024) montrent que la balle de riz contient plus de lignine que la sciure, ce qui ralentit la croissance mais améliore certaines propriétés comme la résistance au feu et la résistance mécanique finale. Au contraire, la sciure contient davantage de cellulose, ce qui favorise la croissance mais peut donner des performances thermiques et mécaniques différentes. [10]
- **Qualité du réseau :** La revue de Sreerag. (2025) confirme que la sélection du substrat est essentielle, car elle modifie directement la densité du réseau de mycélium et les performances globales du matériau. [8]

II.3.2. Densité du matériau

La densité influence directement les propriétés mécaniques et thermiques. En général, plus la densité augmente, plus la résistance mécanique s'améliore, mais la capacité isolante diminue à mesure que les pores d'air sont réduits.

- **Comportement en flexion :** Zhang. (2022) démontrent que des composites présentant une densité plus élevée affichent une meilleure résistance mécanique, notamment en flexion, lorsque l'humidité ambiante reste faible ou moyenne. [11]
- **Effet de la compaction :** De même, Bagheriehnajjar. (2023) montrent que la densité augmente mécaniquement lorsque les échantillons subissent une pré-compression lors du moulage, ce qui améliore la résistance finale en compression et en flexion. [13]

II.3.3. Conditions de croissance du mycélium

Le développement de la matrice dépend de facteurs environnementaux stricts : la température, l'humidité relative, la durée d'incubation, la disponibilité en oxygène et l'absence de contamination microbiologique

- **Durée d'incubation** : Dans l'étude de Mbabali. (2024), l'incubation varie entre 30 et 40 jours. Les résultats prouvent que l'allongement du temps de croissance permet au mycélium de combler les vides résiduels entre les particules, ce qui augmente la densité apparente et la cohésion macroscopique. [10]
- **Incubation en deux phases** : Kaffash. (2026) insistent sur l'importance d'un processus en deux phases (incubation primaire + secondaire) associés à une manipulation du substrat. Une agitation après 7 permet de casser le réseau d'hyphes initial afin de favoriser une recolonisation ultérieure beaucoup plus homogène. [12]
- **Humidité relative** : Enfin, Zhang. (2022) mettent en garde sur le fait que l'humidité ambiante affecte fortement les propriétés mécaniques. Une humidité trop élevée provoque une absorption d'eau précoce qui dégrade l'interface entre le mycélium et le substrat végétal, chutant ainsi la résistance en flexion. [11].

II.4. Comparaison avec d'autres matériaux biosourcés

Les matériaux à base de mycélium s'inscrivent dans la famille des matériaux biosourcés utilisés dans le bâtiment, aux côtés du chanvre, de la laine de bois, de la ouate de cellulose, du liège expansé ou encore de la paille compressée.

II.4.1. Comparaison thermique

Les composites mycéliens présentent une conductivité thermique généralement comprise entre 0,05 et 0,08 W/m·K, selon la formulation et la densité.[10]

Tableau II. 1: comparaison thermique.

Matériau	Conductivité thermique (W/m·K)
Mycélium	0,05 – 0,08
Laine de bois	0,038 – 0,045
Chanvre	0,040 – 0,048
Ouate de cellulose	0,038 – 0,042
EPS	0,030 – 0,038

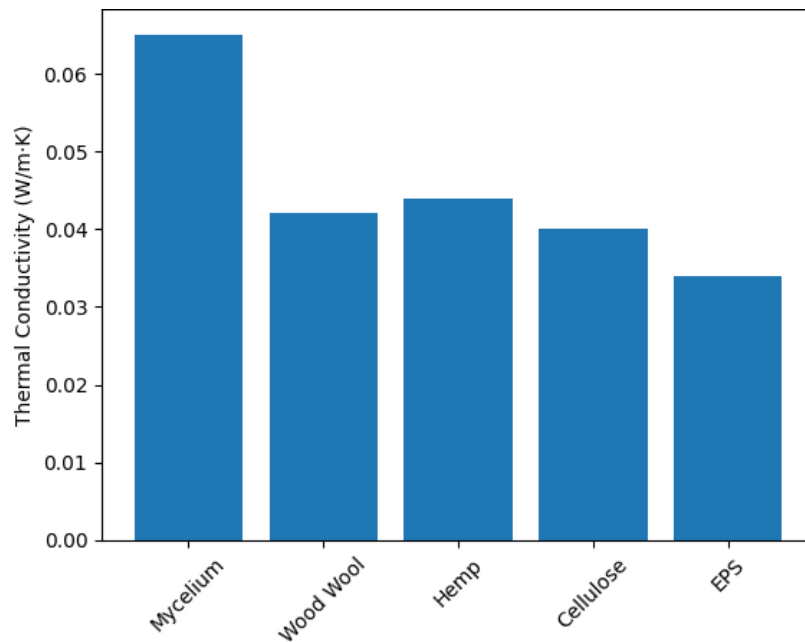


Figure II. 1: comparaison thermique

II.4.2. Comparaison mécanique

Les composites mycéliens standards présentent une résistance en compression typiquement inférieure à 1 MPa, sauf en cas de renforcement et de pré-compression.

On observe que les matériaux mycéliens sont légèrement moins performants thermiquement que les meilleurs isolants biosourcés, mais restent dans une plage acceptable pour l'isolation non structurelle.

Ainsi, les matériaux mycéliens peuvent atteindre des performances similaires aux bétons végétaux légers, mais restent limités pour des applications porteuses. [12]

Tableau II. 2: Comparaison mécanique

Matériau	Résistance en compression
Mycélium (standard)	0,1 – 0,6 MPa
Mycélium renforcé	Jusqu'à 4,5 MPa
Béton de chanvre	0,3 – 3 MPa
Panneaux fibre bois	0,2 – 1 MPa

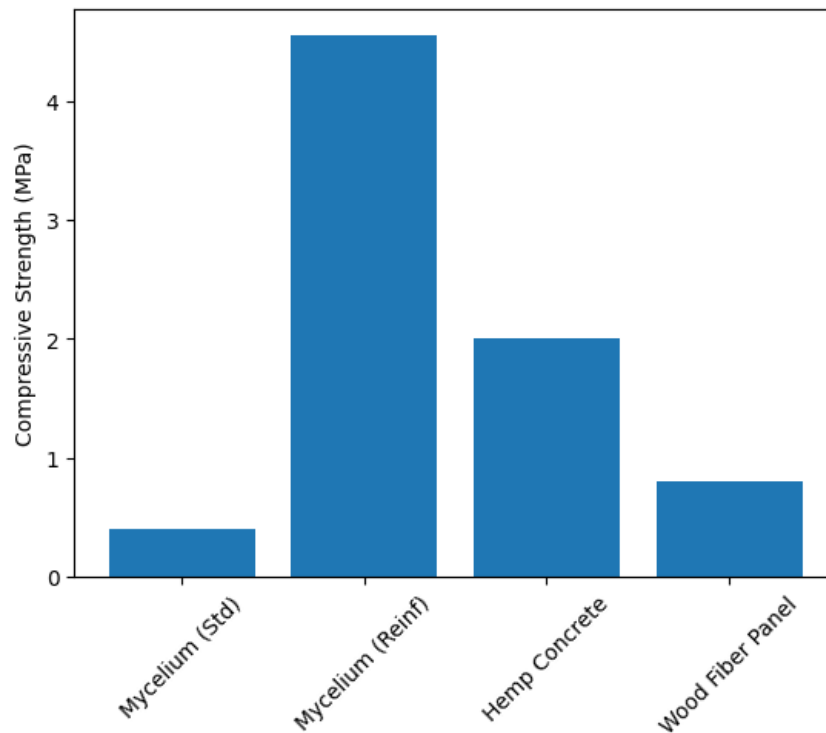


Figure II. 2: Comparaison mécanique

II.4.3. Comparaison environnementale

Les études d'analyse du cycle de vie (ACV) montrent que les composites mycéliens ont un impact environnemental inférieur aux isolants synthétiques.

Comparativement :

- Pas de liants pétrochimiques
- Valorisation de déchets agricoles
- Biodégradabilité totale en fin de vie
- Faible énergie grise (hors consommation électrique)

En revanche, certaines études soulignent que la consommation électrique lors de la phase d'incubation peut représenter une part significative des émissions globales. [13]

II.5. Limites des travaux existants

Malgré leur potentiel, plusieurs limitations freinent aujourd'hui l'industrialisation des matériaux mycéliens.

Tableau II. 3: Principales limites des bio composites à base de mycélium.

Limitation	Description
Sensibilité à l'humidité [11]	Absorption d'eau élevée (> 200 % dans certains cas). Diminution de la résistance mécanique et dégradation de l'interface mycélium–substrat en présence d'humidité. Nécessite des traitements complémentaires (hydrophobisation, revêtement).
Résistance mécanique limitée [11]	Les composites non densifiés présentent une rigidité modérée, limitant leur utilisation à des applications non structurales. Des améliorations sont possibles par renforcement fibreux, pré-compression ou pressage thermique.
Durabilité à long terme [11]	Peu de données disponibles sur le vieillissement accéléré, les cycles gel/dégel et le comportement en conditions réelles. La stabilité à long terme (20–30 ans) reste à démontrer malgré les résultats encourageants du séchage thermique.

II.6. Conclusion

En conclusion, cet état de l'art a permis de quantifier précisément les performances réelles des composites à base de mycélium à travers la littérature scientifique mondiale. Les données confirment que ce matériau est une alternative très sérieuse pour l'isolation thermique et acoustique du second œuvre. Cependant, ses faiblesses techniques sont également claires : une résistance mécanique limitée pour des rôles porteurs et une forte sensibilité à l'humidité.

L'analyse des travaux antérieurs nous montre surtout que ces performances ne sont pas figées. Elles dépendent entièrement de choix de fabrication rigoureux, tels que le type de déchet végétal utilisé, le taux de compression et le temps d'incubation du champignon.

Pour dépasser la théorie et adapter cette technologie aux réalités de notre pays, nous devons maintenant passer à l'action en laboratoire. C'est précisément l'objet du Chapitre III, qui va décrire en détail notre propre méthodologie expérimentale. Nous y présenterons nos matières premières locales (la sciure de bois, la paille de blé et les résidus de palmier dattier), le protocole

de bio-fabrication que nous avons développé, ainsi que les essais précis utilisés pour tester nos propres panneaux composites.

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Comme l'a démontré l'état de l'art du chapitre précédent, les performances d'un composite de mycélium ne sont pas le fruit du hasard : elles dépendent entièrement du contrôle rigoureux des choix de fabrication, notamment la nature du substrat, le taux d'humidité et le mode de compactage. Ce Chapitre III passe donc de la théorie à la pratique en décrivant précisément le protocole expérimental mis en œuvre au sein de différents laboratoires impliqués dans ce projet (EOLE, LAMABE, MDC).

Pour offrir une lecture claire et transparente, nous présentons en premier lieu les caractéristiques physiques et chimiques de nos quatre matières premières locales : la sciure de bois, la paille de blé, les feuilles et les stipes de palmier dattier. Nous détaillons ensuite la matrice des douze (12) formulations sèches testées et la conception de notre moule cylindrique perforé en PVC, spécialement dimensionné pour optimiser la respiration du champignon. Enfin, nous exposons pas à pas le protocole de bio-fabrication, depuis la stérilisation à l'autoclave (121 °C, 20 min) jusqu'à la phase critique d'inactivation thermique par séchage. Ce cadre méthodologique strict est la condition indispensable pour garantir la reproductibilité de nos échantillons et la fiabilité des essais de caractérisation qui vont suivre.

III.2. Matériaux utilisés

III.1. Sciure de bois

La sciure de bois est un sous-produit lignocellulosique issu des opérations de sciage, de rabotage et de transformation mécanique du bois. Dans les bio-composites à base de mycélium, elle constitue un substrat particulièrement intéressant en raison de sa disponibilité, de sa forte surface spécifique et de sa capacité à être colonisée par le réseau mycélien, qui agit comme liant biologique entre les particules. Les études sur les composites mycéliens montrent que la nature du substrat influence directement la densité, l'homogénéité, la rigidité et le comportement hydrique du matériau final, ce qui confère à la sciure un rôle central dans la structuration du composite.

D'un point de vue physique, la sciure se caractérise principalement par sa granulométrie, sa densité apparente, sa densité particulière, sa teneur en humidité et sa teneur en cendres. Une étude récente sur des résidus de scierie rapporte des plages de variation importantes selon

l'origine et le type de résidu, avec des teneurs en humidité pouvant aller d'environ 10 à 60 % sur base humide, des teneurs en cendres de 0,3 à 4 %, des densités apparentes comprises entre 50 et 450 kg/m³, et des densités particulières atteignant environ 359 à 513 kg/m³. Ces paramètres sont déterminants, car ils conditionnent le compactage initial du mélange, l'aération interne du substrat et, par conséquent, la qualité de la colonisation fongique. [14]

Dans le cas des composites à base de mycélium, la sciure n'est pas considérée comme un renfort fibreux continu, mais plutôt comme une matrice particulaire fine. Sa fonction principale n'est donc pas d'apporter une résistance mécanique par traction individuelle, mais d'assurer un bon empilement des particules et une répartition homogène du mycélium dans le volume du matériau. Plusieurs travaux montrent que la taille des particules et le procédé de fabrication influencent fortement les performances finales : une sciure trop grossière peut limiter la compaction et créer des vides excessifs, tandis qu'une fraction trop fine peut réduire la porosité utile et freiner les échanges gazeux nécessaires à la croissance du mycélium. [15]

Dans le cadre expérimental du présent travail, la sciure doit ainsi être tamisée en classes granulométriques homogènes, puis conditionnée à une humidité contrôlée avant inoculation. Cette étape est essentielle pour garantir la reproductibilité des formulations et limiter la variabilité des propriétés finales du bio-composite. En pratique, la sciure peut être utilisée seule comme formulation de référence, ou associée à des fibres végétales plus longues afin d'améliorer l'armature interne du matériau et d'optimiser l'équilibre entre densité, cohésion et légèreté.[16]



Figure III. 1: 6,3 mm < SB diamètre < 10 mm **Figure III. 2 :** 4 mm < SB diamètre < 6,3 mm



Figure III. 3: SB diamètre > 10 mm

III.2. Paille de blé

La paille de blé constitue un résidu agricole abondant, léger et fibreux. Elle présente un intérêt particulier pour les composites biosourcés en raison de sa faible masse volumique apparente et de sa structure creuse, susceptibles d'accroître la porosité du matériau final. Geremew. (2023) ont mesuré, pour une fibre de paille de blé naturellement traitée, une teneur en cellulose de 45,43 %, en hémicellulose de 36,50 % et en lignine de 21,61 %, avec une densité apparente de 0,037 g/cm³, une densité particulaire de 0,194 g/cm³, une humidité de 10,04 % et une teneur en cendres de 1,44 %. Dans une autre étude, des valeurs de cellulose proches de 49,78 % et de lignine proche de 19,64 % ont également été rapportées, ce qui confirme la variabilité liée à l'origine et à la méthode de caractérisation.[17]

Sur le plan mécanique, O'Dogherty. (1995) rapportent, pour des tiges de paille de blé, des résistances en traction comprises entre 21,2 et 31,2 MPa, des résistances au cisaillement entre 4,91 et 7,26 MPa et un module d'Young compris entre 4,76 et 6,58 GPa. Des travaux sur des composites à base de longues pailles de blé indiquent également une résistance en traction voisine de 62 MPa et un module de l'ordre de 8,35 GPa pour la paille considérée comme renfort (Zou et al., 2010). Ces résultats montrent que la paille apporte une rigidité modérée et un allègement intéressant, mais qu'elle reste sensible à l'eau et aux variations dimensionnelles, ce qui impose un contrôle rigoureux de l'humidité avant inoculation.[18]



Figure III. 4 : Paille broyée utilisée comme substrat

III.3. Feuilles de palmier dattier

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) génère chaque année d'importantes quantités de résidus de taille et de récolte. Elseify. (2019) rappellent que des fibres cellulosiques peuvent être extraites de plusieurs parties du palmier, notamment les folioles, les palmes, les pétioles, les spadices et les gaines foliaires. L'intérêt de ces résidus pour les matériaux biosourcés tient à leur disponibilité dans les zones arides et semi-arides, ainsi qu'à leurs propriétés mécaniques spécifiques relativement attractives par rapport à d'autres fibres végétales.[19]

Les propriétés des éléments foliaires du palmier varient fortement selon la partie analysée. Tahri. (2016) ont montré que les fibres extraites des folioles présentent les meilleures performances mécaniques parmi les fractions étudiées, avec une résistance ultime en traction pouvant atteindre environ 1250 MPa lorsque l'angle microfibrillaire est faible et que la cristallinité est élevée. À l'inverse, les fibres issues de la gaine foliaire se révèlent nettement moins performantes. Mahdi. (2021), travaillant sur une fibre foliaire de palmier de cultivar Khalasa, rapportent une résistance en traction de $47,99 \pm 13,58$ MPa et un module en traction de $2,1 \pm 0,40$ GPa, ce qui illustre la dispersion importante des résultats selon la partie botanique, le cultivar et le protocole d'extraction.[20]

Dans le présent mémoire, les feuilles de palmier peuvent être considérées comme un substrat de type feuillet ou flocon, apte à créer une structure interne ouverte et à augmenter la surface de contact avec le mycélium. Toutefois, si les feuilles sont utilisées sous forme de fragments larges et peu fibrillés, leur rôle de renfort mécanique restera inférieur à celui de fibres mieux individualisées. Il est donc utile de distinguer clairement, dans la description expérimentale, les feuilles broyées ou découpées des lanières fibreuses plus longues utilisées comme stipe



Figure III. 5: Copeaux de feuille de palmier préparés comme substrat

III.4. Stipe de palmier

Les stipes de palmier correspondent, dans le cadre de ce travail, à des lanières ou faisceaux fibreux extraits ou découpés à partir de la feuille ou de la gaine foliaire. Ce type de renfort se rapproche davantage d'une fibre technique que d'un simple substrat particulier. Alotaibi. (2019) montrent que les fibres provenant de différentes parties du palmier dattier présentent des différences marquées de composition et de cristallinité; la cellulose maximale observée dans leur étude atteint 44,00 % pour la fibre de pédoncule de régime, tandis que la composition de la gaine foliaire diffère de celle des autres fractions.[21]

Bourmaud. (2017) ont étudié plus spécifiquement les fibres de gaine foliaire du palmier dattier et rapportent une composition moyenne d'environ $45,1 \pm 3,4$ % de cellulose, $27,7 \pm 1,5$ % d'hémicellulose et $16,9 \pm 0,3$ % de lignine, avec une cristallinité proche de 41 ± 3 %. Sur les faisceaux fibreux, les auteurs mesurent un module d'Young de $1,8 \pm 0,6$ GPa, une résistance en traction de 131 ± 34 MPa et un allongement à la rupture de $20,9 \pm 7,6$ %. À l'échelle de la paroi cellulaire, la rigidité mesurée par nano indentation atteint toutefois environ 14 à 16 GPa, ce qui indique que le comportement modéré des faisceaux provient en grande partie de leur structure technique et non de la faiblesse intrinsèque de la matière cellulaire.[22]



Figure III. 6: Stipe de palmier préparées pour le substrat

Propriétés physiques et mécaniques des substrats : synthèse de la littérature :

Tableau III. 1: Comparaison des caractéristiques des déchets agricoles utilisés comme renfort

Substrat	Principales données physico-chimiques	Propriétés mécaniques	Commentaires pour le composite
Sciure de bois [14]	Humidité ≈ 44 % Densité apparente ≈ 232 kg/m ³ ; Densité particulière ≈ 513 kg/m ³	Non applicable comme fibre continue ; la caractérisation utile porte surtout sur granulométrie, densité, humidité et absorption d'eau.	Substrat fin favorisant le tassement et la colonisation Renfort mécanique direct limité.
Paille de blé [16]	Cellulose 45,43–49,78 % hémicellulose jusqu'à 36,50 % Lignine 19,64–21,61 % Densité apparente 0,037 g/cm ³ humidité $\approx 10,04$ % Cendres $\approx 1,44$ %.	Rt = 21,2–31,2 MPa cisaillement = 4,91–7,26 MP E = 4,76–6,58 GPa D'autres travaux rapportent : Rt ≈ 62 MPa E $\approx 8,35$ GPa.	Apporte légèreté et porosité Sensible à l'eau Intérêt élevé pour les formulations allégées.
Feuilles de palmier [18]	Fraction foliaire abondante issue de la taille.	Les fibres de folioles peuvent atteindre des résistances très élevées	Très bon potentiel de renfort si la fibre est bien individualisée.

	Composition variable selon la partie de la palme et la méthode d'extraction.	(jusqu'à ≈ 1250 MPa) lorsque la cristallinité est forte et l'angle micro fibrillaire faible.	Comportement plus modéré lorsque la feuille est utilisée sous forme de fragments.
Stipe de palmier [22]	Cellulose $\approx 45,1 \pm 3,4$ % hémicellulose $\approx 27,7 \pm 1,5$ % lignine $\approx 16,9 \pm 0,3$ % Cristallinité $\approx 41 \pm 3$ %.	E = $1,8 \pm 0,6$ GPa Rt = 131 ± 34 MPa $\epsilon_r = 20,9 \pm 7,6$ % Rigidité de paroi cellulaire $\approx 14\text{--}16$ GPa.	Faisceaux techniques ductiles Bons candidats comme renfort fibreux et pontage interne dans le composite.

III.5. Formulations expérimentales des bio composites :

Dans un plan expérimental rigoureux, les formulations doivent être exprimées sur base sèche afin de séparer l'effet de la composition de celui de l'humidité initiale. Les différents substrats sont donc d'abord pesés après correction de leur teneur en eau, puis mélangés suivant les proportions retenues. Cette démarche est particulièrement importante pour les composites mycéliens, car la quantité d'eau disponible conditionne à la fois la croissance du mycélium, la porosité du mélange et le tassement dans le moule.

Tableau III. 2: Tableau des compositions des matériaux organiques et du spawn

Code	Sciure (mm) (%)			Paille (%)	Feuilles palmier (%)	Stipe palmier (%)	Spawn (%)
	D>10	6.3<D<10	4<D<6.3				
F1	[30]	[55]	[-]	[-]	[-]	[-]	[15]
F2	[-]	[50]	[35]	[-]	[-]	[-]	[15]
F3	[35]	[35]	[-]	[15]	[-]	[-]	[15]
F4	[-]	[-]	[-]	[-]	[55]	[30]	[15]
F5	[-]	[-]	[-]	[35]	[50]	[-]	[15]
F6	[-]	[-]	[-]	[45]	[-]	[40]	[15]
F7	[25]	[25]	[-]	[-]	[]	[35]	[15]
F8	[-]	[-]	[30]	[-]	[65]	[-]	[15]
F9	[-]	[35]	[30]	[20]	[-]	[-]	[15]
F10	[-]	[30]	[30]	[-]	[-]	[25]	[15]
F11	[-]	[-]	[40]	[-]	[45]	[-]	[15]
F12	[-]	[-]	[45]	[-]	[-]	[45]	[15]

Tableau III. 3: Quantité d'eau et densité des formulations expérimentales

Code	Eau (g)	Densité
F1	32.1	0.19
F2	38.94	0.23
F3	38.46	0.23
F4	46.92	0.28
F5	39.42	0.23
F6	34.44	0.20
F7	45.06	0.27
F8	43.92	0.26
F9	33.78	0.20
F10	46.74	0.28
F11	37.5	0.22
F12	54.96	0.32

$$E = 0.6 \times \text{masse sec sec du substrat} \quad [g]$$

$$\rho = \frac{\text{masse}}{\text{volume}} \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad \text{volume} = \pi \times R^2 \quad [cm^3]$$

$$d = \frac{\rho}{\rho_{eau}} \quad \text{avec } \rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

III.6. Conception et caractéristiques du moule de mise en forme :

Le moule constitue un paramètre expérimental central dans la fabrication des composites mycéliens. Attias. (2020) soulignent que les propriétés du moule influencent directement la densité finale, l'absorption d'eau et la résistance en compression, notamment parce qu'elles conditionnent la compaction initiale, la géométrie de l'éprouvette et les échanges gazeux pendant la croissance. [23]

De plus, un travail récent sur un composite mycélien renforcé par des fibres de palmier dattier a montré que le niveau de pré chargement appliqué lors de la mise en forme pouvait faire varier la résistance en compression mesurée de 0,34 à 4,55 MPa, sans augmentation importante de la densité apparente [12]

Dans ce travail, le moule utilisé est réalisé en polychlorure de vinyle (PVC), matériau couramment employé dans les dispositifs expérimentaux en raison de sa légèreté, de sa résistance à l'humidité et de sa facilité de manipulation. Le moule présente une forme cylindrique, avec des dimensions intérieures de 60 mm de diamètre et 100 mm de hauteur, correspondant à une géométrie adaptée à la fabrication d'éprouvettes destinées aux essais de compression.

Les parois internes du moule sont lisses afin de faciliter le démoulage des échantillons après la phase de croissance mycélienne et de séchage. Afin de permettre les échanges gazeux nécessaires au développement du mycélium, le moule est muni de petites perforations latérales permettant la circulation de l'air pendant la colonisation du substrat.

Le moule est fermé par un couvercle perforé, assurant à la fois le maintien du matériau dans le moule et une ventilation suffisante. Le mélange substrat-mycélium est introduit progressivement dans le moule puis compacté manuellement afin d'assurer une répartition homogène du matériau et une compaction modérée.

Le choix de ce moule vise à garantir une géométrie reproductible des éprouvettes, une compaction homogène du mélange et un échange gazeux suffisant pendant la croissance mycélienne, ce qui contribue à améliorer la reproductibilité et la fiabilité des essais mécaniques réalisés.

Tableau III. 4: Caractéristiques du moule utilisé dans l'étude

Paramètre	Valeur / description
Matériau du moule	PVC (polychlorure de vinyle)
Forme	Cylindrique
Dimensions intérieures	Diamètre 60 mm × hauteur 100 mm
Épaisseur des parois	3 mm
Présence de perforations / événements	Oui ; Ø 2 mm ; 6–8 trous latéraux
Mode de fermeture	Papier film
Mode de compactage	Manuel ; niveau moyen
Facilité de démoulage	Démoulage manuel

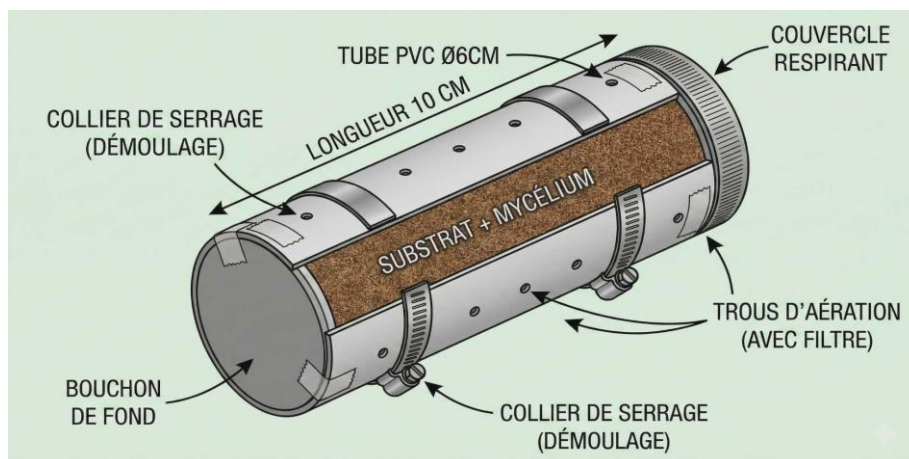


Figure III. 7: Schéma du moule PVC pour culture de mycélium



Figure III. 8: Moules cylindriques utilisés pour la fabrication des éprouvettes

III.7. Protocole de fabrication du bio composite à base de mycélium

III.1. Procédé de fabrication du bio-composite à base de mycélium

La fabrication du matériau bio-composite à base de mycélium repose sur la valorisation d'un substrat lignocellulosique colonisé par un champignon filamenteux. Au cours de sa croissance, le mycélium développe un réseau d'hyphes capable d'enrober et de lier les particules du substrat, ce qui conduit à la formation d'un matériau cohésif, léger et biodégradable. Le protocole expérimental adopté dans la présente étude comprend plusieurs étapes successives, à savoir : la préparation du substrat, sa stérilisation, l'inoculation, la mise en moule, l'incubation, le démoulage, le séchage et l'obtention du produit final

III.2. Préparation du substrat

La première étape du procédé consiste à préparer le substrat destiné à supporter la croissance du mycélium. Le substrat utilisé est constitué de matières lignocellulosiques d'origine végétale,

telles que la sciure de bois, les fibres végétales, la paille broyée ou tout autre résidu organique disponible et adapté à l'étude. Le choix de ce substrat est dicté par sa richesse en cellulose, en hémicellulose et en lignine, éléments favorables au développement du mycélium.

Dans un premier temps, le substrat brut est trié afin d'éliminer toutes les impuretés susceptibles d'altérer la qualité du matériau final. Il est ensuite broyé ou tamisé de manière à obtenir une granulométrie relativement homogène, condition importante pour assurer une colonisation uniforme par le mycélium. Une fois cette opération réalisée, les différents constituants du substrat sont mélangés à sec jusqu'à obtention d'un mélange homogène. De l'eau est ensuite ajoutée progressivement afin d'ajuster le taux d'humidité du substrat. Cette humidification doit être suffisante pour favoriser la croissance fongique, tout en évitant un excès d'eau qui pourrait limiter l'aération du milieu et favoriser le développement de contaminants.

Le substrat préparé doit ainsi présenter une texture humide, souple et aérée, apte à recevoir l'inoculum dans de bonnes conditions.

III.3. Stérilisation du substrat

La stérilisation représente une phase déterminante du procédé expérimental, puisqu'elle garantit l'obtention d'un substrat aussi exempt que possible de contaminants microbiens. En l'absence de cette étape, la prolifération de micro-organismes concurrents pourrait compromettre la croissance du mycélium, perturber la colonisation du substrat et affecter la qualité du matériau élaboré.

Dans cette étude, la stérilisation a été réalisée par autoclavage du substrat humidifié. Le mélange a été introduit dans des contenants adaptés, puis exposé à un traitement thermique par vapeur saturée sous pression à 121 °C pendant 20 minutes, sous une pression d'environ 1 bar. Le recours à cette méthode a permis d'assurer une stérilisation efficace du substrat avant l'inoculation.

Après autoclavage, le substrat a été maintenu au repos jusqu'à son refroidissement complet à température ambiante. Cette précaution est nécessaire afin d'éviter toute altération de l'inoculum lors de son ajout ultérieur. Le refroidissement a été effectué dans des conditions

aseptiques, de manière à préserver l'état sanitaire du substrat jusqu'à l'étape suivante du protocole expérimental.



Figure III. 9: stérilisation du substrat a l'autoclave



Figure III. 10: Autoclave de stérilisation substrat



Figure III. 11: Conditionnement du substrat
Avant autoclavage



Figure III. 12: Conditionnement du substrat
après autoclavage

III.4. Inoculation du substrat

L'inoculation consiste à introduire le mycélium dans le substrat préalablement préparé et stérilisé. Elle représente une étape déterminante dans la fabrication du bio-composite, car elle conditionne la qualité de la colonisation fongique et, par conséquent, la cohésion du matériau final.

Une fois le substrat refroidi, l'inoculum fongique, généralement sous forme de blanc de semence (spawn), est ajouté en quantité déterminée au mélange. Cette opération est réalisée

dans un environnement propre et aseptisé, avec du matériel préalablement désinfecté, afin de minimiser les risques de contamination.

L'inoculum est ensuite incorporé soigneusement au substrat de manière à assurer une répartition homogène du mycélium dans l'ensemble de la matrice. Le mélange est effectué délicatement afin de préserver la structure aérée du substrat, indispensable aux échanges gazeux nécessaires à la croissance du champignon. À la fin de cette étape, le substrat inoculé doit présenter un aspect homogène, sans zones surchargées ni zones dépourvues d'inoculum.

III.5. Mise en moule

Après inoculation, le mélange est transféré dans des moules préalablement nettoyés et désinfectés. Cette étape a pour objectif de conférer au matériau la géométrie souhaitée tout en favorisant la structuration interne du bio-composite.

Le remplissage des moules est réalisé progressivement afin de garantir une répartition uniforme du substrat inoculé sur toute la hauteur du moule. Une légère compression peut être appliquée pour améliorer le contact entre les particules et favoriser la cohésion future du matériau. Toutefois, cette compression doit rester modérée afin de ne pas obstruer les vides internes du substrat, lesquels sont nécessaires à la circulation de l'air et à la respiration du mycélium.

Une fois les moules remplis, la surface du matériau est nivelée afin d'obtenir des échantillons de forme régulière. Les moules sont ensuite couverts ou fermés de façon appropriée pour limiter les contaminations extérieures tout en maintenant des conditions favorables au développement fongique.

III.6. Incubation

L'incubation correspond à la phase de croissance active du mycélium à l'intérieur du substrat moulé. Durant cette étape, le réseau mycélien se développe progressivement, colonise l'ensemble du substrat et assure la liaison entre les particules végétales, ce qui conduit à la formation du bio-composite.

Les moules remplis sont placés dans un environnement contrôlé, favorable à la croissance du champignon. Les conditions d'incubation, notamment la température, l'humidité relative et la

durée, dépendent de l'espèce fongique utilisée ainsi que de la nature du substrat. Un suivi régulier est effectué afin de vérifier l'évolution de la colonisation et de détecter toute contamination éventuelle.

Au cours de cette phase, le mycélium envahit progressivement l'ensemble de la matrice et forme un réseau dense d'hyphes assurant la cohésion du matériau. L'incubation est considérée comme satisfaisante lorsque la colonisation devient visiblement homogène et que le matériau présente une structure suffisamment consolidée pour être manipulée.

III.7. Démoulage

À l'issue de l'incubation, les échantillons sont retirés des moules avec précaution. Le démoulage constitue une étape délicate, car le matériau, bien que cohésif, peut encore présenter une certaine fragilité mécanique.

L'extraction est réalisée manuellement ou à l'aide d'un dispositif adapté, de manière à préserver l'intégrité géométrique des éprouvettes. Après démoulage, les échantillons font l'objet d'une inspection visuelle portant sur leur homogénéité, leur aspect de surface, leur degré de colonisation et l'absence de défauts majeurs tels que fissures, déformations ou zones insuffisamment liées.

Dans certains cas, une courte phase d'incubation complémentaire hors moule peut être envisagée afin de permettre au mycélium de renforcer davantage la cohésion de la surface externe du matériau.

III.8. Séchage

Le séchage a pour fonction principale d'arrêter la croissance biologique du mycélium et de stabiliser définitivement la structure du bio-composite. Cette étape permet également de réduire la teneur en eau du matériau, d'améliorer sa conservation et de le rendre apte aux essais de caractérisation.

Les échantillons démoulés sont soumis à un séchage contrôlé, soit à l'air libre dans un environnement propre et ventilé, soit en étuve à température modérée. Le choix de la méthode dépend des moyens expérimentaux disponibles et des exigences de l'étude. Le séchage doit être progressif afin d'éviter les phénomènes de retrait excessif, de fissuration

ou de déformation du matériau. Il est poursuivi jusqu'à stabilisation de la masse des échantillons, indiquant que l'humidité résiduelle a atteint un niveau compatible avec la conservation et la manipulation du composite.

Cette étape confère au matériau sa forme finale stable et met un terme à l'activité biologique du champignon.

III.9. Produit final obtenu

À l'issue du séchage, le matériau obtenu se présente sous la forme d'un bio-composite léger, cohésif et biodégradable, résultant de l'assemblage naturel des particules lignocellulosiques par le réseau mycélien. Les propriétés finales du matériau, notamment sa densité, sa rigidité, sa texture de surface et sa résistance mécanique, dépendent fortement de plusieurs paramètres, parmi lesquels figurent la nature du substrat, le taux d'humidité initial, la qualité de l'inoculation, le degré de compactage, la durée d'incubation et les conditions de séchage.

Le produit final ainsi élaboré est ensuite destiné aux différentes opérations de caractérisation physique, mécanique, thermique ou environnementale prévues dans le cadre de l'étude. Son obtention constitue l'aboutissement du protocole expérimental mis en œuvre pour la conception du bio-composite à base de mycélium.

Étapes de Fabrication d'un Biocomposite à Base de Mycélium

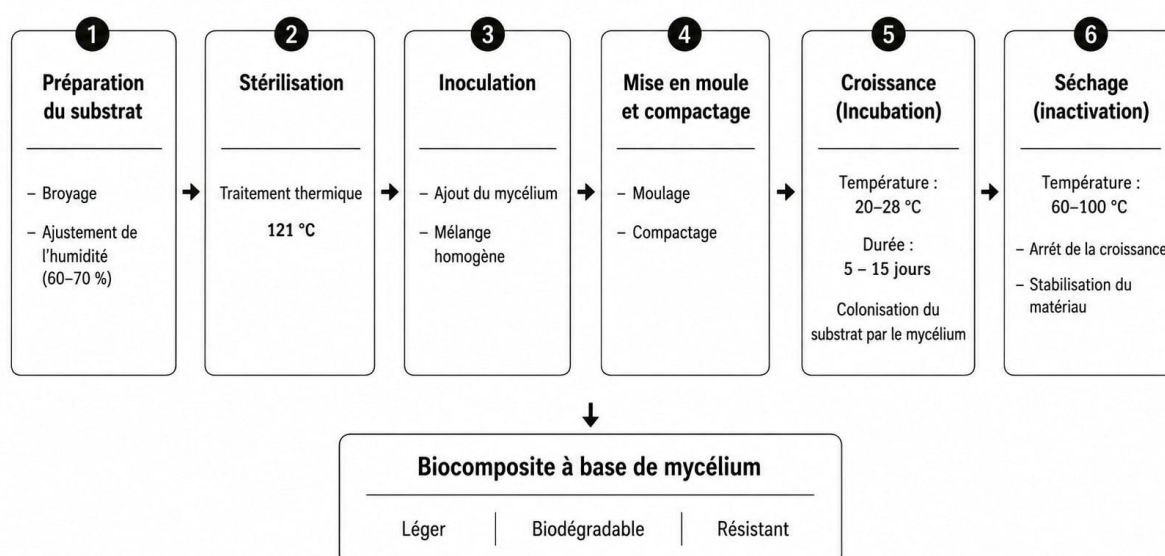


Figure III. 13: étape de fabrication du bio composite à base de mycélium

III.10. Conclusion

En conclusion, ce troisième chapitre a permis de verrouiller l'ensemble des étapes de fabrication nécessaires à la création de nos bio-composites. En exploitant des sous-produits agricoles algériens abondants et un liant biologique naturel, nous avons mis au point une méthodologie stable, standardisée et parfaitement adaptée aux exigences de notre démarche.

La maîtrise des ratios d'humidité, la précision du tamisage granulométrique et le contrôle de l'environnement aseptique lors de l'inoculation nous ont permis d'aboutir à la production physique de nos éprouvettes de test.

Ce travail préparatoire nous ouvre désormais les portes du **Chapitre IV**, dédié aux Résultats et Discussions. C'est dans cette dernière partie que nous analyserons de manière critique les fruits de notre campagne expérimentale. Nous y examinerons d'abord le suivi visuel de la croissance mycélienne sur 27 jours, en expliquant en toute franchise l'échec par contamination de notre première série d'essais, avant de décortiquer les valeurs chiffrées de densité sèche, de conductivité thermique et de résistance hydrique obtenues pour chaque formulation.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Après avoir détaillé le protocole de bio-fabrication et la matrice des douze formulations dans le chapitre précédent, ce Chapitre IV présente, analyse et discute l'ensemble de nos résultats expérimentaux. L'objectif est de valider scientifiquement l'aptitude de nos échantillons.

Ce chapitre débute par un suivi visuel critique sur 27 jours ; nous y expliquons en toute transparence la contamination par moisissures de notre première série d'essais due à un séchage insuffisant à 65 °C, avant de montrer la réussite morphologique de notre seconde série d'éprouvettes. Nous analysons ensuite les valeurs physiques de la densité sèche, démontrant la grande légèreté de nos bio-composites (comprise entre 0,11 et 0,19 g/cm³). Puis, nous étudions nos mesures de conductivité thermique (λ allant de 0,106 à 0,137 W/m·K) en les comparant au béton de chanvre du marché pour prouver leur compétitivité thermique. Enfin, nous évaluons le comportement hydrique du matériau face au verrou de l'absorption d'eau.

Ce bilan expérimental rigoureux permettra de dégager les formulations les plus prometteuses ainsi que la faisabilité d'une future entreprise dans ce créneau.

IV.2. Suivi visuel de l'évolution des échantillons

IV.2.1. Observation des échantillons Première formulation

Après la phase de croissance du mycélium, les échantillons ont été placés dans une étuve à une température de 65 °C pendant une durée de 2 heures afin de réduire leur teneur en humidité et d'arrêter l'activité biologique du mycélium.

À la sortie de l'étuve, les éprouvettes présentaient une apparence globalement stable avec une conservation satisfaisante de leur forme cylindrique. Cependant, après environ deux jours de stockage à température ambiante, une contamination est apparue à la surface des échantillons, caractérisée par le développement de moisissures de couleur verdâtre.

Cette contamination peut être expliquée par le fait que le traitement thermique appliqué (65 °C pendant 2 h) n'a pas permis de détruire totalement les cellules actives du mycélium ni certains micro-organismes présents dans le matériau. En présence d'une humidité résiduelle et des conditions favorables de température ambiante, les micro-organismes ont continué à se développer, entraînant ainsi la contamination des éprouvettes.

Ces observations montrent que les conditions de séchage utilisées lors de cette première manipulation étaient insuffisantes pour assurer une stabilisation biologique complète du composite mycélien. Une augmentation de la température ou de la durée du traitement thermique apparaît donc nécessaire afin de stopper définitivement l'activité biologique et éviter toute contamination ultérieure.

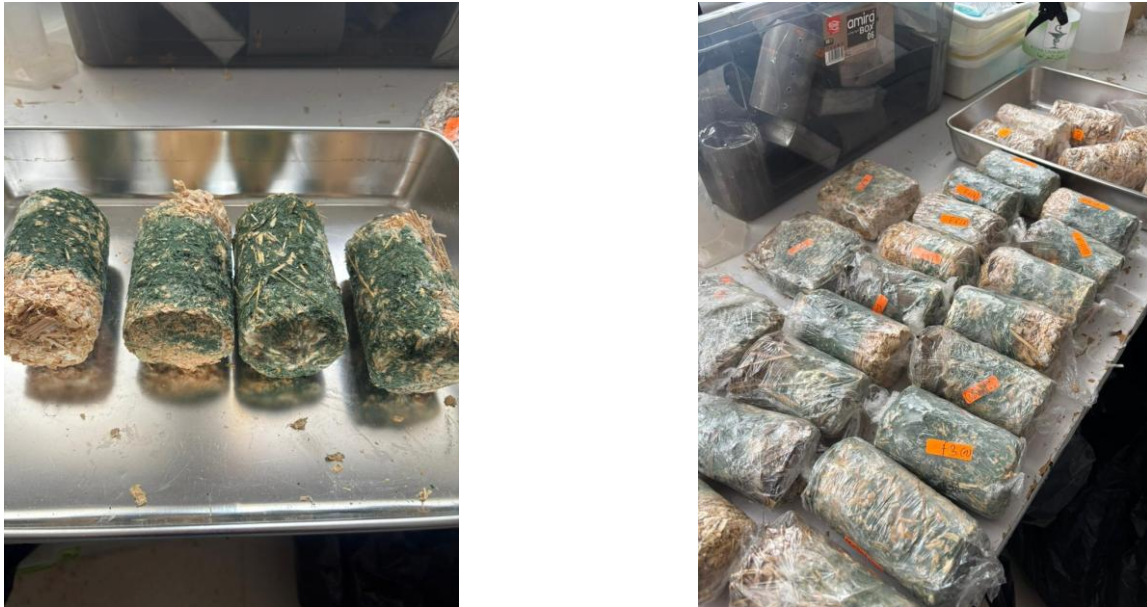


Figure IV 1: résultats obtenus des échantillons de première inoculation

IV.2.2. Observation des échantillons de deuxième formulation

IV.2.2.1. Observation les échantillons au 9 mars

L'observation visuelle des douze éprouvettes cylindriques montre que les échantillons présentent globalement une géométrie régulière et une bonne tenue d'ensemble, avec une matrice de couleur claire au sein de laquelle sont dispersées des particules ou fibres brunâtres, visibles sur les faces de section. Cette observation met en évidence une incorporation effective du renfort dans le matériau, bien que sa répartition ne soit pas parfaitement homogène d'un échantillon à l'autre. En effet, certaines éprouvettes présentent une dispersion relativement uniforme des inclusions, tandis que d'autres montrent des zones localisées plus chargées, ainsi que quelques amas ou éléments de plus grande dimension. Par ailleurs, de légères irrégularités de surface, de petits vides ponctuels et quelques défauts en bordure des sections apparaissent sur certains échantillons, ce qui peut traduire la présence d'une porosité localisée ou de faibles hétérogénéités liées à la mise en œuvre. Toutefois, aucune fissuration franche ou rupture

macroscopique nette n'est clairement observée sur les faces visibles, ce qui laisse supposer un état de cohésion globalement satisfaisant à l'échelle macroscopique. Ainsi, l'ensemble des éprouvettes se caractérise par une structure visuellement compacte, malgré certaines variations locales de texture et de distribution du renfort.

**Figure IV.2 : formulation 1****Figure IV.3: formulation 8****Figure IV.4: formulation 10**

IV.2.2.2. Observation des échantillons au 15 mars

L'observation macroscopique des éprouvettes au 15 mars met en évidence une conservation globale de leur forme cylindrique ainsi qu'un état de cohésion satisfaisant de la matrice. Les faces observées présentent une matrice de teinte claire dans laquelle sont réparties des inclusions/fibres brunâtres, visibles avec une intensité variable selon les formulations. Cette répartition apparaît relativement homogène pour certains échantillons, tandis que d'autres montrent une dispersion moins uniforme, avec la présence de particules de plus grande dimension, de zones localement plus chargées en renfort et de quelques hétérogénéités de texture. On note également, sur certaines faces, de petits vides ponctuels et de légères irrégularités en périphérie, traduisant une porosité locale ou un compactage non parfaitement uniforme lors de la mise en forme. Toutefois, aucune fissuration macroscopique franche ni rupture apparente n'est clairement visible sur les échantillons observés à cette date. Dans l'ensemble, les éprouvettes présentent donc un aspect visuel globalement compact et cohérent, malgré quelques défauts superficiels localisés et une variabilité dans la distribution des constituants.



Figure IV.5: formulation 1



Figure IV.6: formulations 11



Figure IV.7 :formulation 7

IV.2.2.3. Observation des échantillons au 24 mars

L'observation macroscopique des éprouvettes au 24 mars met en évidence une évolution plus marquée de l'aspect visuel des échantillons par rapport aux dates précédentes. Les éprouvettes conservent globalement leur forme cylindrique, cependant la surface et les faces de section présentent des modifications notables caractérisées par l'apparition de zones blanchâtres plus abondantes, d'amas superficiels et d'un développement plus visible de la matrice biologique à certains endroits. La répartition des particules ou fibres végétales reste observable dans l'ensemble des formulations, mais elle apparaît localement masquée par cette croissance blanchâtre. Certaines éprouvettes montrent également une hétérogénéité plus prononcée, avec des zones plus compactes et d'autres plus irrégulières. En outre, sur au moins un échantillon, l'apparition d'organes de fructification visibles traduit une activité biologique avancée du matériau. Malgré cela, aucune fissuration macroscopique généralisée ni rupture structurale nette n'est clairement observée sur la majorité des éprouvettes. Ainsi, à cette date, les échantillons se distinguent surtout par une maturation biologique plus avancée et par une modification progressive de leur aspect de surface, tout en conservant une cohésion d'ensemble globalement satisfaisante

**Figure IV.8:** formulation 8**Figure IV.9:** formulation 3**Figure IV.10:** formulation 11

IV.2.2.4. État des échantillons avant démoulage

Avant le démoulage, les échantillons présentent un aspect globalement cohérent et conservent une géométrie cylindrique régulière. L'examen macroscopique montre une matrice de couleur claire renfermant des particules végétales de taille et de répartition variables selon les formulations. Plusieurs éprouvettes présentent un recouvrement blanchâtre superficiel, indiquant une colonisation mycélienne plus ou moins avancée. Cette colonisation apparaît homogène sur certains échantillons, alors que d'autres montrent des irrégularités locales, des amas de matière et des zones de surface plus hétérogènes. L'apparition de fructifications sur au moins un échantillon traduit un stade de développement biologique plus avancé. Toutefois, l'ensemble des éprouvettes conserve une cohésion satisfaisante avant démoulage, sans rupture macroscopique importante.

**Figure IV.11:** Échantillons avant démoulage

IV.2.2.5. État des échantillons après démoulage

L'examen macroscopique des échantillons après démoulage met en évidence une tenue géométrique globalement satisfaisante des éprouvettes, qui conservent dans l'ensemble leur morphologie cylindrique. La matrice mycélienne, identifiable par sa teinte blanchâtre, apparaît comme l'élément assurant l'assemblage des particules végétales et conférant au matériau sa cohésion apparente. Néanmoins, des disparités morphologiques notables sont observées entre les différentes formulations : certaines présentent un aspect plus homogène et densifié, alors que d'autres révèlent une organisation plus lâche, avec des particules grossières apparentes, des aspérités superficielles et des zones localement effritées. Le démoulage a également permis de mettre en évidence quelques défauts de surface, notamment des arrachements ponctuels, des irrégularités latérales et de faibles pertes de matière, probablement liées à la nature du substrat et au degré de colonisation mycélienne. Dans l'ensemble, ces observations traduisent une cohésion macroscopique globalement correcte, mais variable selon la formulation, la répartition des constituants et l'intensité de la colonisation biologique.



Figure IV.12 : Échantillons après démoulage

IV.2.3. Analyse comparative de l'évolution morphologique

L'analyse comparative des échantillons aux différentes dates d'observation met en évidence une évolution morphologique progressive du matériau au cours de l'incubation. À la date du 9 mars, les éprouvettes présentent globalement une géométrie cylindrique régulière et une structure encore dominée par la visibilité des particules lignocellulosiques incorporées dans la matrice. La surface observée apparaît relativement compacte, mais la colonisation mycélienne reste modérément exprimée à l'échelle macroscopique, avec une répartition encore hétérogène selon les formulations. Certaines éprouvettes montrent déjà une cohésion satisfaisante, tandis que d'autres laissent apparaître des irrégularités locales, des petits vides ponctuels et une distribution non uniforme des renforts végétaux.

Au 15 mars, l'évolution morphologique devient plus nette. La matrice blanchâtre associée au développement du mycélium apparaît davantage sur les faces visibles, traduisant une colonisation plus avancée du substrat. Les échantillons conservent globalement leur forme initiale, mais présentent une texture plus contrastée que lors de la première observation. Cette étape se caractérise par une meilleure liaison apparente entre les particules, même si des différences persistent d'une formulation à l'autre. Certaines éprouvettes semblent plus homogènes et mieux consolidées, tandis que d'autres présentent encore des zones localement riches en particules grossières, des irrégularités superficielles et une compacité moins uniforme.

À la date du 24 mars avant démoulage, l'évolution morphologique est encore plus marquée. Les échantillons montrent une colonisation mycélienne plus développée, matérialisée par des zones blanchâtres abondantes en surface et en bordure. Cette progression tend à masquer partiellement les inclusions végétales sur certaines éprouvettes, ce qui traduit un stade plus avancé de consolidation biologique. Toutefois, cette évolution n'est pas identique pour toutes les formulations : certaines présentent une structure dense et relativement uniforme, alors que d'autres conservent une organisation plus hétérogène, avec des amas locaux, des variations de texture et, dans un cas au moins, l'apparition d'organes de fructification indiquant une activité biologique très avancée. Ces observations montrent que le temps d'incubation favorise clairement le développement du mycélium, mais que la qualité de colonisation dépend aussi de la nature et de la répartition des constituants du mélange.

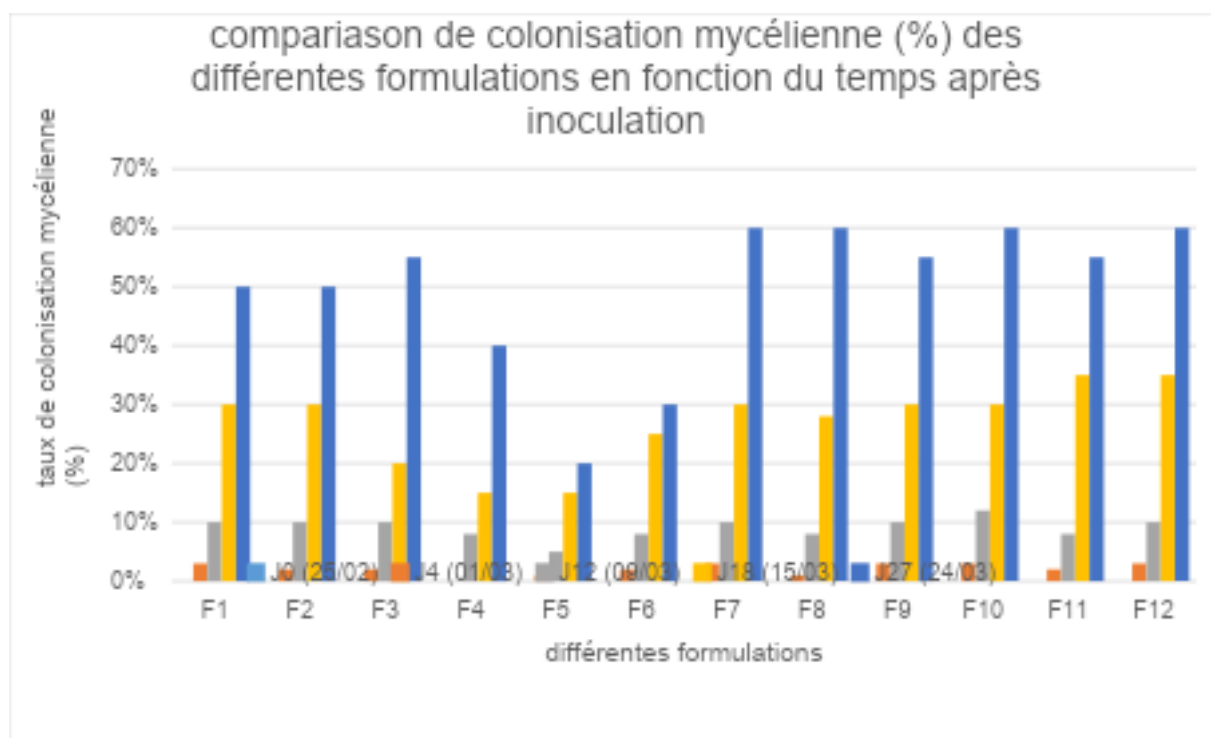
L'observation du 24 mars après démoulage permet de mieux apprécier la morphologie réelle du matériau et son degré de cohésion. Après extraction des moules, les éprouvettes conservent

dans l'ensemble une forme cylindrique acceptable, ce qui témoigne d'une tenue structurelle globalement satisfaisante. Néanmoins, le démoulage révèle plus clairement les différences entre formulations. Certaines éprouvettes présentent un aspect plus compact, avec une meilleure continuité de la matrice mycélienne et une adhésion plus efficace entre les particules lignocellulosiques. D'autres, en revanche, montrent une texture plus rugueuse, des particules saillantes, des irrégularités géométriques et quelques effritements superficiels, suggérant une cohésion plus faible ou un compactage moins homogène. Les faces supérieures apparaissent souvent plus blanches et plus fermées, traduisant une colonisation de surface plus importante, tandis que les faces latérales laissent davantage apparaître les copeaux ou fibres végétales.

Dans l'ensemble, l'évolution morphologique observée entre le 9 mars et le 24 mars traduit un passage progressif d'un matériau encore peu consolidé visuellement à un bio composite biologiquement plus mature, dans lequel le mycélium joue progressivement un rôle de liant entre les particules végétales. Cette évolution s'accompagne d'une amélioration apparente de la cohésion pour plusieurs formulations, mais également d'une persistance d'hétérogénéités morphologiques liées à la distribution des particules, à leur taille, ainsi qu'au degré de colonisation mycélienne. Ainsi, l'analyse comparative met en évidence que la durée d'incubation influence directement la compacité, l'homogénéité et la stabilité macroscopique des échantillons.

Tableau IV.1: Évolution du taux de colonisation des formulations en fonction du temps.

Formulation	J0 (25/02)	J4 (01/03)	J12 (09/03)	J18 (15/03)	J27 (24/03)
F1	0%	3%	10%	30%	50%
F2	0%	2%	10%	30%	50%
F3	0%	2%	10%	20%	55%
F4	0%	0%	8%	15%	40%
F5	0%	1%	5%	15%	20%
F6	0%	2%	8%	25%	30%
F7	0%	3%	10%	30%	60%
F8	0%	1%	8%	28%	60%
F9	0%	3%	10%	30%	55%
F10	0%	3%	12%	30%	60%
F11	0%	2%	8%	35%	55%
F12	0%	3%	10%	35%	60%

**Figure IV.13:** comparaison de colonisation mycélienne des différentes formulations en fonction du temps

IV.3. Densité sèche

Le principe de l'essai de densité sèche consiste à déterminer la masse volumique du matériau après élimination de son humidité. Pour cela, l'éprouvette est d'abord séchée à l'étuve jusqu'à obtention d'une masse constante, afin d'éliminer l'eau libre contenue dans le matériau. La densité sèche est ensuite calculée comme le rapport entre la masse sèche de l'échantillon et son volume apparent. Dans le cas d'éprouvettes cylindriques, le volume est déterminé à partir des dimensions géométriques mesurées, notamment le diamètre et la hauteur. Cette approche est conforme au principe général des essais de densité apparente fondés sur le rapport masse/volume, tel qu'indiqué dans la norme ISO 845, et elle est également utilisée dans les travaux sur les composites à base de mycélium.[24]

Mathématiquement, la densité sèche ρ_s s'exprime par la relation suivante [25]:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V}$$

$$D_s = \frac{\rho_s}{\rho_{eau}}$$

Avec :

$$\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

m_s = la masse sèche de l'éprouvette après séchage

V = volume apparent

Pour une éprouvette cylindrique, le volume est donné par :

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

Avec :

D = le diamètre

h = la hauteur de l'éprouvette

La densité sèche est généralement exprimée en kg/m^3 . Dans une étude sur des composites mycéliens, Elsacker. Indiquent que la densité a été calculée à partir du rapport entre la masse anhydre et le volume, après séchage des échantillons jusqu'à stabilisation de la masse. [26]

Pour les matériaux bio-composites à base de mycélium, cet essai est particulièrement important, car la densité sèche permet d'apprécier le niveau de compacité du matériau, l'efficacité de la liaison mycélienne entre les particules lignocellulosiques, ainsi que l'influence de la formulation sur les propriétés physiques et mécaniques finales. De plus, ASTM C303 rappelle que la densité est un paramètre fortement lié à plusieurs propriétés du matériau, notamment la résistance et les performances thermiques [27].

IV.3.1. Résultats de l'essai obtenu

Les valeurs de la densité sèche ont été déterminées à partir de la masse sèche et du volume apparent de chaque éprouvette. Les résultats obtenus pour les différentes formulations sont présentés dans le tableau ci-dessous. Cette comparaison permet d'évaluer l'influence de la formulation sur la compacité et l'homogénéité des matériaux élaborés.

Tableau IV. 2: Tableau des résultats de densité sèche.

Formulation	Éprouvette	Masse sèche (g)	Volume (cm^3)	Densité sèche
F1	1	34.39	283	0.12152
F1	2	28.96	283	0.10233
F1	3	33.45	283	0.11819
F1	4	33.26	283	0.11753
F1	Moyenne	32.515	—	0.11489
F2	1	35.57	283	0.12569
F2	2	42.18	283	0.14095
F2	3	45.69	283	0.16145
F2	4	42.34	283	0.14961
F2	Moyenne	41.445	—	0.14645
F3	1	47.05	283	0.16625
F3	2	41.34	283	0.14608
F3	3	39.67	283	0.14018
F3	4	46.89	283	0.16569
F3	Moyenne	43.7375	—	0.15509
F4	1	49.02	283	0.17322
F4	Moyenne	49.02	—	0.17322
F5	1	52.20	283	0.12551
F5	2	53.29	238	0.18830
F5	Moyenne	52.745	—	0.18638
F6	1	52.50	283	0.18551
F6	2	45.16	283	0.15958

F6	Moyenne	48.83	—	0.17524
F7	1	49.28	283	0.17413
F7	2	50.15	283	0.17721
F7	3	43.32	283	0.15307
F7	4	49.48	283	0.17484
F7	Moyenne	48.0575	—	0.169814
F8	1	50.68	283	0.17908
F8	2	63.48	283	0.22431
F8	3	58.62	283	0.20714
F8	4	45.84	283	0.16198
F8	Moyenne	54.6475	—	0.19310
F9	1	43.68	283	0.15435
F9	2	44.56	283	0.15746
F9	3	38.41	283	0.13572
F9	Moyenne	42.21	—	0.14915
F10	1	42.50	283	0.15018
F10	2	55.03	283	0.19445
F10	3	61.46	283	0.21717
F10	4	54.15	283	0.19134
F10	Moyenne	53.285	—	0.18829
F11	1	43.53	283	0.15382
F11	2	44.06	283	0.15569
F11	3	48.59	283	0.17169
F11	Moyenne	45.3933	—	0.16040
F12	1	58.28	283	0.20594
F12	2	43.02	283	0.15201
F12	3	57.50	283	0.20318
F12	Moyenne	52.9333	—	0.18704

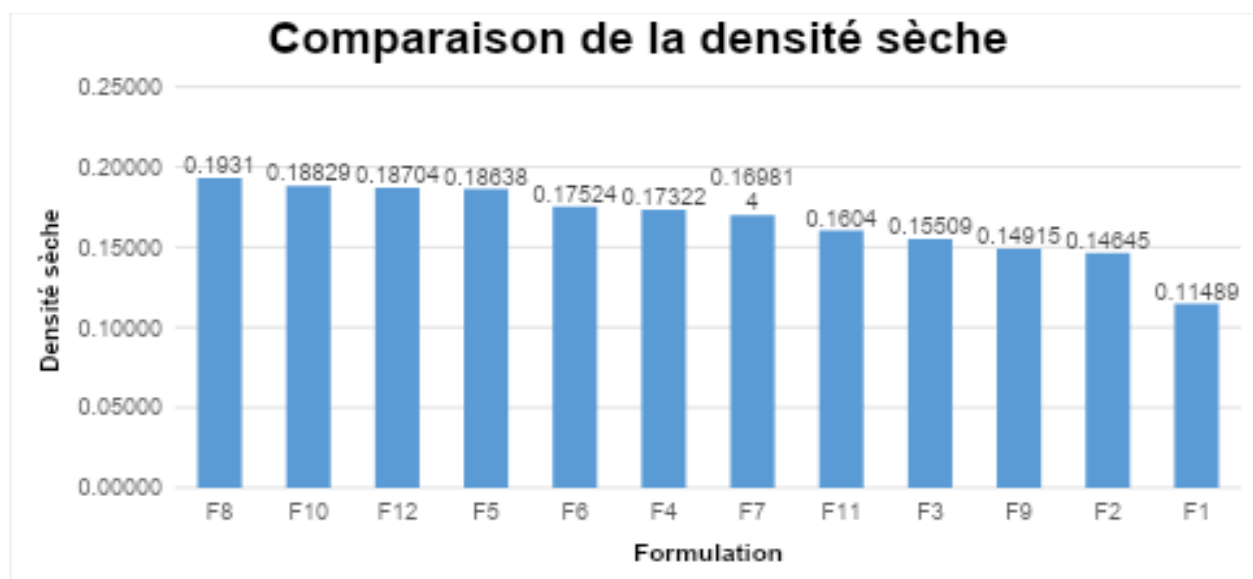


Figure IV.14: Comparaison de la densité sèche

IV.3.2. Interprétation des valeurs mesurées

Les résultats obtenus montrent que la densité sèche varie selon les formulations. Les valeurs mesurées sont comprises entre 0,11489 g/cm³ pour la formulation F1 et 0,19310 g/cm³ pour la formulation F8. Cette différence indique que la composition des formulations influence clairement la compacité du matériau obtenu après séchage.

La formulation F8 présente la densité sèche la plus élevée, avec une valeur de 0,19310 g/cm³. Elle est suivie par les formulations F10, F12 et F5, dont les densités sèches sont respectivement 0,18829 g/cm³, 0,18704 g/cm³ et 0,18638 g/cm³. Ces formulations peuvent être considérées comme les plus compactes parmi celles étudiées. Une densité sèche élevée peut traduire une meilleure organisation des particules, une porosité plus faible ou une structure plus dense du matériau.

À l'inverse, la formulation F1 présente la densité sèche la plus faible, avec une valeur de 0,11489 g/cm³. Cette faible valeur peut indiquer une structure plus légère et plus poreuse. Les formulations F2, F9 et F3 présentent également des densités relativement faibles, avec des valeurs inférieures à 0,156 g/cm³.

La densité sèche moyenne de l'ensemble des formulations est d'environ :

$$D = 0,16659 \text{ g/cm}^3$$

Les formulations F8, F10, F12, F5, F6, F4 et F7 présentent des valeurs supérieures à cette moyenne, tandis que F11, F3, F9, F2 et F1 présentent des valeurs inférieures. Cela permet de distinguer deux tendances principales : un groupe de formulations plus denses et un groupe de formulations plus légères.

L'écart entre la valeur maximale et la valeur minimale est de :

$$0,19310 - 0,11489 = 0,07821 \text{ g/cm}^3$$

Cet écart montre une variation assez importante entre les formulations. La formulation F8 est environ 68 % plus dense que F1, ce qui confirme que le choix de la formulation a un effet significatif sur la densité sèche finale.

En conclusion, la formulation F8 apparaît comme la plus performante du point de vue de la densité sèche, car elle présente la valeur la plus élevée. Les formulations F10, F12 et F5 donnent également de bons résultats. En revanche, la formulation F1 est la moins dense, ce qui peut être avantageux si l'objectif recherché est un matériau plus léger, mais moins favorable si l'objectif est d'obtenir un matériau plus compact.

IV.3.3. Discussion des résultats

Les résultats obtenus montrent une variation notable de la densité sèche entre les différentes formulations étudiées. Les valeurs mesurées varient de 0,11489 g/cm³ pour la formulation F1 à 0,19310 g/cm³ pour la formulation F8. Cette différence met en évidence l'influence de la composition et de la structure interne du matériau sur sa densité finale après séchage.

La formulation F8 présente la densité sèche la plus élevée. Cela indique que cette formulation possède probablement une structure plus compacte, avec une meilleure occupation du volume par la matière solide. Les formulations F10, F12 et F5 présentent également des densités élevées, ce qui montre qu'elles ont un comportement proche de celui de F8. Ces formulations peuvent donc être considérées comme les plus performantes lorsque l'objectif recherché est d'obtenir un matériau plus dense et plus compact.

À l'inverse, la formulation F1 présente la densité sèche la plus faible. Cette faible valeur peut être liée à une structure plus poreuse, à une mauvaise répartition des constituants ou à une quantité plus importante de vides après séchage. Les formulations F2, F9 et F3 présentent également des densités relativement faibles, ce qui confirme leur caractère plus léger par rapport aux autres formulations.

La moyenne générale des densités sèches est de 0,16659 g/cm³. Les formulations F8, F10, F12, F5, F6, F4 et F7 se situent au-dessus de cette moyenne, tandis que F11, F3, F9, F2 et F1 sont en dessous. Cette répartition permet de distinguer clairement deux groupes : un groupe de formulations plus denses et un groupe de formulations plus légères.

L'écart entre la densité maximale et la densité minimale est de 0,07821 g/cm³, ce qui traduit une variation importante entre les formulations. Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment la nature des constituants, leur granulométrie, leur proportion dans le mélange, le degré de compactage, ainsi que la quantité d'eau évaporée lors du séchage.

D'un point de vue pratique, une densité sèche plus élevée peut être recherchée lorsqu'on souhaite obtenir un matériau plus compact, plus cohésif et potentiellement plus résistant mécaniquement. En revanche, une densité sèche plus faible peut être intéressante si l'objectif est de produire un matériau plus léger, avec une porosité plus importante. Le choix de la formulation dépend donc de l'application visée.

En conclusion, les résultats montrent que la formulation a une influence directe sur la densité sèche. La formulation F8 apparaît comme la plus intéressante en termes de compacité, suivie par F10, F12 et F5. La formulation F1, quant à elle, présente la plus faible densité et pourrait être retenue dans le cas où la légèreté du matériau est prioritaire.

IV.4. Conductivité thermique

Afin d'évaluer les performances thermiques des composites à base de mycélium élaborés dans cette étude, un essai de conductivité thermique a été réalisé sur les différentes formulations préparées. Cet essai permet de déterminer la capacité du matériau à transmettre la chaleur et d'apprécier ainsi son potentiel en tant que matériau isolant.

Les mesures ont été effectuées dans des conditions ambiantes contrôlées, à une température moyenne de 22,33 °C. Les valeurs obtenues de la conductivité thermique permettent de comparer le comportement thermique des différentes formulations et d'analyser l'influence de leur composition sur les propriétés isolantes du matériau.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3: Résultats expérimentaux de la conductivité thermique.

Formulation	Conductivité thermique (W/m·K)
F2	0.106
F3	0.120
F8	0.137
F9	0.111
F10	0.111

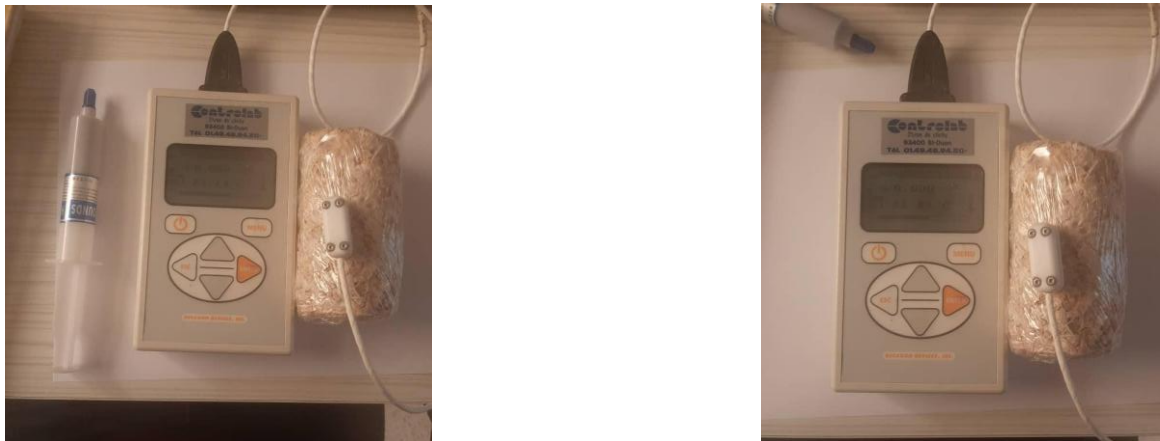


Figure IV.15 : Montage expérimental de l'essai de conductivité thermique

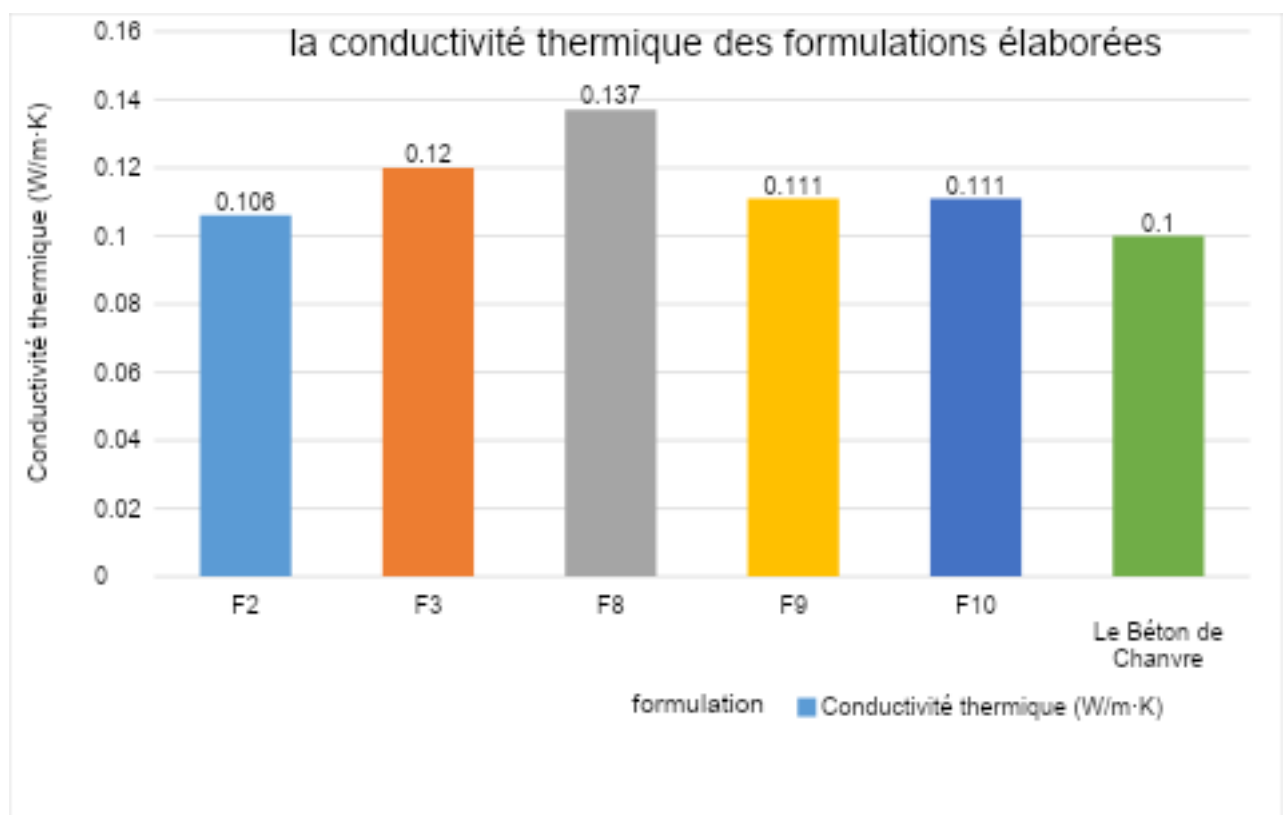


Figure IV.16: la conductivité thermique des formulations élaborées

IV.4.1. Discussion des résultats

La Figure IV.16 présente les valeurs de conductivité thermique obtenues pour les différentes formulations élaborées (F2, F3, F8, F9 et F10) ainsi que leur comparaison avec un béton de chanvre de référence. Les résultats montrent que la conductivité thermique varie entre 0,106 et 0,137 W/m·K selon la formulation étudiée.

La formulation F2 présente une conductivité thermique de 0,106 W/m·K, tandis que les formulations F9 et F10 affichent une valeur identique de 0,111 W/m·K. Ces résultats sont très

proches de celle du béton de chanvre de référence ($0,10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), ce qui indique que ces formulations possèdent un bon potentiel en tant que matériaux isolants biosourcés.

La formulation F3 présente une conductivité thermique légèrement plus élevée ($0,120 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), traduisant une capacité d'isolation thermique légèrement inférieure. Quant à la formulation F8, elle enregistre la valeur la plus élevée ($0,137 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), ce qui indique une plus grande facilité de transfert de chaleur à travers le matériau. Cette augmentation de la conductivité thermique peut être liée à une densité plus importante, à une diminution de la porosité ou à une meilleure continuité des phases solides au sein du biocomposite.

D'une manière générale, les faibles valeurs de conductivité thermique observées pour l'ensemble des formulations peuvent être attribuées à la structure poreuse développée par le réseau mycélien. La présence de pores remplis d'air à l'intérieur du matériau limite le transfert de chaleur par conduction et améliore ainsi les performances isolantes du biocomposite.

La comparaison avec le béton de chanvre montre que les formulations élaborées présentent des performances thermiques relativement proches d'un matériau biosourcé déjà reconnu pour ses qualités isolantes. Cette similitude confirme le potentiel des biocomposites à base de mycélium pour des applications dans le domaine de l'isolation thermique des bâtiments.

Ces résultats sont également cohérents avec ceux rapportés dans la littérature scientifique. Haneef et al. (2017) ont obtenu des conductivités thermiques comprises entre $0,07$ et $0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ pour des matériaux composites à base de mycélium, tandis que Girometta et al. (2019) ont rapporté des valeurs variantes entre $0,09$ et $0,13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Les valeurs obtenues dans cette étude se situent donc dans le même ordre de grandeur, ce qui confirme la pertinence des formulations développées.[28][29]

Par conséquent, la formulation F2 apparaît comme la plus performante du point de vue de l'isolation thermique, suivie des formulations F9 et F10. Ces formulations pourraient être considérées comme les plus prometteuses pour une utilisation future dans des applications d'isolation biosourcée et de construction durable.

IV.5. Absorption d'eau

L'essai d'absorption d'eau a pour objectif d'évaluer la capacité d'un matériau à absorber l'eau lorsqu'il est mis en contact avec celle-ci pendant une durée déterminée. Le principe général consiste à mesurer d'abord la masse initiale sèche de l'échantillon, puis sa masse après immersion dans l'eau, après élimination de l'eau superficielle. L'augmentation de masse observée correspond à la quantité d'eau absorbée par le matériau. Selon les normes utilisées, cet essai peut être réalisé en immersion partielle à court terme ou en immersion à long terme, notamment pour les matériaux isolants ; la norme ASTM D570 repose également sur ce principe de mesure par immersion. [30,31,32,34]

Le taux d'absorption d'eau A , exprimé en pourcentage, est généralement calculé à partir de la relation suivante :

$$A(\%) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

Avec

m_0 = est la masse sèche initiale de l'échantillon avant immersion

m_1 = la masse de l'échantillon après immersion

Cette formulation gravimétrique, fondée sur le gain de masse, est couramment utilisée dans les études portant sur les bio composites à base de mycélium. [32,34]

Dans le cas des matériaux biosourcés et des composites à base de mycélium, cet essai est particulièrement important, car leur structure poreuse et la nature lignocellulosique du substrat les rendent généralement sensibles à l'absorption d'eau. Les travaux publiés montrent que cette propriété dépend notamment du type de substrat, de l'espèce fongique, du degré de colonisation mycélienne et du procédé de fabrication. [34,35].

IV.5.1. Résultats expérimentaux

Les échantillons ont d'abord été séchés puis pesés afin de déterminer leur masse initiale sèche M_0 . Ensuite, ils ont été immergés dans l'eau à température ambiante. À chaque intervalle de temps, les échantillons ont été retirés de l'eau, essuyés légèrement en surface à l'aide d'un papier absorbant, puis pesés afin de déterminer leur masse humide M_t .

Tableau IV. 4: Évolution de la masse des différentes formulations en fonction du temps d'immersion dans l'eau.

Temps d'immersion	F1 Masse (g)	F2 Masse (g)	F3 Masse (g)	F8 Masse (g)	F9 Masse (g)	F10 Masse (g)	F11 Masse (g)	F12 Masse (g)
0 min / masse sèche	36.3	47.5	49	61.4	44.1	46.5	37	38.7
5 min	37.5	48.4	49.7	63.1	46.7	48.2	41.7	39.1
10 min	37.5	48.9	49.7	63.7	48.2	48.9	42.1	39.3
15 min	38.3	49.2	50.4	64.2	49.4	49.8	42.7	39.5
30 min	39.1	50.5	50.8	64.4	51	51.7	43.6	40.5
1 h	40	51.9	51.2	65.4	54.4	54.5	45.2	41.7
2 h	42.5	55.7	52.6	66.4	60.4	58.2	48.7	44.2
3 h	48	58	53.1	77.6	62.4	60.4	61.4	44.8
24 h	75.9	73.5	64.6	90	112.5	82.7	78.5	56
48 h	84.1	79.9	70.7	102.1	120.2	94.1	86.7	64.2
72h	84.2	80	71	102.2	120.4	94.3	87	64.5

Tableau IV.5: Évolution de l'absorption d'eau des composites à base de mycélium en fonction du temps d'immersion

Temps d'immersion	F1 Absorption (%)	F2 Absorption (%)	F3 Absorption (%)	F8 Absorption (%)	F9 Absorption (%)	F10 Absorption (%)	F11 Absorption (%)	F12 Absorption (%)
0 min	0	0	0	0	0	0	0	0
5 min	3.31	1.89	1.43	2.79	5.91	3.66	12.70	1.03
10 min	3.31	2.95	1.43	3.75	9.30	5.16	13.78	1.55
15 min	5.51	3.58	2.86	4.56	12.02	7.10	15.41	2.07
30 min	7.71	6.32	3.67	4.89	15.65	11.18	17.84	4.65
1 h	10.19	9.26	4.49	6.51	23.36	17.20	22.16	7.75
2 h	17.08	17.26	7.35	8.14	36.96	25.16	31.62	14.21
3 h	32.23	22.11	8.37	26.38	41.50	29.89	65.95	15.76
24 h	109.09	54.74	31.84	46.58	87.53	77.85	112.16	44.70
48 h	131.68	68.21	44.29	66.29	113.38	102.37	134.32	65.89
72h	132	68.42	44.9	66.45	113.83	102.80	135.14	66.67

IV.5.2. Discussion des résultats

Les résultats obtenus lors de l'essai d'absorption d'eau montrent que les matériaux composites élaborés à base de mycélium présentent une capacité importante d'absorption hydrique. Cette propriété est directement liée à la structure poreuse des matériaux biosourcés ainsi qu'à la nature hydrophile des constituants lignocellulosiques utilisés.

L'évolution de l'absorption d'eau en fonction du temps met en évidence trois phases principales. Une première phase caractérisée par une absorption rapide durant les premières heures d'immersion, due principalement à la pénétration de l'eau dans les pores ouverts et les capillaires présents à la surface des éprouvettes. Ensuite, une phase d'augmentation progressive est observée avec la diffusion de l'eau vers les pores internes du matériau. Enfin, une phase de stabilisation apparaît entre 48 h et 72 h, traduisant l'approche de la saturation hydrique des composites.

Les différences observées entre les formulations peuvent être expliquées par la variation de la structure interne et de la porosité des matériaux. Les formulations F1, F9, F10 et F11 présentent les taux d'absorption les plus élevés, dépassant 100 % après 72 h d'immersion. Cette forte absorption indique une structure plus poreuse et une plus grande capacité de rétention d'eau.

À l'inverse, les échantillons F3 et F12 présentent des valeurs d'absorption plus faibles, ce qui peut être attribué à une structure plus compacte, une meilleure cohésion interne ou une réduction des vides accessibles à l'eau. Une faible porosité limite généralement la diffusion de l'eau à l'intérieur du matériau et améliore sa résistance à l'humidité.

L'importante absorption observée dans certains composites peut également être liée à la présence de fibres végétales riches en cellulose et en hémicellulose, connues pour leur caractère hydrophile. De plus, le réseau mycélien lui-même possède une capacité de rétention d'eau relativement élevée en raison de sa microstructure filamentaire.

Ces résultats sont cohérents avec plusieurs travaux de recherche portant sur les matériaux biosourcés à base de mycélium, lesquels montrent généralement une absorption d'eau élevée due à leur structure poreuse et à leur faible densité apparente.

IV.6. Conclusion

En conclusion, ce quatrième chapitre a permis de caractériser complètement nos bio-composites et de valider notre démarche en laboratoire. Nos résultats expérimentaux confirment le très fort potentiel thermique de nos matériaux locaux : la formulation F2 se distingue particulièrement avec une conductivité thermique de 0,106 W/m·K, ce qui la rend compétitive face au béton de chanvre de référence utilisé dans l'éco-construction.

Cependant, l'analyse révèle de vraies limites techniques. Sa faible résistance mécanique et sa sensibilité extrême à l'humidité (l'absorption d'eau dépassant 100 % à saturation pour plusieurs formulations) imposent d'orienter l'usage de ces panneaux exclusivement vers des applications de second œuvre, de doublage ou de cloisonnement intérieur non structurel à l'abri de l'eau.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a permis d'explorer un procédé totalement novateur, basé sur une combinaison interdisciplinaire inédite entre le génie civil et la microbiologie appliquée. Notre ambition était d'aller conquérir une technologie de pointe récemment développée et maîtrisée aux États-Unis (Ecovative) et en Italie (Mogu), afin de l'importer et de l'adapter pour la première fois à notre contexte national.

Mener un tel travail de pionnier a mis en lumière des difficultés concrètes sur le terrain. Nous avons dû composer avec un manque important de moyens matériels spécifiques et une absence d'expertise locale dans ce domaine à la frontière des sciences du vivant et des matériaux. Malgré ces obstacles techniques et logistiques, la production réussie de nos échantillons prouve que la faisabilité de ce projet et sa maîtrise pratique par notre équipe sont désormais plus ou moins bonnes, posant ainsi une piste de recherche très intéressante pour notre département de génie civil.

Au-delà de l'exploration de ce bio-procédé, ce travail valide une démarche concrète de développement durable. En réussissant à valoriser des déchets lignocellulosiques locaux et abondants – la sciure de bois, la paille de blé, les feuilles et les stipes de palmier dattier –, nous avons démontré que le mycélium peut assurer efficacement la cohésion des particules végétales pour former un matériau composite léger, écologique et entièrement biodégradable.

Sur le plan des performances, les essais de caractérisation confirment le comportement thermique très intéressant de nos formulations, positionnant le mycélium comme une alternative crédible aux isolants conventionnels. L'étude a cependant révélé des limites physiques majeures qu'il faut assumer : une résistance mécanique encore limitée et une forte sensibilité à l'humidité. En l'état actuel, ces contraintes techniques orientent et restreignent l'utilisation de nos panneaux vers des applications exclusives de second œuvre, de doublage et de cloisonnement intérieur non structurel.

Enfin, ce travail de recherche pose des bases scientifiques claires et ouvre des perspectives indispensables pour l'espérer un passage vers une échelle semi industriel de notre future PME :

Optimisation du procédé : Ajuster plus précisément les conditions d'incubation et le traitement thermique pour éliminer définitivement tout risque de contamination résiduelle.

Résistance hydrique : Développer des traitements hydrofuges ou des revêtements biosourcés protecteurs pour réduire drastiquement le taux d'absorption d'eau.

Amélioration mécanique : Explorer de nouveaux taux de pré-compression au moulage afin d'augmenter la densité et la rigidité du composite, en vue d'ouvrir ce matériau durable à une utilisation plus large dans le domaine du génie civil.

Annexes



République démocratique populaire algérienne

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abou Beker Belkaid TLEMCE

Centre de développement de l'entrepreneuriat de



Faculté / Institut : Technologie

Département : Génie civil

Niveau et spécialité : Master 2 travaux publics,

spécialité voies et ouvrages d'art

Mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme universitaire – Projet d'une entreprise économique

Titre du projet

Développement d'un Bio composite biosourcé nouvelle génération

Introduction dans le cadre de l'obtention du certificat d'entreprise économique
(mini-entreprise), conformément à la décision ministérielle 1275

MOGUDZ

La nature au service du bâtiment

Année Universitaire : 2026 / 2025

Table des matières

Premièrement : Équipe de travail et encadrement

- 1- Équipe de travail
- 2- Équipe d'encadrement

Deuxièmement : Présentation du projet

1. Détermination de l'activité
2. Secteur d'activité
3. Code d'activité

Troisièmement : Description de l'idée du projet

1. Quels sont mes produits / services
2. Qui achètera mes produits / services
3. Où mon projet sera-t-il réalisé et comment mes produits / services atteindront les clients
4. Comment mon projet fonctionnera
5. Justifications du choix de l'idée de mon projet

Quatrièmement : Étude de marché

1. Nature et taille de la concurrence : qui sont les concurrents directs et indirects ?
2. Taille du marché cible et potentiel
3. Analyse SWOT : forces, faiblesses, opportunités et menaces de mon projet
4. Modèle économique BMC de mon projet

Cinquièmement : Étude technique

1. Besoins du projet en ressources humaines : (quels sont les besoins en employés ?)
2. Lieu d'implantation de mon projet et justifications de son choix : où sera situé mon projet ?

Sixièmement : Estimation des coûts et des revenus de mon projet

- 1 - Estimation des coûts de mon projet
 - 1.1 Estimation du montant total de l'investissement de mon projet
 - 2.1 Estimation des achats de matières premières de mon projet
 - 3.1 Estimation des coûts de la main-d'œuvre de mon projet
 - 4.1 Estimation des coûts communs de mon projet
 - 5.1 Estimation des coûts d'amortissement des investissements de mon projet
- 2 - Estimation des revenus de mon projet
 - 1.2 Estimation du volume des ventes annuelles de mon projet
 - 2.2 Calcul du résultat annuel de mon projet

Premièrement : Équipe de travail et encadrement

1- Équipe de travail

Équipe du projet	Spécialité	Faculté / Institut	Expérience / compétence dans le domaine du projet
BENMANSOUR El Hadi	Travaux publics, Voies et ouvrages d'art	Technologie	Compétences en manipulation, expérimentation et analyse des résultats en laboratoire
HADJARI Med Nadjib	Travaux publics, Voies et ouvrages d'art	Technologie	Maîtrise des outils informatiques, analyse de données et contribution aux aspects scientifiques et techniques du projet.

2- Équipe d'encadrement

Encadreur	Spécialité	Faculté / Institut
DAHHAOUI Hachemi	Génie Civil	Technologie
TALEB Omar	Génie Civil	Technologie
MAACHOU Omar	Génie Civil	Technologie

Deuxièmement : Présentation du projet : l'activité est définie conformément aux nomenclatures qui déterminent la liste des activités pour chaque organisme d'enregistrement (Centre National du Registre du Commerce, agriculture, artisanat et métiers).

Code d'activité (conformément à la nomenclature des activités du Centre National du Registre du Commerce – CNRC)	Secteur d'activité	Détermination de l'activité
102105	- Industrie	Conception et fabrication de panneaux d'isolation thermique et acoustique pour le bâtiment

Troisièmement : Description de l'idée du projet :

Quels sont mes produits ou services : (définissez avec précision vos produits, vos services) :

Les produits et services de l'entreprise consistent en la fabrication de matériaux isolants écologiques à base de mycélium, qui représente la partie racinaire des champignons. Ce matériau est obtenu par le mélange du mycélium avec un substrat composé de déchets agricoles recyclés. L'objectif est de

produire un isolant naturel, biodégradable et respectueux de l'environnement, destiné principalement aux secteurs du bâtiment et de l'isolation thermique et acoustique

Qui achètera mes produits / services (définissez précisément vos clients :

- Les entreprises de construction.
- Les bureaux d'études
- Promoteur immobilière
- Entreprises d'isolation

Où mon projet sera-t-il implanté et comment mes produits / services parviendront-ils aux clients : (indiquez le lieu d'implantation de votre projet et les moyens de communication avec vos clients)

Le projet sera implanté à Tlemcen, une région bénéficiant d'un climat modéré, ni trop sec ni trop humide, avec des températures équilibrées. Ces conditions climatiques sont favorables au développement et à la culture du mycélium.

Notre produits et service seront proposés aux entreprises du bâtiment, aux promoteurs immobiliers à travers les réseaux sociaux, un site officiel ou avec les acteurs du secteur du bâtiment.

Comment mon projet fonctionnera-t-il (indiquez qui assurera le fonctionnement du projet et qui y contribuera) :

Le projet fonctionnera grâce à une équipe chargée de la fabrication des matériaux isolants à base de mycélium. Le responsable du projet assurera la gestion de la production, l'organisation du travail et la commercialisation des produits. Des techniciens participeront à la préparation des déchets agricoles, à la culture du mycélium et à la fabrication des panneaux isolants. Les agriculteurs locaux contribueront également au projet en fournissant les déchets agricoles utilisés comme matière première

Justifications du choix de l'idée de mon projet (expliquez pourquoi cette idée a été choisie en particulier) :

Cette idée a été proposé par monsieur DAHHAOUI Hachemi. Après plusieurs recherches, nous avons constaté que les matériaux à base de mycélium sont déjà bien développés à l'étranger grâce à leurs

performances et à leurs avantages écologiques. Ce type de produit est utilisé dans plusieurs domaines, notamment l'isolation et l'emballage, ce qui montre son potentiel et son intérêt pour le marché.

Quatrièmement : Étude de marché

1. Nature et intensité de la concurrence : qui sont les concurrents directs et indirects ?

Concurrents	Nature de la concurrence		Force de la concurrence		
	Indirecte	Directe	Forte	Moyenne	Faible
ISOWORD (panneaux isolants en laine de roche)		×		×	
ECO ISOL Algérie		×	×		
ISOBAL		×	×		
Vendeurs de matériaux de construction	×			×	

Mentionnez les stratégies de votre entreprise pour faire face à ses concurrents :

Les panneaux en mycélium ont un aspect architecturale meilleur avec des différentes moules comme la forme de la pierre naturel tout en étant un matériau biosourcé, biodégradable et à faible empreinte carbone.

1. Taille du marché cible et potentiel :

- Taille du marché cible :

Le marché cible est constitué principalement des entreprises de construction, des promoteurs immobiliers, des architectes et des particuliers qui recherchent des matériaux écologiques pour l'isolation et le revêtement des bâtiments.

- Taille du marché potentiel :

Le marché potentiel est très important, car le secteur du bâtiment en Algérie est en croissance continue, porte par les projets de logement, les infrastructures publiques et la demande en

rénovation. A long terme la rénovation peut représenter un large marché pour les matériaux écologiques et innovants

Analyse SWOT : forces, faiblesses, opportunités et menaces de mon projet :

- **Forces** : Tous les éléments (internes à l'entreprise) qui constituent une source de force pour mon projet (peuvent être : compétences spécifiques, ressources humaines, ressources matérielles, ...)
- **Faiblesses** : Tous les éléments (internes à l'entreprise) qui constituent un point faible ou un obstacle pour mon projet, actuellement ou à l'avenir
- **Opportunités** : Tous les éléments externes ayant un impact positif sur la réalisation de mon projet ou son développement futur
- **Menaces** : Tous les éléments externes ayant un impact négatif sur la réalisation de mon projet ou son développement futur

Tableau d'analyse SWOT

SWOT	Facteurs contribuant à la réalisation des objectifs	Facteurs entravant la réalisation des objectifs
Facteurs Internes	Points de force Strengths 1- Matériaux biodégradable 2- Matériau léger peut être utilisé dans un autre marché	Points de faiblesse Weaknesses 1- Un climat équilibré indispensable pour l'inoculation et l'incubation du matériau fabriqué 2- La sensibilité à la contamination 3- Le temps de fabrication est relativement long
Facteurs Externes	Opportunités Les opportunités 1- Développement du secteur de la construction durable en Algérie 2- Possibilité d'exportation dans le futur 3- La disponibilité de la matière première 4- Sensibilisation croissante aux économies d'énergie	Threats les Menaces 1- Concurrence des matériaux traditionnels (laine de roche, polystyrène) 2- Entrée possible de grandes entreprises sur le marché 3- Faible connaissance du marché sur les nouvelles solutions innovantes

-

1. Modèle économique BMC de mon projet :

Partenaires clés	Activités principales	Proposition de valeur	Relation avec les clients	Clients
- Les laboratoires de recherche - Les professionnels de la microbiologie - Les bureaux d'études	- Achat des déchets agricoles - Multiplication du mycélium - Inoculation - Incubation - Traitement thermique - marketing	- Produit locale - Matériau innovant - Produit recyclée - Peneaux isolant (revêtement murale) - Cout minable du matériau en gardent la fiabilité technique et mécanique - Matériau Biosource	- Accompagnement et suivi adapté - Données techniques fiables - Relation stratégique	- Entreprises de construction - Bureaux d'études - Les entreprises d'isolation - Les vendeurs des matériaux d'isolation
Ressources clés - Les vendeurs de mycélium - Les propriétaires des farms - Les Equipment de production - Les experts en microbiologie et les ingénieurs.		Canaux de distribution - Contact avec les professionnels du domaine - La présentation du produit dans les salons du bâtiment - Les réseaux Professionnal - Création du contenu		
Coûts - Location du locale - Création d'une Ferme - Achat des Equipment - Les salaires des employées - Maintenance des machines			Revenus - Vente du matériau d'isolation (panneaux isolants) - Personnalisation du produit - Service de livraison - Accompagnement et suivi technique - Cibler d'autres marché comme l'emballage écologique	

Cinquièmement : Étude technique

1. Besoins du projet en ressources humaines : déterminez avec précision les besoins de votre projet en ressources humaines

Nature des utilisateurs	Nombre	Compétences / qualifications
Gérant	2	Les porteurs de projet
Cadres (ingénieurs, chefs de service, chargés de marketing, chefs d'ateliers, - etc.)	3	- Expert de la microbiologie - Responsable du marketing de l'entreprise - Chef de production
Agents de maîtrise (chargés du magasin, secrétariat, etc.)	2	- Agent responsable du materials - Responsable de la paperasse de l'entreprise
Agents d'exécution (chauffeur, agent de sécurité, agent de nettoyage, etc.)	2	- Agent de sécurité - Agent de polyvalent

Choix du lieu d'implantation du projet : où sera situé le projet et quelles sont les justifications de ce choix ? (Présentez les arguments nécessaires pour le choix du lieu du projet) :

Le projet sera implanté dans la Zone Industrielle d'Aïn Defla (Tlemcen). Ce site stratégique garantit un approvisionnement local en matières agricoles organiques essentielles à la production de notre panneaux. Ses infrastructures énergétiques optimales et son accès direct à l'autoroute Est-Ouest faciliteront à la fois le processus de fabrication et la livraison rapide vers les chantiers de la région.

Sixièmement : Estimation des coûts et des revenus du projet

1 - Estimation des coûts du projet

1.1 Estimation du montant total de l'investissement : (coût du projet)

Désignation	Montant (DA)
Machines et équipements de production (autoclave, étuve, les moule, équipement de manipulation et chambre d'incubation)	1 100 000
Aménagement du local	200 000
Actifs biologiques (animaux, arbres, etc.)	/
Matériel roulant	/
Matériel de bureau	100 000
Matériel informatique	200 000
Matériel audiovisuel	/
Matériel de télécommunication	50 000
Installation des équipements	50 000
Frais généraux liés à la création	200 000
Fonds de roulement (matières premières)	50 000
Montant total de l'investissement (coût du projet)	1 950 000

1.1 Estimation des achats de matières premières du projet

Liste des matières premières		Année 1	Année 2	Année 3
Matière première 1 Mycelium	Quantité achetée	20 KG	/	/
	Prix unité	1000	/	/
	Coût d'achat de la matière première 1	20 000 DA	/	/
Matière première 2 Déchets agricole (sciure de bois, la paille, stipe de palmier, feuille de palmier)	Quantité achetée	1000 kg	3000 kg	5000 kg
	Prix unité	1000 da	1000	1000

	Coût d'achat de la matière première 2	1000000 Da	3000000 Da	5000000 Da
Montant total des achats de matières premières		1020000 Da	3000000 Da	5000000 Da

3.1 – Estimation des coûts de la main-d'œuvre

Intitulé du poste	Nombre de travailleurs			Montant du salaire		
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 1	Année 2	Année 3
Le gérant / ou les gérants	2	2	2	1 920 000 da	2 400 000 da	2 400 000 da
Cadres (ingénieurs, chefs de service, chargés de marketing, chefs d'ateliers, etc.)	3	3	3	1 800 000 da	1 440 000 da	1 440 000 da
Agents de maîtrise (chargés du magasin, secrétariat, etc.)	2	4	4	1 080 000 da	2 400 000 da	2 400 000 da
Agents d'exécution (chauffeur, agent de sécurité, agent de nettoyage, etc.)	2	3	3	1 080 000 da	1 512 000 da	1 512 000 da

- Le salaire mensuel net ne doit pas être inférieur au salaire minimum garanti

4.1. Estimation des coûts externes du projet

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3
Frais d'électricité / de gaz / d'eau	250 000 da	300 000 da	300 000 da
Coûts de maintenance et de réparation	50 000 da	50 000 da	50 000 da
Frais de location	840 000 da	840 000 da	1 200 000 da
Frais d'assurance du matériel et des équipements	100 000 da	100 000 da	100 000 da
Frais de marketing (publicité et promotion)	80 000 da	80 000 da	100 000 da
Coûts de formation et d'entraînement Autres frais généraux (charges externes)	50 000 da	20 000 da	100 000 da
Total	1 370 000 da	1 390 000 da	1 850 000 da

5.1. Estimation des coûts d'amortissement des investissements

Désignation	Durée d'amortissement (En années)	Annuité d'amortissement (DA)
Machines et équipements de production (1 100 000 DA)	10	110 000
Matériel roulant	-	-
Matériel de bureau (100 000 DA)	5	20 000
Matériel informatique (200 000 DA)	3	66 667
Matériel audiovisuel	-	-
Matériel de télécommunication (50 000 DA)	5	10 000
.....		
.....		
Montant total	206 667 DA	

يطبق الاهتلاك الخطي (تحدد مدة الاهتلاك وفقا لقرار وزارة المالية المؤرخ في 14 أبريل 2025 المعدل والمتمم للقرار الصادر بتاريخ 25 فيفري 2024 الذي

- يحدد مدة اهتلاك التثبيات المطبقة لتحديد النتيجة الجبائية - الجريدة الرسمية عدد 29 لسنة 2025)

1- Estimation des revenus du projet

1.3 Estimation du volume des ventes annuelles

Désignation		Année 1	Année 2	Année 3
Produit / service 1 Panneaux isolation	Quantité vendue	6000	15000	25000
	Prix unitaire	1200 da	1500	1500
	Valeur des ventes du produit 1	7200000 da	22500000 da	37500000 da
Chiffre d'affaires total		7200000 da	22500000 da	37500000 da

3.1. Calcul du résultat annuel

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3
Chiffre d'affaires (ventes) ... (1)	7 200 000 da	22 500 000 da	37 500 000 da
Achats consommés ... (2)	1 020 000 DA	3 000 000 DA	5 000 000 DA
Charges externes ... (3)	1 370 000 DA	1 390 000 DA	1 850 000 DA
Valeur ajoutée ... (3) - (2) - (1) = (4)	4 810 000 DA	18 110 000 DA	30 650 000 DA
Salaires et charges sociales ... (5)	5 880 000 DA	7 752 000 DA	7 752 000 DA
Excédent brut d'exploitation ... (5) - (4) = (6)	-1 070 000 DA	10 358 000 DA	22 898 000 DA
Amortissements et provisions ... (7)	206 667	206 667	206 667
Résultat d'exploitation ... (7) - (6) = (8)	-1 276 667	10 151 333	22 691 333
Impôts sur les sociétés / IFU ... (9)	0	0	0
Résultat net ... (9) - (8) = (10)	-1 276 667 DA	10 151 333 DA	22 691 333 DA
Évolution du chiffre d'affaires	-	+212,5 %	+66.7%

Conclusion :

Le projet de développement de panneaux isolants biosourcés à base de mycélium présente un fort potentiel économique, environnemental et social. Il contribue à la valorisation des déchets agricoles locaux, à la réduction de l'empreinte carbone du secteur du bâtiment et à la promotion des matériaux écologiques innovants en Algérie.

Le projet permettra également la création d'emplois qualifiés, le développement d'un savoir-faire local dans les biomatériaux et l'encouragement de l'économie circulaire. À moyen et long terme, il pourra répondre à la demande croissante en solutions d'isolation durable et ouvrir des perspectives d'exportation vers les marchés internationaux sensibles aux enjeux environnementaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Ross, P. (2009). *Mycotecture Alpha Project*. Research on fungal architecture and mycelium construction materials.
- [2]: Bayer, E., & McIntyre, G. (2007). *Mycelium-Based Composite Materials and Methods of Making*. United States Patent
- [3]: [Ecovative Official Website](#). (2024). *Mycelium-Based Materials and Technologies*.
- [4]: [Forbes – Ecovative: Growing Better Materials](#) (2023)
- [5]: Mogu. (2024). *Mycelium-based products for architecture and interior design*. Consulté sur le site officiel de Mogu
- [6] : Pelletier, M. G., & Holt, G. A. (2020). *Material Characterization of Fungal Mycelium-Based Acoustic Panels*. Construction and Building Materials.
- [7]: MycoTile. (2023). *About Us*. Available at: <https://mycotile.eco/about-us/>
- [8] : Sreerag, N. K., Kashyap, P., Shilpa, V. S., Thakur, M., & Goksen, G. (2025). Recent advances on mycélium based biocomposites: Synthesis, strains, lignocellulosic substrates, production parameters.
- [9]: Zhang, X., Hu, J., Fan, X., & Yu, X. (2022). *Naturally grown mycelium-composite as sustainable building insulation materials*. Journal of Cleaner Production, 342, 130784.
- [10]: Mbabali, H., Lubwama, M., Yiga, V. A., Were, E., & Kasedde, H. (2024). Development of rice husk and sawdust mycelium-based bio-composites: Optimization of mechanical,
- [11]: Zhang, X., Hu, J., Fan, X., & Yu, X. (2025). *Naturally grown mycelium-composite as sustainable building insulation materials*. Journal of Cleaner Production, 342, 130784
- [12]: Kaffash, A., Janpoor, J., Safaeian, P., Yousefsani, S. A., & Tahani, M. (2026). Mechanical testing of a date palm fiber-reinforced mycelium-based composite biomaterial. *Mechanics of Composite Materials*, 61(6).
- [13]: Bagheriehnajjar, G., Yousefpour, H., & Rahimnejad, M. (2023). *Multi-objective optimization of mycelium-based bio-composites based on mechanical and environmental considerations*. Construction and Building Materials, 407, 133346.

- [14]: Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., & Wösten, H. A. B. (2019). *Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites*. *Materials & Design*, 161, 64–71
- [15]: Lee, J. S., Rezaei, H., Gholami Banadkoki, O., Yazdan Panah, F., & Sokhansanj, S. (2024). Variability in physical properties of logging and sawmill residues for making wood pellets. *Processes*, 12(1), 181.
- [16]: Elsacker, E., Vandelook, S., Brancart, J., Peeters, E., & De Laet, L. (2021). Basic research of material properties of mycelium-based composites. *Biomimetics*, 7(2), 51.
- [17]: Geremew, A., De Winne, P., Demissie, T. A., & De Backer, H. (2023). Characterization of wheat straw fiber grown around Jimma zone, ETHIOPIA.
- [18]: O'Dogherty, M. J., Huber, J. A., Dyson, J., & Marshall, C. J. (1995). A Study of the Physical and Mechanical Properties of Wheat Straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62(2), 133–142.
- [19]: Elseify, L. A., Midani, M., Shihata, L. A., et al. (2019). Review on cellulosic fibers extracted from date palms (*Phoenix dactylifera* L.) and their applications.
- [20]: Tahri, I., Ziegler-Devin, I., Ruelle, J., Segovia, C., & Brosse, N. (2016). Extraction and characterization of fibers from palm tree.
- [21]: Alotaibi, M. D., Alshammari, B. A., Saba, N., Alothman, O. Y., Sanjay, M. R., Almutairi, Z., & Jawaid, M. (2019). *Characterization of natural fiber obtained from different parts of date palm tree (Phoenix dactylifera L.)*.
- [22]: Bourmaud, A., Dhakal, H., Habrant, A., Padovani, J., Siniscalco, D., Ramage, M. H., Beaugrand, J., & Shah, D. U. (2017). *Exploring the potential of waste leaf sheath date palm fibres for composite reinforcement through a structural and mechanical analysis*.
- [23]: Attias, N., Danai, O., Abitbol, T., Tarazi, E., Ezov, N., Pereman, I., & Grobman, Y. J. (2020). Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis.
- [24]: ISO 845:2006. *Cellular plastics and rubbers — Determination of apparent density*. International Organization for Standardization.

- [25]: ISO 9427:2003. *Wood-based panels — Determination of density*. International Organization for Standardization
- [26]: Elsacker, E., Vandeloock, S., Brancart, J., Peeters, E., & De Laet, L. (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLOS ONE*, 14(7), e0213954. DOI: 10.1371/journal.pone.0213954
- [27]: ASTM C303-21. *Standard Test Method for Dimensions and Density of Preformed Block and Board-Type Thermal Insulation*. ASTM International
- [28]: Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., & Athanassiou, A. (2017). *Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties*. Scientific Reports, 7, 41292.
- [29]: Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., et al. (2019). *Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites*. Sustainability, 11(1), 281.
- [30]: ISO 29767:2019, *Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment — Détermination de l'absorption d'eau à court terme par immersion partielle*. International Organization for Standardization.
- [31]: NF EN 1609:2013, *Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment — Détermination de l'absorption d'eau à court terme par immersion partielle*. AFNOR / CEN.
- [32]: ASTM D570-22, *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. ASTM International.
- [33]: ISO 16535:2019, *Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment — Détermination de l'absorption d'eau à long terme par immersion*. International Organization for Standardization
- [34]: **Mycelium biocomposites from agricultural and paper waste: Sustainable ...** (2025). Article montrant le calcul de l'absorption d'eau par pourcentage d'augmentation de masse après immersion
- [35]: Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgheld, P., & Wösten, H. A. B. (2019), *Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites*, *Materials and Design*, 161, 64–71.